



วิทยานิพนธ์

การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต
เหลือทิ้งจากโรงงาน

IMPROVEMENT OF LATERITIC SOIL BY CALCIUM
CARBONATE WASTE

นายศราวุธ โกวเครือ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงาน

Improvement of Lateritic Soil by Calcium Carbonate Waste

นามผู้วิจัย นายศราวุธ โกวเครือ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทย์กุล, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ๒๖ เดือน พ.ค. พ.ศ. ๒๕๕๑

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงาน

Improvement of Lateritic Soil by Calcium Carbonate Waste

โดย

นายศราวุธ โกวเครือ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2551

สราวุธ โกวเดื่อ 2551: การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
จากโรงงาน ปรีญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ประทีป ดวงเดือน, M.Eng.
131 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงานมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน
ลูกรังเพื่อพัฒนาคุณภาพของวัสดุเพื่อนำไปใช้งานทาง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม
ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง อันได้แก่ การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ปริมาณของ
แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง และอายุการบ่ม สำหรับตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้นำมา
จากแหล่งดินลูกรังในจังหวัดราชบุรี โดยนำมาร่อนแยกขนาดและนำเม็ดดินแต่ละขนาดมาผสมกันให้ได้
การกระจายขนาดตามที่กำหนดไว้โดยแบ่งเป็น 2 เกรดได้แก่ เกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง
ของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย จากนั้นนำดินลูกรังมาผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของดินแห้งแล้วทำการทดสอบหาค่า ดัชนีความเหนียว
ของดิน, ความหนาแน่นของดิน, California Bearing Ratio และ ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดิน โดยทำ
การทดสอบทั้งที่หลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน นอกจากนี้ยังทำการทดสอบหา
ค่า Unconfined Compressive Strength, Modulus of Elasticity (E), Strain at Failure โดยทดสอบทั้งที่หลัง
บดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อผสมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความเหนียวของ
ดินลดลงประมาณ 6.76%, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง, ปริมาณความชื้นเหมาะสม
มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น, ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ทำให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR มีค่าเพิ่มสูง
มากที่สุด คือประมาณ 4% ของดินแห้งเมื่อผสมเกินกว่าค่านี้กำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ค่า Unsoaked และ Soaked
CBR จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น, ค่าการบวมตัวของดินลดลงประมาณ 0.01-0.05%, ค่าสัมประสิทธิ์
ความชื้นน้ำที่ทดสอบทั้งที่หลังบดอัดมีแนวโน้มลดลงประมาณ 3 และ 295 เท่าสำหรับลูกรังเกรด B และ D
และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังเกรด B มีค่าความชื้นน้ำต่ำลงประมาณ 6 และลูกรังเกรด D มีค่า
เพิ่มขึ้นประมาณ 18 เท่า ค่า UCS มีค่าเพิ่มสูงมากที่สุด คือประมาณ 4% ของดินแห้งเมื่อผสมเกินกว่าค่านี้
กำลังจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ค่า UCS จะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ค่า Modulus of Elasticity ของดินลูกรัง
มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลการทดสอบ UCS และค่าความเครียดที่จุดวิบัติมีค่าลดลง

สรุปได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน
ลูกรังเมื่อผสมในสัดส่วนที่เหมาะสม

สราวุธ

โกวเดื่อ

ลายมือชื่อนิติ



ลายมือชื่อประธานกรรมการ

13 / พค. / 2551

Sarawut Kowkrua 2008: Improvement of Lateritic Soil by Calcium Carbonate Waste.

Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prateep Duangduen, M.Eng. 131 pages.

The research attempted to study the improvement of engineering properties of lateritic soil stabilized with calcium carbonate waste for using in road embankment construction. The study involved the effects of grain size distribution, quantity of calcium carbonate waste and curing times. Lateritic soil sample from borrow pit in Ratchaburi province were sieved to obtain different grain size distributions and then prepared by controlling specified grain size distribution. Soil samples were prepared and grouped into B and D graded soil according to subbase standard specification of Highway Department of Thailand. Lateritic soil were mixed with calcium carbonate waste at the proportion of 2, 4, 6, 8 and 10% by dry weight of soil. Then, the specimens were tested to find out plasticity index, modified proctor compaction test, california bearing ratio and coefficient of permeability after compacted and curing for 3, 7, 14 and 28 days. the specimens were tested to find out unconfined compressive strength, modulus of elasticity and strain at failure after compacted and curing for 3, 7, 14, 28 and 90 days.

Experimental results showed that when the quantity of calcium carbonate waste increased, the plasticity index and the maximum dry density appeared to decrease, while the optimum moisture content increased. The appropriate quantity of calcium carbonate waste used in the mixture which gave the maximum value of Unsoaked and Soaked CBR value were 4% by dry weight of soil. Unsoaked and Soaked CBR values were increased with increasing curing time. Swelling results were decreased by 0.01-0.05%, coefficient of permeability with calcium carbonate waste after compaction, were decreased by 3 and 295 times for B and D graded. At 28 days of curing time, coefficient of permeability with calcium carbonate waste were decreased by 6 times for B grade and D grade were increased by 18 times. The proportion quantity of calcium carbonate waste gave the highest UCS results were 4% by dry weight of soil. UCS results were increased with increasing curing time, modulus of elasticity results were increased same as UCS results and strain at failure were decreased.

Calcium carbonate waste can be used to stabilize the lateritic soil if mixing with the appropriate portion.

SARAWUT KOWKRUA

Student's signature

Prateep Duangduen

Thesis Advisor's signature

13 / MAY / 2008

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ประทีป ดวงเดือน ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ เพื่อให้เกิดวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขึ้นมา อีกทั้งยังช่วยอบรมสั่งสอนระเบียบวิธีชีวิตให้แก่ผู้วิจัยสามารถดำรงชีวิตในสภาวะปัจจุบัน พร้อมทั้ง คณะกรรมการที่ปรึกษาประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ก่อโชค จันทรวงกูร กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์ วัชรินทร์ วิทย์กุล กรรมการวิชารอง และดร. สุภาพร แก้วกอ เลี้ยวไฟโรจน์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ดร. อภินิติ โชติสังกาศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนาคล คงสมบูรณ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนเสนอแนะแนวทางในการดำเนินงานและตรวจทานแก้ไขจนวิทยานิพนธ์แล้วเสร็จอย่าง สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านทั้งที่ทราบนามก็ดีไม่ทราบนามก็ดีที่ให้คำชี้แนะ ข้อมูล แนวทาง การทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและ ฐานราก และเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยฯ ทุกท่าน ในการช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่างๆ รวมทั้งรุ่นพี่และรุ่นน้องปริญญาโทวิศวกรรมปฐพีทุกท่าน ซึ่งมีอาจกล่าวนามลงใน กิตติกรรมประกาศได้ครบที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ สนับสนุนและเป็นแรงใจในการทำวิจัยครั้งนี้ เสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และความปรารถนาดีของทุกท่าน จึงขอขอบพระคุณ ด้วยความเคารพอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ท้ายสุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ปู่ ย่า ตา ยาย น้องสาวทั้งสองคนและญาติ พี่น้องต่าง ๆ ที่ให้ความอุปถัมภ์ ช่วยเหลือ สนับสนุน และเป็นกำลังใจในทุกๆ เรื่องด้วยความรัก และปรารถนาดีตลอดมา หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้จักก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวม ผู้วิจัยขอยก ความดีนี้ให้แก่บิดา มารดา ปู่ ย่า ตา ยาย และคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชารวมทั้ง ส่งเสริมให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ ตลอดจนให้โอกาสได้รับการศึกษาและสำเร็จการศึกษาจาก สถาบันแห่งนี้

ศราวุธ โกวเครือ

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลการทดสอบ	44
สรุปและข้อเสนอแนะ	120
สรุป	120
ข้อเสนอแนะ	123
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	125

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณซิลิกาและเซสควิออกไซด์ของดินลูกรังในประเทศไทย	13
2	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในประเทศไทย	14
3	การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุพื้นทาง	15
4	การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุรองพื้นทาง	16
5	การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุพื้นทางในประเทศไทย	17
6	การกระจายขนาดของเม็ดดินที่ใช้ทดสอบ	41
7	คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินลูกรัง	46
8	ผลการทดสอบ Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้น	49
9	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรด B และ D	50
10	ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D	52
11	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D	52
12	ค่า Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	54
13	ค่า Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	55
14	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรด B และ D	68
15	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ของดินลูกรังเกรด B และ D กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	69
16	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) กับปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง	69
17	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ของดินลูกรังเกรด B และ D กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	69
18	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสม แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ผลการทดสอบ Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	74
20	ค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 3 วัน ของดินลูกรังเกรด B และ D	75
21	ค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4%	76
22	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	87
23	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	88
24	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	89
25	ค่าการบวมตัวของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	92
26	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งทดสอบทันทีหลังการบดอัด	99
27	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 28 วัน	100
28	เปรียบเทียบผลการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วย Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว กับ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว ของตัวอย่างดินลูกรัง	105
29	ผลการทดสอบ UCS ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	106
30	ค่า UCS และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 3 วัน ของดินลูกรัง	107
31	ค่า UCS และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4%	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
32	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	108
33	ค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากการทดสอบ UCS	110
34	ค่า E และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 7 วัน ของดินลูกรัง	111
35	ค่า E และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4%	111
36	รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E) และอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	113
37	ค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากการทดสอบ UCS	115
38	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของดินลูกรังเกรด B และ D จากผลการทดสอบ Soaked CBR	118
39	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของดินลูกรังเกรด B และ D จากผลการทดสอบความเหนียวของดิน (Plasticity Index)	118
40	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของดินลูกรังเกรด B และ D	123

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศ	13
2	ลักษณะและรูปร่างของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	23
3	แคลเซียมคาร์บอเนตที่เหลือทิ้งจากขบวนการผลิต	24
4	บริเวณที่เก็บตัวอย่างดินลูกรัง	39
5	ขั้นตอนการวิจัย	40
6	การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด B ที่ใช้ในการทดสอบ	42
7	การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด D ที่ใช้ในการทดสอบ	42
8	การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด B และเกรด D ที่ใช้ในการทดสอบ	43
9	เม็ดดินขนาดต่างๆ ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบ	43
10	(ก) ค่าความสึกหรอของตัวอย่างดินลูกรัง (ข) Plasticity Index ของตัวอย่างดินลูกรัง (ค) Soaked CBR ของตัวอย่างดินลูกรัง	45
11	การกระจายขนาดเม็ดดินของตัวอย่างดินที่เก็บจากสนาม	47
12	แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ในงานวิจัย	48
13	ช่วงการกระจายของของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ในงานวิจัย	49
14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด B และเกรด D	51
15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	57
16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	57
17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	58
18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	58
19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	59
21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	60
22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	61
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	62
24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	62
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	63
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	63
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	64
28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	64
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	65
30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	66
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B และเกรด D	70
32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรด B และเกรด D	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B และเกรด D	71
34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	72
35	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	77
36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	78
37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	78
38	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	79
39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	79
40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	80
41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B และ D	80
42	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B และ D	81
43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	81
44	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	82
45	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	83
47	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	83
48	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	84
49	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	84
50	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	85
51	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	90
52	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	90
53	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	91
54	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	91
55	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B	93
56	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D	93
57	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B และ D	94
58	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับและอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสม แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
59	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	95
60	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	95
61	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับ Soaked CBR ทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D	97
62	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D	97
63	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B ทดสอบทันทีหลังบดอัด	101
64	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B อายุการบ่ม 28 วัน	101
65	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B ทดสอบทันทีหลังบดอัดและอายุการบ่ม 28 วัน	102
66	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด D ทดสอบทันทีหลังบดอัด	102
67	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด D อายุการบ่ม 28 วัน	103
68	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง ของดินลูกรังเกรด D ทดสอบทันทีหลังบดอัดและอายุการบ่ม 28 วัน	103
69	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นในมวลดินของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว และ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
70	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่มต่าง ๆ	109
71	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	109
72	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E) กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่มต่าง ๆ	113
73	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E) ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่มต่าง ๆ	114
74	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E กับ UCS ทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	114
75	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	116
76	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) กับอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	116
77	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 14 วันของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	119
78	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 14 วันของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง	119

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

%	เปอร์เซ็นต์, ร้อยละ
ϵ_f	ความเครียดที่กำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด
AASHTO	มาตรฐานการทดสอบโดย American Association of State Highway and Transportation Officials
Al_2O_3	อลูมิเนียมออกไซด์
Al^{3+}	อลูมิเนียมไอออน
ASTM	มาตรฐานการทดสอบโดย American Society for Testing and Materials
a	ค่าคงที่ของสมการ
b	ค่าคงที่ของสมการ
blow	จำนวนครั้งการบดอัด
Ca	ธาตุแคลเซียม
Ca^{2+}	แคลเซียมไอออน
$Ca(OH)_2$	สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์
$CaCO_3$	สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต
CAH	สารประกอบแคลเซียมอลูมินेटไฮเดรต (Calcium aluminate Hydrate)
CaO	สารประกอบแคลเซียมออกไซด์
CBR	อัตราส่วนหน่วยแรงด้านของดินบดอัดต่อแรงด้านการกดของหินคลุกมาตรฐาน ย่อมาจาก California Bearing Ratio
CO_2	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
CSH	สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate)
c	ค่าคงที่ของสมการ
cm.	เซนติเมตร
cm./sec.	เซนติเมตรต่อวินาที
E	Modulus of Elasticity
E_i	Initial Tangent Modulus
et, al.	และอื่นๆ ย่อมาจาก et alibi

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ (ต่อ)

E_{50}	Modulus of Elasticity ที่ 50% ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียวสูงสุด
Fe_2O_3	สารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์
ft.	ฟุต
ft. ³	ปริมาตรเป็นลูกบาศก์ฟุต
GCC	การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตโดยวิธีการบดจากธรรมชาติ (Ground Calcium Carbonate)
H^+	ไฮโดรเจนไอออน
H_2O	สารประกอบของน้ำ
K	ธาตุโพแทสเซียม
K^+	โพแทสเซียมไอออน
K_2O	สารประกอบโพแทสเซียมออกไซด์
ksc.	หน่วยวัดหน่วยแรง (ความเค้น) เป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
lb	ปอนด์
Li^+	ลิเทียมไอออน
LL	ปริมาณความชื้นที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็น สารหนืดตัว (Liquid Limit)
LOI	ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)
MDD	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดิน (Maximum Dry Density) จากการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานใน ห้องปฏิบัติการ
Mg	ธาตุแมกนีเซียม
$Mg(OH)_2$	สารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์
Mg^{2+}	แมกนีเซียมไอออน
MgO	สารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์
MnO	สารประกอบแมงกานีสออกไซด์
m.	เมตร ตัวย่อของ metre(s)
m. ³	ปริมาตรเป็นลูกบาศก์เมตร
Na	ธาตุโซเดียม

คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อ (ต่อ)

Na ⁺	โซเดียมไอออน
Na ₂ O	สารประกอบโซเดียมออกไซด์
OMC	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดิน (Optimum Moisture Content) จากการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานในห้องปฏิบัติการ
PCC	การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตโดยวิธีการตกผลึกใหม่ (Precipitated Calcium Carbonate)
PL	ปริมาณความชื้นที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง (Plastic Limit)
pH	ค่าความเป็นกรดต่าง
PI	ดัชนีความเหนียวของดิน (Plasticity Index)
R ²	ค่ากำลังสองน้อยที่สุด (least square)
SC	ดินทรายที่มีส่วนผสมของดินเหนียว (Clayey Sand)
SEM	การทดสอบ Scanning Electron Microscope
SiO ₂	สารประกอบซิลิกาออกไซด์
SM	ดินทรายที่มีส่วนผสมของทรายแป้ง (Silty Sand)
SP-SC	ดินทรายที่มีส่วนผสมของดินเหนียว และมีขนาดคละไม่มี
SW-SC	ดินทรายที่มีส่วนผสมของดินเหนียว และมีขนาดคละที่ดี
TiO ₂	สารประกอบไทเทเนียมออกไซด์
t	อายุการบ่ม (Curing times)
t.	น้ำหนักหน่วยเป็นตัน
t/m. ³	ตันต่อลูกบาศก์เมตร
UCS	กำลังรับแรงอัดสูงสุดแบบแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength)
USCS	การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification System
XRD	X-Ray Diffraction Method
x	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)

การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงาน

Improvement of Lateritic Soil by Calcium Carbonate Waste

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีงานก่อสร้างและปรับปรุงสาธารณูปโภคพื้นฐานต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะการก่อสร้างและปรับปรุงถนนหนทางซึ่งจะพบเห็นได้เกือบทั่วทุกภูมิภาคอันมีสาเหตุมาจากอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจและความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยี ทำให้มีการใช้วัสดุ เช่น หิน ดิน ทราย เพื่อเป็นวัสดุพื้นทางและรองพื้นทางของถนนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาขาดแคลนวัสดุ ดังนั้นเพื่อให้ได้วัสดุที่อาจจำเป็นต้องขนส่งมาจากแหล่งหินหรือดินที่อยู่ห่างไกล ทำให้ราคาของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างมีราคาแพงหรือในบางกรณีเมื่อไม่สามารถหาวัสดุที่มีคุณภาพดีได้ อาจจำเป็นต้องนำวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เช่น การใช้ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ผสมลงในดินเพื่อให้ดินมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาได้ แต่วิธีการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาหาวัสดุชนิดใหม่ๆ เพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพดินโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดแทนหรือลดปริมาณปูนซีเมนต์ ปูนขาว ที่ใช้ในการผสมลงในดินเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ยิบซัม เถ้าหินก เถ้าลอย ตะกรันจากเตาถลุง คอนกรีตเก่า ชานอ้อย และอื่นๆ แต่ก็ยังไม่มีนักวิจัยทำการศึกษาเพื่อนำแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงานมาผสมกับดินลูกรังเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน

ประเทศไทยมีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย โดยในปีหนึ่งๆ นั้นมีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 0.8-1.0 ล้านตันต่อปี ซึ่งในจำนวนนี้ ประมาณ 90% จะเป็นการผลิตโดยวิธีการบดจากธรรมชาติ (GCC) ซึ่งนอกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้วก็ยังก่อให้เกิดแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณวัตถุดิบที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยทั่วไปแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมรอง เช่น ผสมสีที่ไม่ต้องการความบริสุทธิ์ของแคลเซียมมากนัก หรือผสมในอาหารสัตว์ นอกจากนี้ โดยส่วนมากจะนำไปทิ้งเพื่อเป็นวัสดุสำหรับถม เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรัง พบว่าส่วนประกอบหลักของ (CaCO_3) คือ CaO ซึ่งมีคุณสมบัติของสารเชื่อมประสานที่น่าจะมีความเป็นไปได้ในการใช้งานอีกทั้งการนำแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

มาใช้ในด้านวิศวกรรมจะเกิดประโยชน์อย่างมาก ทั้งยังช่วยลดปัญหาการจัดเก็บ ปัญหามลภาวะ และปัญหาการกำจัดของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม ซึ่งถือได้ว่าเป็นการนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์

เพื่อเป็นการประหยัดในการก่อสร้างโดยเฉพาะงานทางจะต้องนำวัสดุในท้องถิ่นนั้นๆ มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง แต่เนื่องจากในบางครั้งวัสดุที่ได้มีคุณภาพต่ำและอาจมีความสามารถในการรับน้ำหนักต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องใช้วัสดุเหล่านี้จึงต้องดำเนินการปรับปรุงคุณภาพอาจจะทำได้โดยการหาวัสดุเชื่อมประสานช่วยให้เม็ดดินยึดเกาะกันในครั้งนี้ได้มีการทดลองผสมสารตัวใหม่ด้วยการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและใช้เทคนิคการบดอัดดินควบคู่ไปด้วย ซึ่งการปรับปรุงโดยใช้วิธีการผสมสารนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาทำให้เกิดขาดความรู้ความเข้าใจในการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดนี้มาใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง เพื่อพัฒนาคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้ทำถนน และเพื่อเป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งที่ไม่มีมูลค่ามาใช้งานทางด้านวิศวกรรม โดยการศึกษานี้จะศึกษาถึงอิทธิพลของการกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง อายุการบ่ม ตลอดจนความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานจริง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นต่างๆ ทางวิศวกรรมของดินลูกรัง เพื่อเป็นข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งาน
2. ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยวิธีทางเคมี (Chemical Stabilization) ด้วยสารเชื่อมประสาน ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงาน (CaCO_3)
3. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง อันได้แก่
 - การกระจายขนาดของเม็ดดิน
 - ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
 - อายุการบ่ม
4. พิจารณาเปรียบเทียบค่าความเหนียวของดินลูกรัง (Plasticity Index), CBR, UCS และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งโดยพิจารณาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและที่อายุการบ่มต่าง ๆ กัน
5. ศึกษาถึงความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการนำแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะด้านวิศวกรรมทางของประเทศไทยต่อไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. เก็บตัวอย่างดินลูกรังเพื่อใช้ในงานวิจัย โดยการสุ่มตัวอย่างและทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินลูกรัง

2. สารผสมเพิ่มที่ใช้ในงานวิจัย คือ แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากขั้นตอนการผลิต แคลเซียมคาร์บอเนตจากโรงงานแคลเซียมโปรดักส์ จังหวัดลพบุรี โดยมีการปรับปรุงความละเอียด โดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แบบร่อนแห้ง

3. ตัวอย่างดินลูกรังที่นำมาทดสอบทางกายภาพและทางวิศวกรรม นำมาจากการเตรียม ตัวอย่างดินให้อยู่ในช่วงของเกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของวัสดุมวลรวมของ กรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

4. อัตราส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งต่อดินลูกรังที่เตรียมไว้ ใช้อัตราส่วนผสม 2, 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินลูกรังผึ่งแห้ง (Air Dry)

5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยดำเนินการทดสอบหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit เพื่อพิจารณา การเปลี่ยนแปลงความเหนียวของดิน (Plasticity Index) ทันทีหลังผสมเสร็จและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับลูกรังกลุ่มเดียวกันที่ไม่ได้ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

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

7. การทดสอบกำลังของดินโดยวิธี California Bearing Ratio แบบ Unsoaked CBR และ Soaked CBR ของดินลูกรังและดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งบดอัดที่ปริมาณ ความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยดำเนินการทดสอบทันทีหลังการบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

8. การทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ของดินลูกรังและดินลูกรังผสม แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้น โดยดำเนินการทดสอบ ทันทีภายหลังการบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

9. การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยตัวอย่างดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งนี้จะทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีหลังการบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

การตรวจเอกสาร

ดินลูกรังเป็นวัสดุธรรมชาติเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือร้อนชื้น มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ซึ่งคนในภูมิภาคเอเชียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลานาน การผุพังในกระบวนการเกิดดินลูกรังส่วนมากเป็นการผุพังทางเคมี ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสภาพของแร่ที่ประกอบอยู่ในหิน หรือในตะกอนที่สะสมตัวอยู่บริเวณนั้น โดยอาจมีการผุพังทางกลศาสตร์จากการแตกหักของหินดันกำเนิคร่วมด้วย ดังนั้นดินลูกรัง จึงมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่ง แต่มีลักษณะทั่วไปที่เด่นชัด คือมีปริมาณแร่เหล็กและอลูมิเนียมที่เกิดจากการผุพังมาก มีสารอินทรีย์น้อยมาก อาจมีหรือไม่มีแร่ควอตซ์ก็ได้ มีความเป็นเบสลดลง มีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับอากาศ เกิดในสภาพแวดล้อมที่แห้งแล้งสลับชุ่มชื้น (แดดออก/ฝนตก) จากการศึกษาการผุพังและการเกิดสีแดงของหินในประเทศสหรัฐอเมริกาของ Russel (1989) พบว่า ความชื้นสูงและอุณหภูมิที่ร้อนมีอิทธิพลต่อการผุพังของหินมากกว่าอุณหภูมิที่เย็นและความชื้นต่ำ Holland (1930) ได้สนับสนุนว่าที่อุณหภูมิและความชื้นสูง หรือในสภาพภูมิอากาศแบบเขตร้อนจะเกิดกระบวนการกัดเซาะทางเคมีขึ้น โดยสารพวกซิลิกา Alkaline และ Alkaline Earth สลายตัว เกิดการสะสมของสารพวกอลูมินาและออกไซด์ของเหล็ก

คำจำกัดความของดินลูกรัง

Buchanan (1807) เป็นผู้ริเริ่มใช้คำว่า “laterite” โดยคำว่า laterite มาจากรากศัพท์ภาษาละตินว่า later ซึ่งแปลว่า “อิฐ” โดยใช้เรียกดินที่พบในมาลาบาร์ ประเทศอินเดียซึ่งหมายถึงดินที่มีสีแดงอิฐ (brick-red rock) มีความแข็งคล้ายอิฐ เนื่องจากมีเหล็กผสมอยู่ในปริมาณสูง มีความพรุนไม่แบ่งชั้น มีความอ่อนพอที่จะตัดเป็นแผ่นขนาดเท่าอิฐได้ และเมื่อขุดพบจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ ดังนั้นจึงนิยมนำมาทำเป็นอิฐเพื่อใช้ในการก่อสร้าง

Mallet (1883) เป็นผู้ให้คำจำกัดความทางเคมีของดินลูกรัง (Laterite Soils) ว่าหมายถึงดินที่ตามธรรมชาติจะมีสีแดง เนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม จากนั้น Bauer (1898) ได้ให้ความหมายของดินลูกรังว่าหมายถึงวัสดุที่มีสารประกอบของซิลิกาและปริมาณของอลูมิเนียมในรูปของไฮดรอกไซด์สูงเมื่อเทียบกับปริมาณของ bauxite จากนั้น Fermor (1911) ได้พัฒนาการเรียกชื่อลูกรังตามแร่พื้นฐานที่ประกอบในลูกรังซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณของซิลิกา

แร่พื้นฐานที่ประกอบในลูกรังได้แก่ เหล็ก, อลูมิเนียม, ไทเทเนียม และแมงกานีส ต่อมา Lacroix (1913) ได้จำแนกชนิดของลูกรังตามปริมาณของไฮดรอกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบดังนี้

1. True Laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบมากกว่า 90 %
2. Silicate Laterite มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบ 50-90 %
3. Laterite Clay มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบ 10-50 %

Martin and Doyné (1927) แบ่งชนิดของดินลูกรังตามอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ดังนี้

1. True Laterite มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ น้อยกว่า 1.33
2. Lateritic Soil หรือดินลูกรัง มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ 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 มีเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณสูงอันเป็นผลมาจากการกระบวนการเกิดลูกรัง (Laterization) ส่วนใหญ่เป็นดินสีแดง น้ำตาล หรือเหลือง มักพบเม็ดลูกรังและเม็ดกรวดผสมปนอยู่ Alexander and Cady (1962) ได้รวบรวมงานวิจัยทางด้านธรณีพื้นฐาน ฟิสิกส์และเคมีในเทอมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับลูกรัง โดยให้ความหมายในเทอมต่างๆ ดังนี้

Laterite หรือลูกรัง หมายถึง ดินที่เกิดจากกระบวนการสลายตัวของหินตามธรรมชาติ ในอัตราค่อนข้างสูงและมีคุณสมบัติที่แข็งตัวเมื่อสัมผัสอากาศ กล่าวคือมี Secondary Oxide ของเหล็ก หรืออลูมิเนียมในปริมาณสูง โดยที่ปริมาณความเป็นกรดต่ำและ 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 ดินลูกรังที่เกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ มีความเหนียวและความแข็งแรง จะแสดงคุณสมบัติของหินมากกว่าดิน เช่น หินศิลาแลง เป็นต้น

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

Phinthise หมายถึง หินลูกรังที่สามารถตัดด้วยเครื่องตัดโลหะได้ ในขณะที่อยู่ใต้ดินเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศจะเกิดการแข็งที่ไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม

Sesquioxide หมายถึง ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของลูกรังอันได้แก่ Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ TiO_2

Self-hardening-property หมายถึง คุณสมบัติในการแข็งตัวของดินได้เองเมื่อสูญเสียความชื้น คุณสมบัตินี้จะไม่กลับสู่สภาพเดิม แม้ได้รับความชื้นเดิมเข้าไปมากเท่าไรก็ตาม

กระบวนการเกิดดินลูกรัง (Laterization)

กระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขตร้อน (Tropical Weathering) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและเคมีฟิสิกส์ โดยเกิดการเปลี่ยนรูปของ Primary Rock-Forming Minerals เป็นแร่ดินเหนียวและสารประกอบลูกรัง ซึ่งได้แก่ เหล็ก อลูมิเนียม ไทเทเนียม และแมงกานีส สะสมอยู่เป็นจำนวนมากโดยแบ่งขั้นตอนในการเกิดลูกรังออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

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

2. Laterization เป็นขบวนการก่อกำเนิดลูกรังโดยจะเกิดการชะล้างภายใต้สภาวะการระบายที่เหมาะสมเกิดการรวมตัวของซิลิกา, ด่าง และสารพวกออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของเซสควิออกไซด์ (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Ti_2O_3) ส่วนสารอื่นๆ จะถูกระบายหรือรวมตัวกันขึ้นกับความเป็นกรด ด่าง ของน้ำในดินและสภาวะการระบาย Mohr and Van Baren (1954) ได้กล่าวว่า กระบวนการ Laterization เกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะทางธรรมชาติ และการเกิดกระบวนการทำลายทางเคมีของหินเดิมภายใต้สภาวะทางเคมีและการเปลี่ยนรูปที่ต่ำ กระบวนการทำลายทางเคมี-ฟิสิกส์ จะไม่ดำเนินต่อไปในช่วงของการเปลี่ยนรูปแร่ดินเหนียวและมีแนวโน้มที่จะเกิดแร่ดินเหนียวพวกคาโอลิไนท์หรือไฮเดรท หรือแอนไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก และอลูมิเนียม ต่อมา Remillion (1967) กล่าวว่าภายใต้สภาวะการเกิดกระบวนการทำลายทางเคมีฟิสิกส์ที่ยาวนานนี้แร่ดินเหนียวจะถูกชะล้างเหลือสารเคมีที่มีออกไซด์ของอลูมิเนียม เช่น Gibbsite หรือ ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก เช่น โลโมไนต์ (Limonite) หรือเกอร์ไทท์ (Gertite)

3. Dehydration หรือ Dessication เป็นขบวนการสูญเสียความชื้นโดยจะเกิดดีไฮเดรชันในบางส่วนหรือทั้งหมดของเซสควิออกไซด์ และ Secondary Mineral ซึ่งบางครั้งทำให้เกิดการแข็งตัว เกิดความเข้มข้น เกิดการตกผลึกของ Amorphous Iron Colloids ไปเป็น Dense Crystalline Iron Mineral ได้แก่ โลโมไนต์ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) เกอร์ไทท์ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และเฮมาไทต์ (Fe_2O_3)

จากการศึกษาพบว่า การแข็งตัวในดินลูกรังเกิดขึ้น เนื่องจากออกไซด์อิสระของเหล็กทั้งสามชนิด ได้แก่ โลโมไนต์ (Limonite) เกอร์ไทท์ (Geothite) และเฮมาไทท์ (Hematite) เคลือบบนอนุภาคดิน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเฮมาไทท์ กระบวนการ Laterization จะทำให้ออกไซด์อิสระของเหล็กในรูปของเฮมาไทท์ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคดินมีความหนาเพิ่มขึ้น

Secondary Mineral ในดินลูกรัง

Secondary Minerals ในดินลูกรัง ได้แก่ แร่ดินเหนียว คาโอลิไนท์ (Kaolinite), ฮาลลอยไซต์ (Halloysite), อิลไลต์ (Illite), มอนท์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) และอื่นๆ การเกิด Secondary Mineral ในดินลูกรังขึ้นกับอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิประเทศ พืชที่ปกคลุมและสภาพการระบายน้ำ ชนิดของ Secondary Minerals ในดินลูกรังมีประโยชน์มากในทางวิศวกรรมปฐพี เพราะสามารถคาดการณ์ถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังได้ เช่น ดินลูกรังที่มีมอนท์โมริล

โลไนท์ และ อิลไลท์สูงจะมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำ ความดันน้ำในโพรงสูง และบวมตัวได้ง่ายกว่าดินลูกรังที่มีคาโอลิไนท์และคลอไรต์เป็นส่วนประกอบเป็นดิน

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินลูกรัง

ความเป็นกรด-ด่าง จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของลูกรังพบว่าความเป็นกรด-ด่าง ของดินลูกรังเปลี่ยนแปลงตามระดับความลึก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 4-8 โดยค่าดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ว่าดินลูกรังจะพบในบริเวณที่มีสภาวะเป็นกรด (pH ประมาณ 1-6)

การกระจายตัวของขนาดเม็ดดิน จากการศึกษาพบว่าดินลูกรังส่วนใหญ่มีการกระจายขนาดของเม็ดดินดี กล่าวคือมีขนาดคละกันดี (Well Grade Soil)

ความถ่วงจำเพาะของดิน จากการศึกษาพบว่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังมีค่าอยู่ระหว่าง 2.67-3.46 โดยจะมีค่าน้อยหรือมากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กออกไซด์ในดินลูกรัง กล่าวคือถ้ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์น้อยจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำและถ้ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์มากจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง

ปริมาณสารอินทรีย์ Newill (1959) กล่าวว่า ดินลูกรังที่มีเม็ดละเอียดปนจะมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าดินลูกรังที่มีเม็ดหยาบโดยทั่วไปแล้วดินลูกรังจะมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำโดยจะมีค่าน้อยกว่า 1.0 % ที่ชั้นผิวดิน

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต จากการศึกษาพบว่าดินลูกรังจะมีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพืชพันธุ์ โดยปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตจะลดลงเมื่อเกิดกระบวนการ Laterization และการชะล้าง (Leaching) มากขึ้น

ดัชนีพลาสติก จากการศึกษาพบว่าค่าพลาสติกซีดีของดินลูกรัง ขึ้นอยู่กับปริมาณของดินเหนียว ดังนั้น จึงมีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับกระบวนการชะล้างและกระบวนการ Laterization กล่าวคือถ้ามีการชะล้างและเกิดกระบวนการ Laterization สูง ปริมาณของดินเหนียวจะยังผลให้ค่าพลาสติกซีดีลดลง เนื่องจาก แร่ดินเหนียวถูกเคลือบด้วยเฮสควิวออกไซด์ ทำให้ Surface Activity ของแร่ดินเหนียวถูกขจัด

ค่ากำลังรับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังขึ้นกับอิทธิพลขององค์ประกอบทาง Genetic ชนิดของหินเดิมและองค์ประกอบที่เกิดกระบวนการผุพัง ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบที่เกิดกระบวนการ Decomposition, Laterization และ Dessiccation นอกจากนั้นแล้วการทดลองต่างชนิดกันทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่างกันโดย Lambe (1958) ได้ศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบที่เกิดกระบวนการผุพัง (Decomposition) ที่มีต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน พบว่าดินลูกรังที่มีความลึกต่างๆ ให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่างกันและจากการศึกษาของ Baldovin (1969) พบว่า ดินลูกรังที่มีองค์ประกอบที่เกิดกระบวนการ Laterization สูงจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูง

ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังขึ้นกับชนิดของหินดั้งเดิม ลักษณะตามธรรมชาติของดิน, ขนาดของเม็ดดิน, อัตราส่วนโพรงช่องว่างและวิธีการเตรียมตัวอย่าง ความชื้นและความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างซึ่งเหล่านี้จะส่งผลอย่างมากต่อค่าความชื้นผ่านของตัวอย่างดินลูกรัง

ดินลูกรังในประเทศไทย

ดินลูกรังเป็นวัสดุธรรมชาติเกิดจากการผุพังของหินในสภาพภูมิอากาศร้อนหรือร้อนชื้น มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ซึ่งคนในภูมิภาคเอเชียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลานาน สำหรับในประเทศไทยนั้นมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเกิดดินลูกรังกล่าวคือ มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นมีฤดูร้อนและฤดูฝนสลับกันเป็นระยะเวลาค่อนข้างยาวนาน สภาพภูมิอากาศดังกล่าวเหมาะแก่การเกิดดินลูกรัง โดยจะพบดินลูกรังมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคเหนือ อันเนื่องมาจากการที่หินต้นกำเนิดเดิมส่วนใหญ่เป็นหินทราย หินบะซอลต์ และหินดินดาน บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทยได้แสดงไว้ในภาพที่ 1

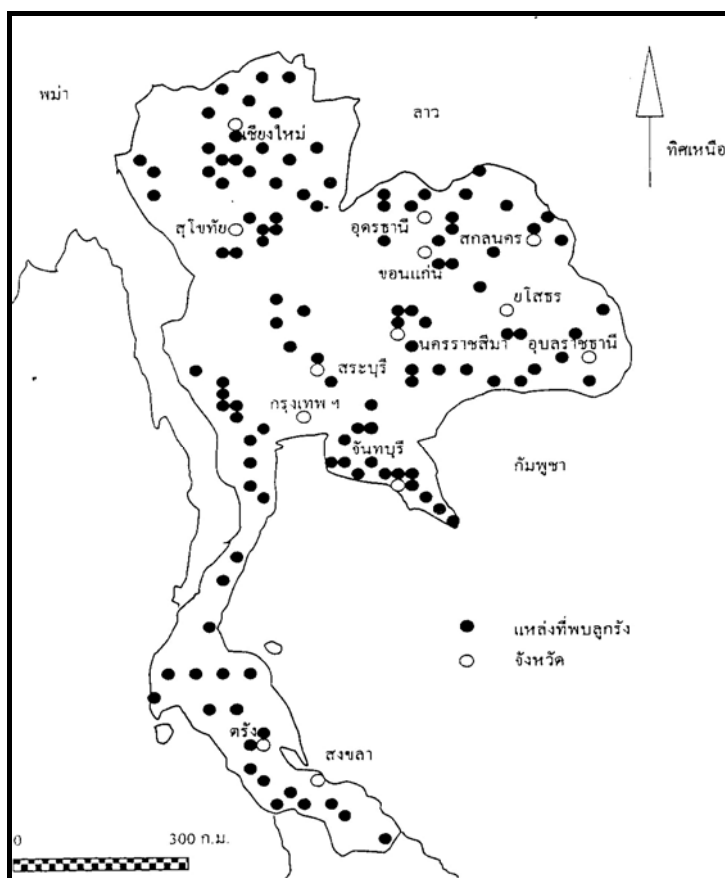
Hongsnoi (1969) พบว่า ในประเทศไทยนั้นสามารถแบ่งลูกรังออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเกิดดังนี้

Primary Lateritic Soils หมายถึง ดินลูกรังซึ่งมีเหล็กเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ และเกิดอยู่กับที่เหนือหินเดิม เหล็กที่เป็นส่วนประกอบได้จากแร่พวกเฟอร์โรแมกนีเซียมที่มีอยู่ในหินชั้นล่างๆ ลึกลงไป และเคลื่อนขึ้นมาสะสมมากขึ้นในชั้นดิน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินในแต่ละฤดู น้ำฝนซึ่งมีออกซิเจนและกรดอินทรีย์ต่างๆ ละลายอยู่จะออกซิไดซ์ธาตุพวกเฟอร์โรแมกนีเซียมในดินเป็นเหล็กออกไซด์ ซึ่งมีสีแดง การเกิดดินลูกรังประเภทนี้ในประเทศไทย

มักเกิดเป็นชั้นๆ จากผิวดินจนถึงชั้นของหินเดิม จากการศึกษาพบว่า ชีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์ก จะมีค่าต่ำสุดที่ชั้นดินลูกรังและเพิ่มมากขึ้นตามความลึกจนถึงชั้นหินเดิมที่ผุพัง โดยปกติส่วนในสุดของเม็ดดินลูกรังเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ที่อ่อน ผิวนอกเป็นเหล็กออกไซด์ที่แข็งแกร่งกว่าความหนาของเหล็กออกไซด์จะมากหรือน้อยขึ้นกับสภาพแวดล้อม

Secondary Lateritic Soils หมายถึง ดินลูกรังที่เกิดขึ้นโดยการเคลื่อนย้ายมาจากหินเดิม น้ำใต้ดินที่ไหลผ่านจะทำให้เหล็กออกไซด์ที่อยู่ในดินแข็งตัวขึ้นและออกไซด์เหล็กในบริเวณนั้นด้วย ดินลูกรังประเภทนี้โดยทั่วไปจะไม่แบ่งเป็นชั้น เหล็กออกไซด์สีแดงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณต่างๆ กัน ขึ้นกับสภาพแวดล้อมต่างๆ และสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของชั้นดินที่ทับถม เหล็กออกไซด์ในดินลูกรังประเภทนี้อยู่กระจายมากกว่าดินลูกรังประเภทแรก มักเกิดล้อมรอบกรวดหรือชิ้นส่วนของหินที่แตกหัก ทำให้ดินลูกรังประเภทนี้มีขนาดเม็ดใหญ่ มีความแข็งที่แตกต่างกันปรากฏชั้นของเฮมาไทต์, โลโมไนต์ และดินเหนียวเด่นชัดกว่าดินลูกรังประเภทแรก นอกจากนี้จะเกิดขึ้นระหว่างดินลูกรังกับหินเดิมค่อนข้างชัดเจน ชีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์กของดินลูกรังประเภทนี้มีค่าต่ำกว่าประเภทแรก

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



ภาพที่ 1 บริเวณที่พบดินลูกรังในประเทศไทย

ที่มา: สุภาพร (2528)

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 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 2/3 ของเปอร์เซ็นต์ของมวลที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40

3. มีขนาดละเอียดตามวิธีการหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง 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	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง			
	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. มีขนาดละเอียดตามวิธีการหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง 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 มีเหล็กออกไซด์ปนอยู่ในปริมาณสูงไม่ค่อยพบลูกรังที่เกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ความแข็งแรงของดินลูกรังอาจเพิ่มขึ้นหลังจากขุดขึ้นมาตากไว้เพราะดินลูกรังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศ การที่ดินลูกรังเปียกและแห้งสลับกันจะช่วยให้ออกซิเจนแทรกซึมเข้าไปในเม็ดดินลูกรังและเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องอันทำให้เม็ดดินลูกรังแข็งแรงขึ้นทั้งนี้ยังได้เสนอข้อกำหนดของวัสดุสำหรับพื้นทางและรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (2509) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีคุณภาพสูงไม่มาก เช่น ดินลูกรังไว้ดังนี้คือ พื้นทาง มีข้อกำหนดขนาดคละและคุณสมบัติของวัสดุพื้นทาง สำหรับวัสดุพื้นทางในประเทศไทยซึ่งปรับปรุงโดย Vallerga and Rananand (1969) แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การแจกแจงขนาดอนุภาคสำหรับวัสดุพื้นทางในประเทศไทย

ขนาดช่องตะแกรง	พื้นทางชั้นที่ 1		พื้นทางชั้นที่ 2	
	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง (%)		น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง (%)	
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) ซึ่งจัดเป็นวัสดุที่มีคุณภาพดีสำหรับใช้เป็นชั้นรองพื้นทางของถนน และจัดเป็นประเภท GW, GP และ SW, SP ตามระบบการจำแนกดินแบบ Unified Soil Classification

โดยส่วนประกอบของดินส่วนใหญ่จะประกอบด้วย คาโอไลน์ปริมาณมาก 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 เพราะเมื่อดินลูกรังจะไม่แตกเป็นเม็ดละเอียดเมื่อน้ำหรือความชื้นในอากาศ แห้งดินลูกรังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มักพบชั้นดินลูกรังหนาประมาณ 1.4-2.0 เมตร ค่า Liquid Limit และ Plasticity Limit ของดินลูกรังส่วนมากจะสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวง และถ้านำดินลูกรังผสมกับซีเมนต์จะมีคุณสมบัติใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางได้เป็นอย่างดี

การปรับปรุงคุณภาพดิน

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

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธีการทางเคมี (Chemical Stabilization)

เป็นการใช้สารเคมีผสมลงในดินเพื่อให้มีคุณภาพดีขึ้น โดย Mitchell (1982) กล่าวว่าวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพของดิน อาจสรุปได้ดังนี้ เพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดการบวมตัวหรือการหดตัว เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก หรือพฤติกรรมของความเค้นความเครียด (Stress-Strain) ของดิน ปรับปรุงการไหลซึมผ่านของน้ำในมวลดิน และเพื่อเพิ่มความทนทานของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

สารผสมเพิ่มหรือสารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน คือ ซีเมนต์ ปูนขาว ยิปซัม หรือเถ้าลอย เป็นต้น โดยสารเพิ่มเสถียรภาพเหล่านี้จะทำให้ดินมีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และสามารถนำไปใช้งานในการก่อสร้างต่าง ๆ ได้ โดยความเหมาะสมของการเลือกใช้

จำเป็นต้องคำนึงถึงผลประโยชน์ในการทำงาน การจัดเก็บรักษาและต้องมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการปรับปรุงเสถียรภาพอีกด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยวิธีทางเคมี

1. คุณสมบัติของดิน (Soil Properties) ดินตามธรรมชาติจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัว ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีทางปฐพีกลศาสตร์ อาจกล่าวสรุปได้ว่า การกระจายขนาดของเม็ดดิน (Particle Size Distribution) สารอินทรีย์ สารประกอบอื่นๆ เช่น แกลีซิลเฟต 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 ดีน้อยกว่าดินที่มีส่วนคละที่ดี (Well Grade)

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

Laguros *et al.* (1956) อธิบายว่า หากใช้ปริมาณปูนขาวไม่เกิน 3% ผสมกับดิน เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน 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 ปริมาณความชื้นในดินที่น้อยเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไป น้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา จะยังคงเหลือกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของดินที่แข็งตัวแล้วและเป็นตัวทำให้พื้นผิวลื่นเมื่อมีแรงกระทำเป็นผลทำให้ได้ค่ากำลังของดินต่ำกว่าความเป็นจริง

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 จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดิน

เหนียว ซึ่งจะทำให้วงน้ำ Double Layer หดตัวแคบเข้า อนุภาคดินเหนียวจะเกิดการดึงดูดกันเป็น โครงสร้างแบบกระเถาะ 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 ทำให้เกิด สารประกอบใหม่ขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานจัดเป็นส่วนประกอบ ที่สำคัญอันหนึ่งที่ทำให้กำลังของดินเพิ่มมากขึ้น

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

คุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลง

1. คุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity Index) สารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเติมลงไปดินจะ ทำให้ความเหนียวของดินเปลี่ยนแปลง โดย Plasticity Index จะลดลง Plastic Limit จะเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพ สำหรับ Liquid Limit อาจเพิ่มหรือลดลงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของดิน ที่ใช้ผสม โดยดินเหนียวที่มีค่า Plasticity สูง ค่า Liquid Limit จะลดลง ส่วนดินเหนียวที่มีค่า Plasticity ต่ำค่า Liquid Limit จะเพิ่มขึ้น

2. คุณสมบัติทางด้านการบดอัด (Compaction) เมื่อผสมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปในดินจะ ทำให้คุณสมบัติของดินทางด้านการบดอัดเปลี่ยนแปลงไป โดยจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ลดลง และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของดินเดิมที่ใช้

3. คุณสมบัติทางด้านกำลัง (Compressive Strength) กำลังของส่วนผสมขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้ ความหนาแน่นของการบดอัด ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิในการบ่ม และ ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

การนำเอาแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังควบคู่ไปกับการบดอัดดินนั้นยังมิได้มีการศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศมากนัก ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานตลอดจนถึงการนำไปใช้งานอย่างจริงจังต่อไปในอนาคต

ขั้นตอนการเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) มีสูตรเคมี CaCO_3 ส่วนประกอบทางเคมีประกอบด้วย CaO ร้อยละ 56 และ CO_2 ร้อยละ 44 โดยประมาณ มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ประมาณ 2.72 มีความแข็งระดับ 3 สลายตัวเมื่อเผาโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 825 องศาเซลเซียส ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผงสีขาวและมีความสว่างสูงไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายได้เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตละลายอยู่เรียกว่าน้ำกระด้างและจะตกตะกอนเมื่อเสีย (CO_2) แร่ที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเรียกว่า แร่แคลไซต์ (Calcite) หรือ แคลสปาร์ (Cal spar) ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบในธรรมชาติมากที่สุด ผลึกของแคลไซต์ มีหลายชนิด เช่น ค็อกทูธสปาร์ (Dogtooth spar) ไอซ์แลนด์สปาร์ (Iceland Spar) เนลเฮดสปาร์ (Nailhead Spar) และซาตินสปาร์ (Satin Spar) เป็นต้น

การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตมี 2 วิธี คือ การนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบด ซึ่งเรียกว่า Ground Calcium Carbonate (GCC) และการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาตกผลึกใหม่ เรียกว่า Precipitated Calcium Carbonate (PCC) โดยทั่วไปแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมักจะมาจากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตตามธรรมชาติ (GCC) กล่าวคือ ในขั้นตอนแรกจะดำเนินการนำตัวอย่างแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการทำเหมืองแร่โดยการระเบิดหรือการขุดตักจากเหมืองขนส่งโดยรถมาถึงโรงงานจากนั้นจะมีการดำเนินการลดขนาดเม็ดให้เล็กลง (Size Reduction) เพื่อให้สามารถที่จะทำงานได้ง่ายจากนั้นจะดำเนินการคัดขนาด (Classification) และดำเนินการบดเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยแต่ละขั้นตอนจะมีแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอยู่ประมาณ 10% ของกำลังการผลิต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และความสะอาดของแร่ที่นำมาผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต โดยแคลเซียมที่เหลือทิ้งนี้จะถูกนำไปจัดเก็บเพื่อรอการนำไปกำจัดต่อไป

คุณลักษณะโดยทั่วไปของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง คือ กากหรือของเหลือทิ้งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบลักษณะ เม็ดค่อนข้างสม่ำเสมอ มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมีผลึก มีสีขาวหรือขาวขุ่น คล้ายเกลือ แสดงไว้ดังภาพที่ 2-3 เหตุที่แคลเซียมคาร์บอเนตมีสีขาวขุ่นอาจเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ เช่น หิน กรวด ทราย หรือดิน เป็นต้น แคลเซียมคาร์บอเนตมีคุณสมบัติเป็นสาร ปอชโซลานตามธรรมชาติ เนื่องจากประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ในขบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ จะมีแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้งอยู่ 10-20% โดยประมาณ โดยที่แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง เมื่ออยู่ในสภาพ แห้งจะเป็นผงร่วนไม่มีคุณสมบัติของการเชื่อมเกาะกันระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสน้ำในปริมาณที่ เหมาะสมและอายุการบ่มมากขึ้นจะแข็งตัวได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่แข็งตัวได้นั้นเนื่องจาก แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีปริมาณปูนขาวอิสระ (CaO) ปนอยู่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำจน กลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานต่อไปกับซิลิกาและอลูมินา จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสานที่แข็งตัวได้ เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนต ไฮเดรต



ภาพที่ 2 ลักษณะและรูปร่างของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 3 แคลเซียมคาร์บอเนตที่เหลือทิ้งจากขบวนการผลิต

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นรูปแบบหนึ่งของปูนขาวโดยมีส่วนประกอบทางเคมีอันประกอบด้วย CaO ร้อยละ 56 และ CO_2 ร้อยละ 44 ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแคลเซียมออกไซด์ (Quick Lime) หรือ ปูนขาวไฮเดรต (Ca(OH)_2) เมื่อมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรง ทำให้เกิดการคายความร้อน และเกิดสารผลิตภัณฑ์ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น

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

1. Hydration ปูนขาวในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยากับน้ำในดินทันทีที่ถูกผสมก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และสร้างรูปร่างโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกันมาก บ้างน้อยมากตามขนาดผลของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกัน ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่ปรับปรุงแล้วยังแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างในมวลดิน ทำให้ลดการซึมน้ำ และการบวมตัวของมวลดินรวมทั้งเพิ่มความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นรอบ ๆ อีกด้วย การทำปฏิกิริยาเช่นนี้จะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุง

คุณภาพดินที่มีความชื้นสูง ในการผสมจะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งความร้อนที่แผ่ออกไปจะมีผลต่อการทรุดตัวของดินอีกด้วย

2. Flocculation หรือขบวนการจับตัวกันของเม็ดดิน หลังจากเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงในดินจะทำให้อนุภาคขนาดเท่าดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวคือ อีออนบวกจากสารเพิ่มเสถียรภาพเมื่อเข้าไปในมวลดิน จะเข้าไปจับตัวบนผิวของอนุภาคขนาดเท่าดินเหนียว สารซิลิเกตจะละลายเข้าสู่โพรงน้ำก่อให้เกิดสารเชื่อมประสาน ส่งผลให้เม็ดดินมีโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อความเข้มข้นของอีออนสูงขึ้น จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของแร่ดินเหนียว ทำให้ Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง โครงสร้างของดินจะมีความมั่นคงขึ้น

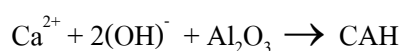
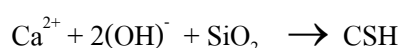
Diamond and Kinter (1965) กล่าวว่าเนื่องจากน้ำที่อยู่ในชั้น Double layer บางลงจึงทำให้เกิดการ Flocculation และเกิดการรวมตัวของเม็ดดิน (Agglomeration) ซึ่งมีผลทำให้ค่า Liquid Limit ลดลง Plastic Limit เพิ่มขึ้น และ Plasticity Index ลดลง ปฏิกริยา Flocculation และ Agglomeration นี้มีผลต่อค่า Plasticity Index,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

เนื่องจากการเกิดปฏิกริยาเช่นนี้ จะทำให้ความเหนียวของดินเหนียวลดลงซึ่งทำให้ดินร่วนขึ้น ดังนั้นปูนขาวจึงมีประโยชน์ที่จะนำมาใช้กับวัสดุที่มีความเป็นพลาสติกสูงๆ และดินที่มีปริมาณน้ำมาก ซึ่งยากต่อการใช้งานเพราะบดอัดได้ลำบาก ซึ่งเมื่อผสมปูนขาวจะทำให้บดอัดง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ปูนขาวในการลดค่าความเหนียวของดินอีกด้วย

3. Cementation (Pozzolan Reaction) หรือการเชื่อมประสาน ปฏิกริยาในช่วงนี้มักจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ใหม่สารซิลิกา (SiO_2) และ/หรืออลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งจะก่อให้เกิดคุณสมบัติเชื่อมประสานตัวซึ่งกันและกัน กล่าวคือในขบวนการของการเติมปูนขาวภายหลังการเติมลงดิน ค่าความเป็นด่างจะสูงขึ้นที่สภาวะ pH สูงเช่นนี้การชะละลายของ Silica และ Alumina ในดินเพิ่มมากขึ้น โดย Silicate ที่สลายตัวออกจากโครงสร้างของอนุภาคดินมาทำปฏิกริยากับ 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



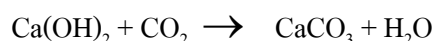
สาร CSH ที่เกิดขึ้นจากดินผสมปูนขาวเป็นสารชนิดเดียวกันกับสารที่เกิดในดินผสมซีเมนต์ แต่แตกต่างกันที่สาร CSH ในดินผสมปูนขาวเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic ระหว่าง Ca^{2+} กับซิลิกาในดิน ส่วนสาร CSH ในดินผสมซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยา Hydration ของซีเมนต์กับน้ำ

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

Ruenkairergsa (1982) กล่าวว่า การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับดินความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอาจจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เต็มที่ หากมีสารประกอบอื่นๆ อยู่ในมวลดินนั้นด้วย เช่น สารอินทรีย์และซัลเฟต จะทำให้ความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง โดยจะแบ่ง Ca^{2+} มาจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction ทำให้อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของดินผสมปูนขาวลดลง สารประกอบของเหล็ก เช่น Fe_2O_3 ที่เคลือบอยู่ในโครงสร้างของดินก็สามารถหน่วงการเกิดปฏิกิริยาให้ช้าลงได้เช่นกัน

ปฏิกิริยา Cementation เป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินเหนียวผสมปูนขาวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่จำกัดค่าหนึ่ง ถ้ามีการใช้ปูนขาวเพิ่มมากขึ้นกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน ปูนขาวที่เพิ่มขึ้นนี้จะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นและอาจทำให้กำลังลดลงด้วย

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

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยการใช้สารผสมเพิ่มต่างๆ

ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีนักวิจัยและหน่วยงานต่างๆ ได้มีการนำสารเพิ่มเสถียรภาพและวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ มาใช้ปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง โดยอาจกล่าวพอเป็นสังเขป ดังนี้

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์

Winterkorn and Chandrasekharan (1951) ศึกษาดินลูกรังหลายประเทศทั่วโลกโดยนำมาปรับปรุงด้วยการผสมซีเมนต์พบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมที่จะให้กำลังสูงสุดสำหรับดินลูกรังบางประเภทใช้ซีเมนต์สูงถึงประมาณ 14% นอกจากนี้ยังได้รายงานว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์จะให้ผลที่ดีหรือไม่ขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ผสมอยู่ในดินและ 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 คือปริมาณซีเมนต์ 5% นอกจากนี้ยังหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และ UCS ไว้ด้วย

Department of Highways and Siam Cement (1965) ทดลองสร้างถนนตัวอย่างโดยใช้ปูนซีเมนต์ ผสมดินลูกรังในจังหวัดอุบลราชธานี โดยออกแบบให้เป็นชั้นทางกึ่งยึดหยุ่น โดยกำหนดค่า UCS ต้องอยู่ระหว่าง 17.5 ถึง 56.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc.) ที่อยู่การบ่ม 7 วัน โดยอธิบายว่า ถ้ากำลังสูงกว่า 56.6 ksc. จะทำให้ชั้นดินสูญเสียความยึดหยุ่นและเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นวัสดุแข็งเกร็ง ซึ่งอาจก่อปัญหาการแตกร้าวที่ผิวหน้าขึ้นได้ และกำหนดค่า CBR ของดินซีเมนต์ ไม่น้อยกว่า 120 % จากการทดลองพบว่า ปริมาณซีเมนต์ 3% จะให้ค่า UCS ที่เหมาะสม และการผสมไม่ควรทำข้ามวันเพราะความชื้นในอากาศจะทำให้ดินซีเมนต์เสียคุณภาพไป

Ng (1966) ทดลองนำดินลูกรังจากหัวหิน จันทบุรี และขอนแก่นมาผึ่งแห้งอากาศแล้วนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมซีเมนต์ พบว่าซีเมนต์สามารถปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังได้เป็นอย่างดี ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4-5% กำลังอัดของดินซีเมนต์จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นในมวลดินและเพิ่มตามปริมาณซีเมนต์และเวลาการบ่ม กำลังจะลดลงมากเมื่อความหนาแน่นจากการบดอัดลดลง

Moh *et al.* (1967) ได้ทดลองดินลูกรังที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 เป็นจำนวน 6 แห่งในประเทศไทย ได้แก่ จันทบุรี หัวหิน ขอนแก่น เพชรบุรีและสระบุรี พบว่ามีค่า Plasticity Index ประมาณ 11 ถึง 19 เมื่อนำมาผสมซีเมนต์ 4-7% จะทำให้กำลังรับแรงอัดมากกว่า 17.5 ksc. ซึ่งเป็นข้อกำหนดของ British Road Research Laboratory ที่ได้ทำการทดลองในแอฟริกาแล้ว โดยค่า UCS สูงสุดจะเกิดขึ้นที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ OMC หรือมากกว่านั้น 2% ถ้าความหนาแน่นลดลง 5% จะทำให้กำลังอัดที่ 7 วัน และ 28 วัน ลดลง 25% และ 40% ตามลำดับ การบ่มที่อายุ 1 วันจะทำให้กำลังอัดประมาณ 60% ของกำลังอัดที่ 28 วัน และถ้าบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังและเพิ่มกำลังในระยะยาว นอกจากนี้ดินซีเมนต์ที่มีค่า UCS สูงกว่า 10.5 ksc. อายุการบ่ม 7 วัน จะมีความคงทนต่อภาวะเปียกสลับกับแห้ง

Woo (1971) ได้ทดลองดินลูกรังในประเทศไทยตั้งแต่ Sand Loam (A-2-4) ถึง clay (A-7-5) ซึ่งมีค่า Plasticity Index ในช่วง 9 ถึง 35 ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการผสมกับซีเมนต์ พบว่า UCS จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น และปริมาณซีเมนต์ที่ให้กำลังรับแรงอัดแบบมาตรฐาน 17.5 ksc. จะอยู่ในช่วง 3 และ 7% ของน้ำหนักดินผึ่งแห้ง โดยมีค่าเฉลี่ย 5% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งใกล้เคียงกับงานก่อสร้างถนนดินลูกรังผสมซีเมนต์ที่เคยสร้างในประเทศไทย

ทรงพล (2529) ทดลองนำดินลูกรังผสมซีเมนต์ มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ CBR และค่า Initial Tangent Modulus (E_i) กับ CBR โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ 1, 3, 5 และ 7% โดยใช้อายุการบ่มเป็นเวลา 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงควรมีค่า 3% ขึ้นไป เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับอนุภาคดินจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่าค่า Unsoaked CBR และการเพิ่มพลังงานในการบดอัดจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

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

ธีระชาติ และ ทรงพล (2534) ทดลองนำดินลูกรังประเภท A-2-7 ในจังหวัดสกลนคร ซึ่งมีค่าความเหนียวสูงผสมกับซีเมนต์ 1, 3, 5 และ 7% ที่อายุการบ่มต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า UCS กับ Unsoaked CBR พบว่า มีความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ทั้งตัวอย่างที่บดอัดแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทำให้สามารถทำนายค่า Unsoaked CBR จากค่า UCS ได้ ยกเว้นแต่ปริมาณซีเมนต์ 1% ซึ่งมีค่าต่ำ ในการวิเคราะห์และกำหนดค่าความสัมพันธ์อัตราการเพิ่มของ UCS และ CBR ทุกอายุการบ่มจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนที่เท่าๆ กัน เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น และค่า OMC ของดินลูกรังกับดินลูกรังผสมซีเมนต์มีค่าต่างกันไม่ถึง 1%

ศุภกิจ และ อติมนต์ (2544) ได้ทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินลูกรังประเภท Silty Sand หรือ A-2-4 จากจังหวัดสระบุรีผสมกับซีเมนต์ 4 ถึง 7% บดอัดด้วยพลังงานสูงกว่ามาตรฐานในช่วงปริมาณความชื้นเท่ากับ $OMC \pm 2\%$ พบว่า ดินลูกรังจะมีกำลังสูงขึ้นมากเมื่อผสมซีเมนต์ โดยกำลังจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ในลักษณะที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และการพิบัติจะเกิดขึ้นค่าความเค้นต่ำกว่าดินลูกรังที่ไม่ผสมซีเมนต์ โดยการบดอัดในด้านแห้งจะให้กำลังสูงสุดสำหรับตัวอย่างที่ทดสอบโดยไม่แช่น้ำ แต่เมื่อดินซีเมนต์อยู่ในสภาพเปียกเป็นเวลานานพอสมควรกำลังจะ

ลดลงมาก ซึ่งการบดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะช่วยให้ดินซีเมนต์มีค่ากำลังที่ดีและกำลังไม่ลดลงมากนัก

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้ปูนขาว

Woo (1971) ได้ศึกษาวิจัยการใช้ปูนขาวผสมดินลูกรังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณปูนขาวมากขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง ค่าปริมาณความชื้นจะมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Wet Compressive Strength กับปริมาณปูนขาว จะมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งพาราโบลาต่ำกว่า ปริมาณปูนขาว ชนิด Hydrated Lime 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 ซีเมนต์สามารถปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติสูงขึ้นอย่างชัดเจนกว่า Quicklime และ Quicklime จะมีขีดจำกัดในการปรับปรุงคุณภาพของดินอยู่

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าลอย

อนิรุทธิ์ และ สุเทพ (2530) ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังในกลุ่ม GC, GP – GM และดินทรายปนดินเหนียวด้วยเถ้าลอยแม่เมาะพบว่า การผสมเถ้าลอยในตัวอย่างดินเม็ดละเอียด จะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดลดลง ส่วนในดินเม็ดหยาบนั่นจะทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดลดลง ส่วนกำลังอัดของดินผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด โดยอัตราส่วนผสมสูงสุดจะอยู่ในช่วงระหว่าง 15-25 % เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของดินผสมเถ้าลอยกับดินผสมซีเมนต์ และปูนขาว พบว่า กำลังอัดของดินผสมเถ้าลอยจะมีค่าต่ำกว่าดินที่ผสมปูนซีเมนต์ แต่สูงกว่าดินที่ผสมปูนขาว

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

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

พิทักษ์พงษ์ และ สุรศักดิ์ (2544) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง โดยใช้ดินลูกรังจากจังหวัดสุพรรณบุรีมาผสมกับเถ้าลอยในอัตราส่วน 2, 4, 6, 8 และ 10% โดยน้ำหนักของดินแห้ง ผลการศึกษาการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าลดลงตามลำดับ ด้านกำลังของดินพบว่า ค่า CBR และค่า UCS ของดินลูกรังผสมเถ้าลอยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มและปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการบวมตัวลดลงประมาณ 10% เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

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

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา

Forteza *et al.* (2004) ได้ศึกษาการนำเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินมาใช้ผสมลงในดินเพื่อใช้เป็นชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในการก่อสร้างถนนในประเทศสเปน พบว่า ค่า CBR มีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเดิม และ Chandler *et al.* (1997) ได้ทำการทดสอบหาค่า CBR พบว่าดินที่ผสมเถ้าก้นเตา ให้ค่า CBR ที่สูงขึ้น แต่ว่ามีข้อมูลที่สนับสนุนผลการวิจัยน้อยเกินไป

Kim and Prezzi (2006) ศึกษาหาอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา โดยดำเนินการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นโดยมีปริมาณมากกว่าเถ้าก้นเตา จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดต่ำลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น

ธาดา และ เสวต (2548) ศึกษาการนำฝุ่นตะกอนเหล็กที่เป็นเศษเหลือจากการถลุงเหล็กมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง โดยใช้ดินลูกรังจากจังหวัดชลบุรี ผสมฝุ่นตะกอนเหล็กอัตราส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50 % ของน้ำหนักดิน พบว่าเมื่อนำฝุ่นตะกอนเหล็ก ผสมลงไปในตัวอย่ดิน ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรืออาจพออนุมานได้ว่าไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับการทดสอบ UCS พบว่าค่า กำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินลูกรังผสมฝุ่นตะกอนเหล็กจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนผสมต่างๆ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนัก โดยจะมีค่า S_u มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 36.751 ตันต่อตารางเมตร ค่า CBR ของดินลูกรังผสมฝุ่นตะกอนเหล็ก จะมีค่า CBR เพิ่มขึ้นโดยจะมีค่า CBR มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 50% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ผู้วิจัยยังได้สรุปอีกว่า เนื่องจากฝุ่นตะกอนมีความแข็งกว่าเม็ดดินลูกรังจึงทำให้รับแรงหรือน้ำหนักบรรทุกได้ดีกว่าดินลูกรังไม่ผสมฝุ่นตะกอนเหล็ก

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่น

ขวัญชัย และคณะ (2542) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหิน กับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เพื่อนำไปใช้ในการทำถนนดินลูกรังหรือใช้ทำชั้นรองพื้นทาง โดยนำดินลูกรังมาผสมเถ้าถ่านหินกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ผ่านการผึ่งแห้งในอากาศแล้วในอัตราส่วน 70 : 30 (เถ้าถ่านหิน : กากแคลเซียมคาร์ไบด์) แล้วทดสอบ Modified Compaction Test แล้วทำการผสมดินลูกรังกับวัสดุผสม (เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์) ในอัตราส่วนผสม ดินลูกรัง : วัสดุผสม (เถ้าถ่านหินและ กากแคลเซียมคาร์ไบด์) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับน้ำหนักของดินลูกรังที่ใช้ ดังนี้ คือ 100 : 0, 80 : 20, 75 : 25, 70 : 30, 65 : 35 และ 60 : 40 ทำการทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบหาค่า UCS พบว่าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้น และจะให้ค่าสูงสุด เมื่อทำการผสมที่อัตราส่วน 65 : 35 มีค่า UCS ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 3.59 ksc. และ 3.33 ksc. ส่วนค่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 505.63 % และ Soaked CBR มีค่าเท่ากับ 584.21 % ซึ่งแสดงว่าการผสมเถ้าถ่านหิน และการแคลเซียมคาร์ไบด์ กับดินลูกรัง สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของ ดินลูกรังได้

มนตรี และคณะ (2543) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหินบิโหมินัส ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้ามาบตาพุด จ.ระยอง และลูกรังจากจังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดระยองโดยผสมในอัตราส่วนผสม ดินลูกรัง : เถ้าถ่านหินบิโหมินัส 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 จากการศึกษพบว่า ดินลูกรังที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโหมินัสจะมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสูงกว่าดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน การทดสอบกำลังอัดพบว่าก่อนทดสอบที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโหมินัสในอัตรา 30% ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน ของดินลูกรังจากจังหวัดนครราชสีมา และจากจังหวัดระยอง ได้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 60.60 ksc. และ 62.36 ksc. ตามลำดับ ค่ากำลังอัดก่อนทดสอบจะมีค่าต่ำลงเมื่อผสมเถ้าถ่านหินบิโหมินัสมากขึ้น ส่วนก่อนทดสอบที่ผสมเถ้าถ่านหินบิโหมินัสที่ต่ำกว่า 30% จะให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่จะสูงมากที่สุดที่อัตรา 30%

กรวิศว์ และคณะ (2546) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลท์คอนกรีตเก่าผสมลูกรัง โดยได้นำเอาแอสฟัลท์คอนกรีตเก่าจากถนนสาย วังน้อย-อยุธยา มาผสมกับลูกรังในอัตราส่วน 15, 30, 45, 60, 75 และ 90% โดยน้ำหนักของดินแห้ง และทำการทดสอบUnconfined

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

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต

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

Okagbue and Yakubu (2000) ได้ดำเนินการศึกษาการใช้ หินปูนเหลือทิ้งจากขบวนการผลิตปูนซีเมนต์แทนที่การใช้ปูนขาวเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังแบบ GW-GC พบว่าเมื่อผสมสารลงในดินจะทำให้ Liquid Limit, Plastic Limit เพิ่มขึ้นส่วนค่า Plasticity Index ลดลง ค่า Shrinkage Limit ลดลงตามปริมาณของสารที่ใช้ จากการทดสอบการบดอัดดินพบว่าค่า MDD จะลดลงส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดจะสูงขึ้นในส่วนของคุณค่ากำลังของดิน (CBR) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละที่ปริมาณสารผสมเพิ่ม 6 % โดยจะให้ค่า CBR สูงที่สุดโดยมีค่า CBR แบบ Unsoaked เท่ากับ 90 % และแบบ Soaked เท่ากับ 70 % ในส่วนของการทดสอบ Unconsolidation Undrain Triaxial test พบว่าเมื่อปริมาณหินปูนเหลือทิ้งเพิ่มขึ้นค่า Cohesion จะเพิ่มขึ้น ส่วนค่า Angle of Shearing resistance จะมีค่าลดลงตามปริมาณสารที่เพิ่มขึ้น

อุปกรณ์ และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์ทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity, ASTM D 854-00)
2. ชุดอุปกรณ์ทดสอบแอตเตอร์เบอร์กิลิมิต (Atterberg's Limits , ASTM D4318-00)
3. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการร่อนด้วยตะแกรง (Sieve Analysis, ASTM D 422-63)
4. ชุดเครื่องมือทดสอบการบดอัดดิน (Modified Proctor Compaction , ASTM D1557-00)
5. ชุดเครื่องมือทดสอบค่าความสึกหรอของเม็ดดิน โดยเครื่อง Los Angeles Abrasion (ASTM D 131-96)
6. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังรับน้ำหนัก (California Bearing Ratio, ASTM D188-67)
7. ชุดเครื่องมือทดสอบแรงอัดแบบแกนเดี่ยว (Unconfined Compression Test, ASTM D 2166)
8. ชุดเครื่องมือทดสอบสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ (Permeability Test, ASTM D2434-68)

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ดินลูกรัง เก็บมาจากแหล่งดินบริเวณ ตำบลเขาชะจู้ม อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี จำนวนตัวอย่างที่เก็บจำนวน 6 จุด ที่ระดับความลึก 0.10 – 0.50 เมตร จากผิวดินโดยบริเวณที่เก็บ ตัวอย่างดินลูกรังแสดงไว้ดังภาพที่ 4
2. แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงานที่ใช้ในการศึกษาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงานแคลเซียมโปรดักส์ จังหวัดลพบุรี โดยได้ปรับปรุงความละเอียดโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แบบแห้ง
3. น้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำประปาโดยมีการผ่านระบบการกรองมาแล้วและจะต้องไม่มีความขุ่นหรือตะกอนปน

วิธีการ

ขั้นตอนการวิจัย

1. ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างจากแหล่งดิน และทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินในเบื้องต้น ได้แก่
 - 1.1 Natural Water Content Test (ASTM D 2216 -92)
 - 1.2 ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (ASTM D 854-98)
 - 1.3 Atterberg's Limit Test (ASTM D 2216-80, D 4318-98)
 - 1.4 การกระจายขนาดของเม็ดดินโดยวิธีร่อนแบบเปียก (ASTM D 422-63)
 - 1.5 จำแนกดินตามระบบ Unified Soil Classification (ASTM D 2487-69)
 - 1.6 ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของตัวอย่างดิน (ASTM D 131-96)
 - 1.7 ทดสอบการบดอัดดินแบบ Modification Proctor Compaction Test (ASTM D1557-91)
 - 1.8 ทดสอบกำลังรับแรงโดยวิธี California Bearing Ratio (ASTM D 1883-94)
 - 1.9 ทดสอบสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ (ASTM D 2434-68)

2. เก็บตัวอย่างแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงานแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยได้ปรับปรุงความละเอียดโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แบบแห้งและทดสอบคุณสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากโรงงานเบื้องต้น ได้แก่

- 2.1 การกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
- 2.2 ความถ่วงจำเพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
- 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต (ข้อมูลจากบริษัทแคลเซียมไฮดรอกไซด์)

3. นำดินตัวอย่างมาทำการคัดแยกสิ่งสกปรกอันได้แก่ เศษไม้ รากไม้ และอื่น ๆ ออกจากตัวอย่างจากนั้นเตรียมตัวอย่างแต่ละขนาด ด้วยการร่อนตะแกรงเบอร์ 3/4 ", 3/8 ", #10, #40, #200 นำตัวอย่างที่ค้างตะแกรงแต่ละเบอร์มาเก็บไว้เพื่อนำกลับมาผสมกันใหม่ให้ได้การกระจายขนาดของเม็ดดินตามที่ได้ออกแบบไว้

4. ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหลือทิ้งลงในดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งต่อดินลูกรัง 2, 4, 6, 8 และ 10 % ของน้ำหนักดินแห้ง

5. ทดสอบหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit พื้นที่หลังผสมและนำดินอีกส่วนหนึ่งผสมน้ำจนมีความชื้นที่เหมาะสม จากนั้นนำไปบ่มจนครบอายุที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน นำดินมาทดสอบหาค่า Liquid Limit และ Plastic Limit โดยเปรียบเทียบกับดินกลุ่มเดียวกัน

6. ดำเนินการบดอัดดินตัวอย่างในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Modified Proctor Compaction Test เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ของดินตัวอย่างทั้งแบบหล่อดินเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สำหรับการทดสอบ CBR และแบบหล่อดินเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สำหรับการทดสอบแรงอัดแบบแกนเดี่ยว UCS

7. ทดสอบกำลังรับแรงของดินโดยวิธี California Bearing Ratio แบบ Unsoaked CBR และ แบบ Soaked CBR ของตัวอย่างดินและดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยดำเนินการทดสอบภายหลังการบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน

8. ทดสอบ UCS โดยใช้แบบ (Mold) ทรงกระบอกกลวง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 2 นิ้ว สูง ประมาณ 4 นิ้ว และใช้ตัวอย่างดินลูกรังที่ในส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาทดสอบ และบดอัดส่วนผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งกับดินลูกรังให้มีพลังงานบดอัดเท่ากับพลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยทำการบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทดสอบภายหลังการบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

9. ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของตัวอย่างดินลูกรังและดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม โดยตัวอย่างดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งนี้จะทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำทันทีภายหลังการบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน

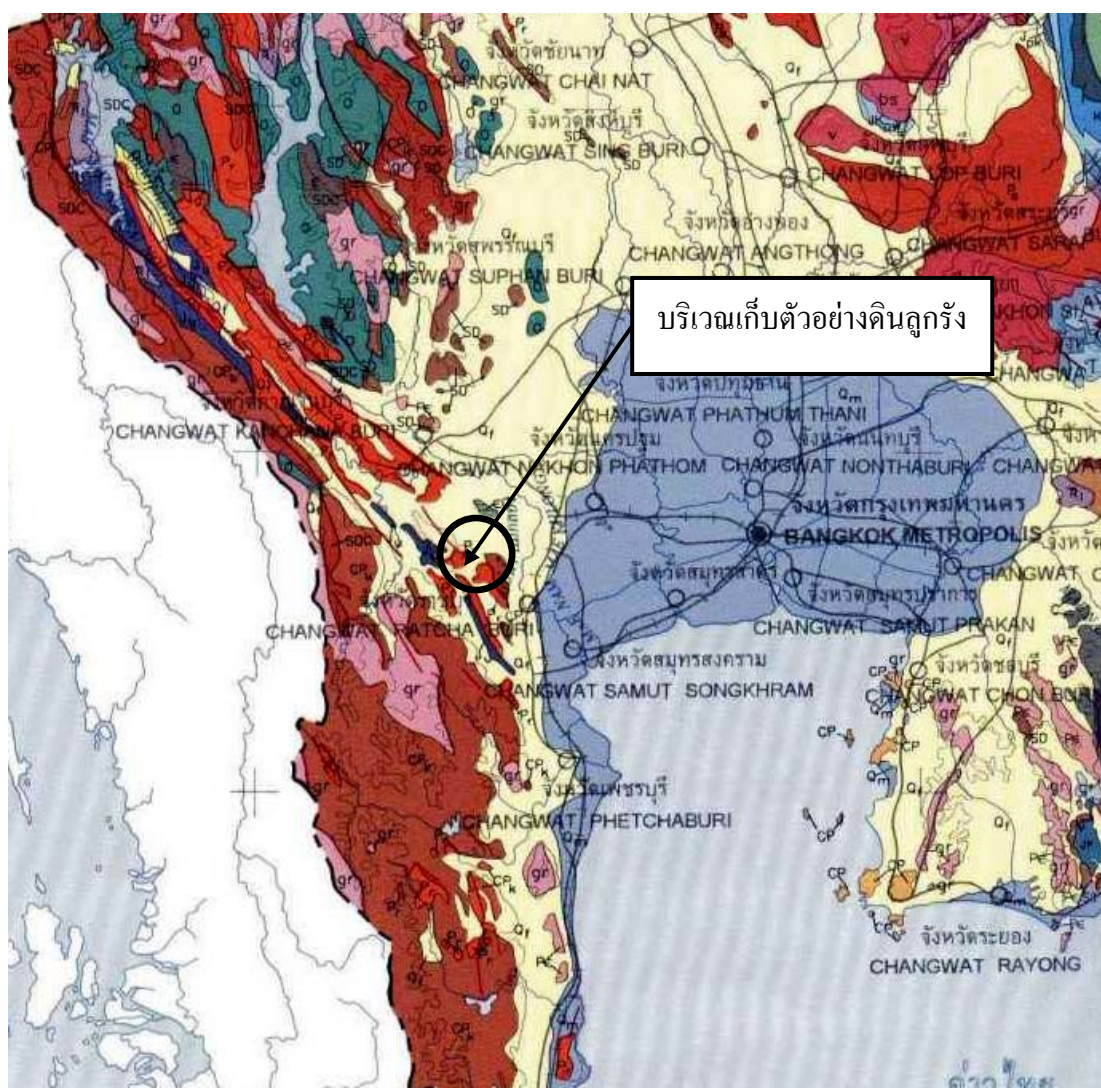
10. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดสอบ

สถานที่ดำเนินการวิจัย

ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร

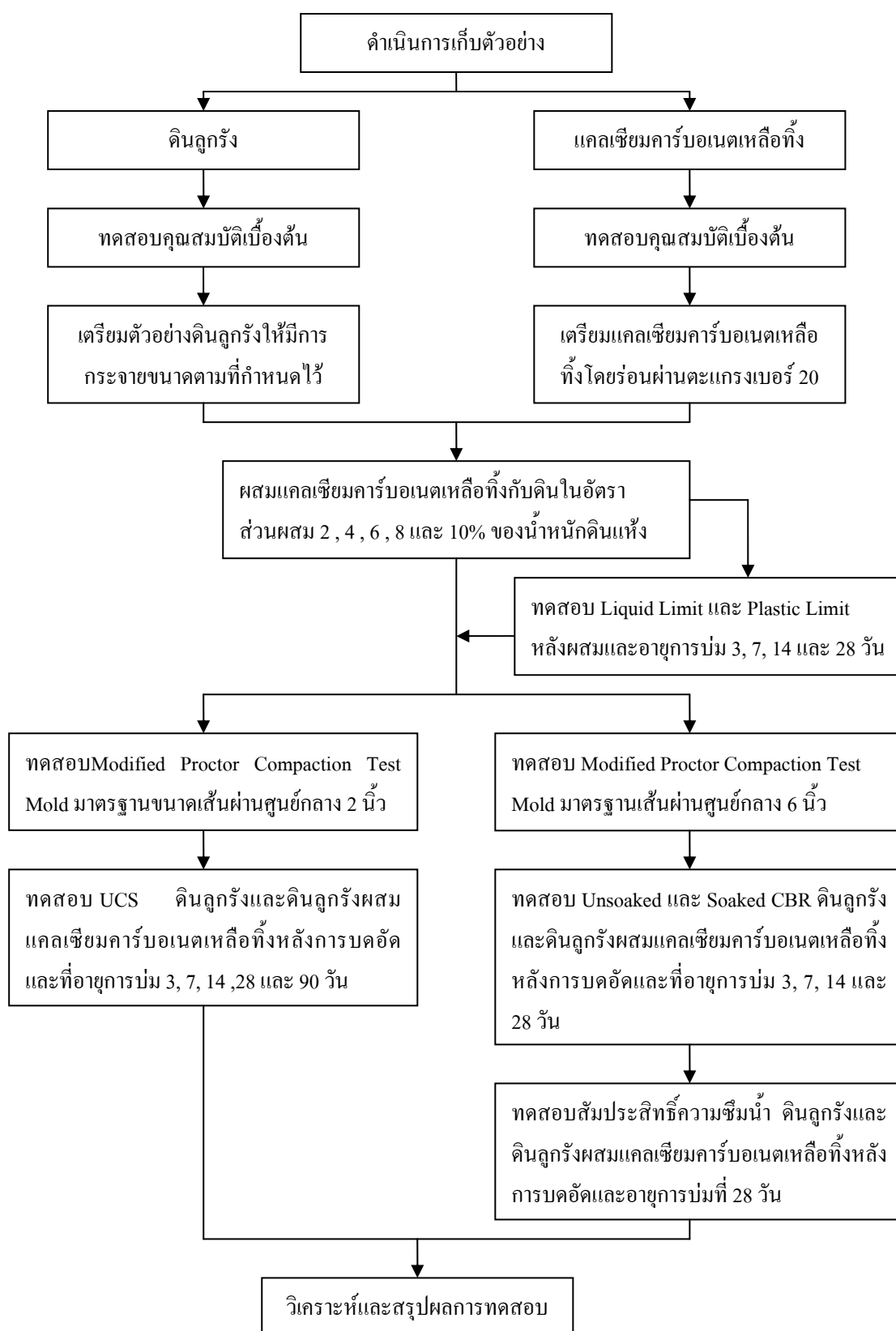
ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2549 ถึง กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 รวมระยะเวลาการดำเนินการวิจัยทั้งสิ้น 22 เดือน



ภาพที่ 4 บริเวณที่เก็บตัวอย่างดินลูกรัง

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณีวิทยา (2541)



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างดินลูกรัง

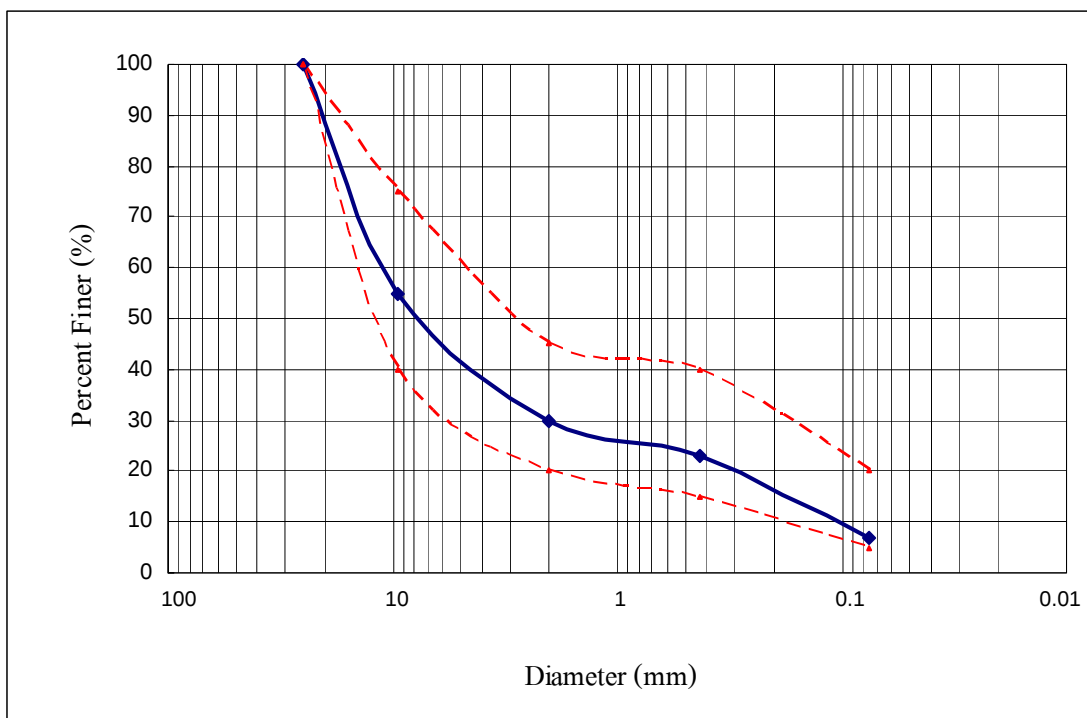
1. นำตัวอย่างดินที่ได้จากการสุ่มเก็บตัวอย่างมาทำการคัดแยกสิ่งสกปรกอื่นได้แก่ เศษไม้ รากไม้ และอื่นๆ ออกจากตัวอย่างจากนั้นเตรียมตัวอย่างแต่ละขนาด ด้วยการร่อนตะแกรงเบอร์ 3/4 ", 3/8 ", #10, #40, #200 นำตัวอย่างที่ค้างตะแกรงแต่ละเบอร์เก็บไว้เพื่อนำกลับมาผสมกันใหม่ให้ได้การกระจายตัวของเม็ดดินตามที่กำหนด

2. นำดินที่เตรียมไว้จากข้อที่ 1 มาเตรียมดินในเกรด B และ D ตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยมีการกระจายขนาดของเม็ดดินและการจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification System (USCS) ตามตารางที่ 6 และภาพที่ 6-8

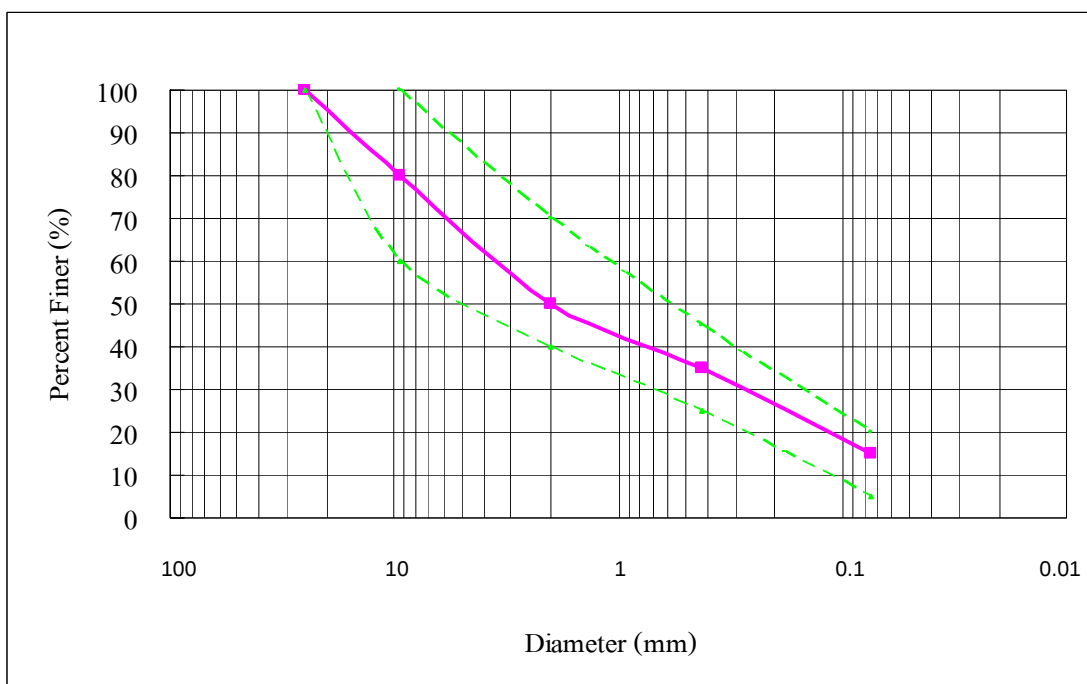
3. นำดินที่เตรียมไว้มาทำให้แห้งในอากาศเพื่อจำลองสภาพให้เหมือนการบดอัดในสนาม โดยนำดินขนาดต่างๆ มาผสมกันแสดงไว้ดังภาพที่ 9

ตารางที่ 6 การกระจายขนาดของเม็ดดินที่ใช้ทดสอบ

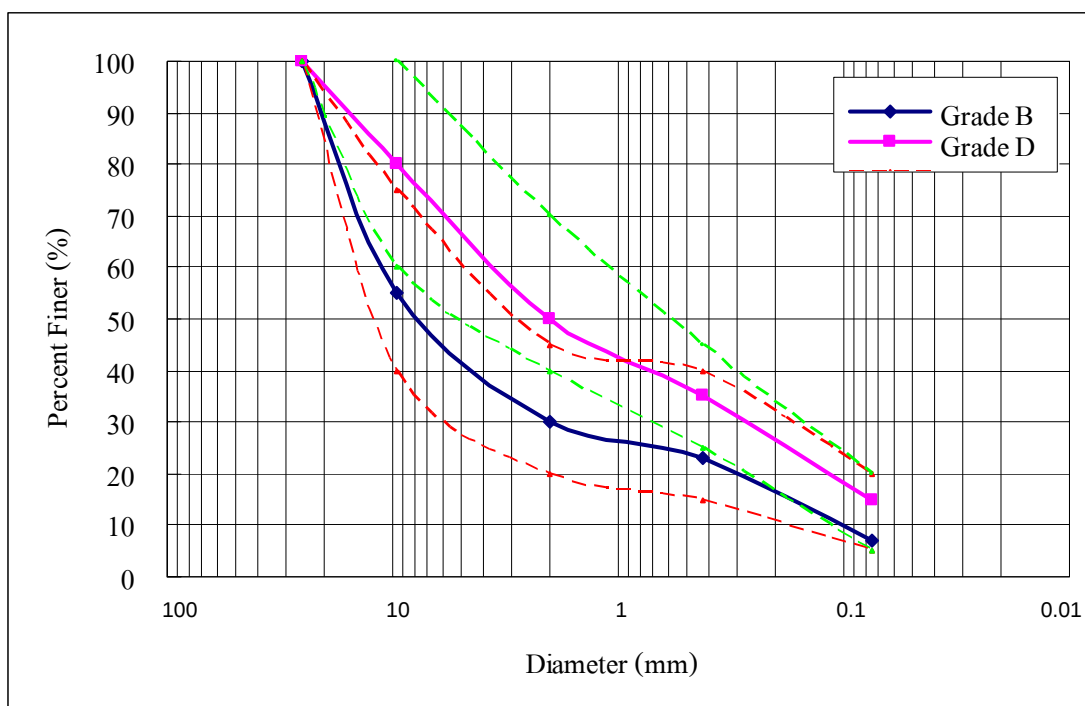
ขนาดช่องตะแกรง	น้ำหนักที่ผ่านตะแกรง %	
	GradeB	GradeD
1" (25.0 มม.)	100	100
3/8 " (9.5 มม.)	55	80
No.10 (2.00 มม.)	30	50
No.40 (0.425 มม.)	20	35
No.200 (0.075 มม.)	7	15
จำแนกดินอยู่ในกลุ่ม (USCS)	GW-GC	SC



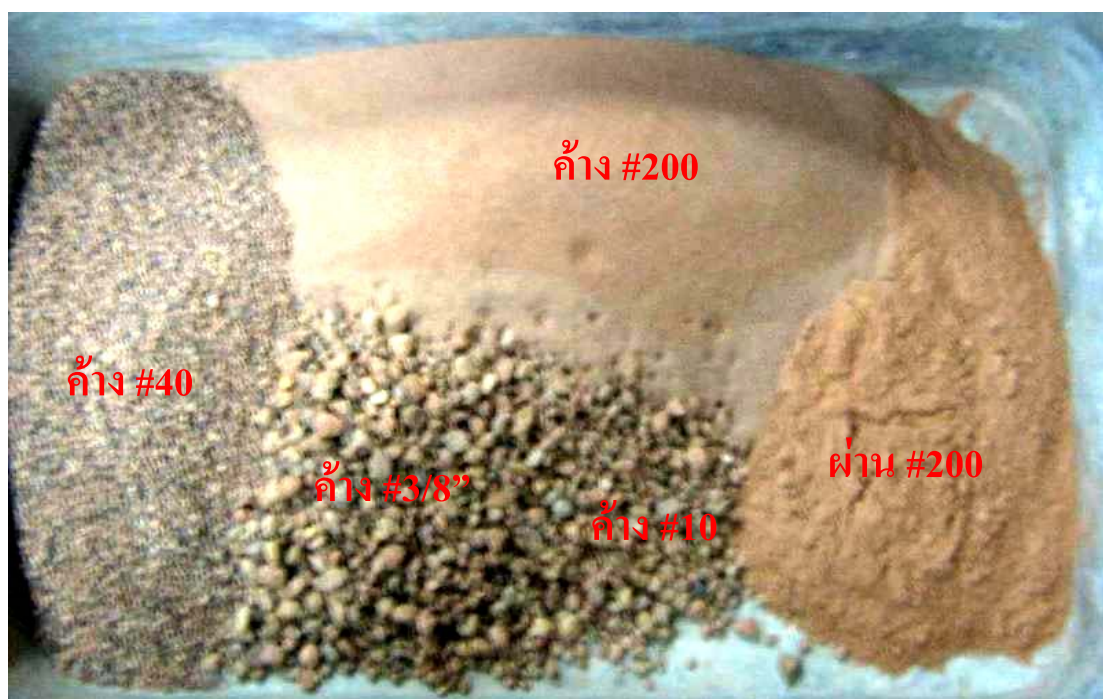
ภาพที่ 6 การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด B ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 7 การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด D ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 8 การกระจายขนาดของเม็ดดินลูกรังเกรด B และเกรด D ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 9 เม็ดดินขนาดต่างๆ ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบ

ผลการทดสอบ

คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินธรรมชาติ

ตัวอย่างดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัย ได้จากการสุ่มตัวอย่างดินจากบ่อลูกรังในตำบลเขาชะงุ้ม อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี โดยดินลูกรังส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลแดงอิฐ เมื่อดินธรรมชาติมีรูปร่างค่อนข้างกลมมน จากการสุ่มตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ผลดังนี้

1. ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังมีค่าอยู่ระหว่าง 2.79-2.83 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับความถ่วงจำเพาะของดินโดยทั่วไปซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.60-2.70 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะดินลูกรังมีส่วนประกอบของธาตุหลักจึงเป็นสาเหตุทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าดินทั่วไป

2. ผลการทดสอบ Atterberg's Limits มีดังนี้

2.1 Natural Moisture Content มีค่าอยู่ระหว่าง 2.10-4.40 %

2.2 Liquid Limit มีค่าอยู่ระหว่าง 31.52-36.03 %

2.3 Plastic Limit มีค่าอยู่ระหว่าง 14.67-18.51 %

2.4 Plasticity Index มีค่าอยู่ระหว่าง 16.85-19.02 %

2.5 Shrinkage Limit มีค่าอยู่ระหว่าง 13.45-17.29

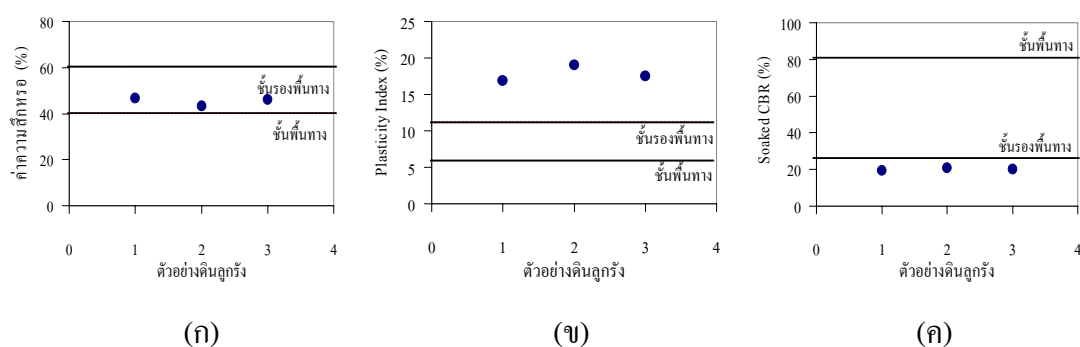
3. ผลการทดสอบการกระจายขนาดของเม็ดดินโดยวิธีร่อนแบบเปียกพบว่าดินลูกรังประกอบด้วยปริมาณของกรวด (Gravel) ขนาดเม็ดตั้งแต่ 4.75-75.00 มิลลิเมตร ประมาณ 29.28%, ปริมาณของทราย (Sand) ขนาดเม็ดตั้งแต่ 0.075-4.75 มิลลิเมตร ประมาณ 54.50% และปริมาณของตะกอนทราย (Silt) หรือดินเหนียว (Clay) ขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ประมาณ 16.22% ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่มีกรวดและทรายเป็นมวลหลัก และมีตะกอนทรายหรือดินเหนียวเป็นมวลรอง

4. การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification พบว่าดินลูกรังที่นำมาทดสอบจัดอยู่ในกลุ่ม SC ซึ่งมีลักษณะเป็นทรายมีตะกอนทรายหรือดินเหนียวปนและจำแนกตามระบบ AASHTO พบว่าดินลูกรังจัดอยู่ในกลุ่ม A-2-6(0)

5. จากการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนโดยวิธี Abrasion Test by Los Angeles Machine พบว่าตัวอย่างดินลูกรังมีเปอร์เซ็นต์ความสึกกร่อน ประมาณ 43.15-46.78 %

6. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังพบว่า มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ประมาณ 2.175-2.22 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และมีปริมาณความชื้นเหมาะสมประมาณ 8.00-8.70 % ค่า California Bearing Ratio แบบ Unsoaked CBR มีค่าประมาณ 32% และแบบ Soaked CBR มีค่าประมาณ 20% ในส่วนของค่าการบวมตัว (Swelling) มีค่าประมาณ 0.20%

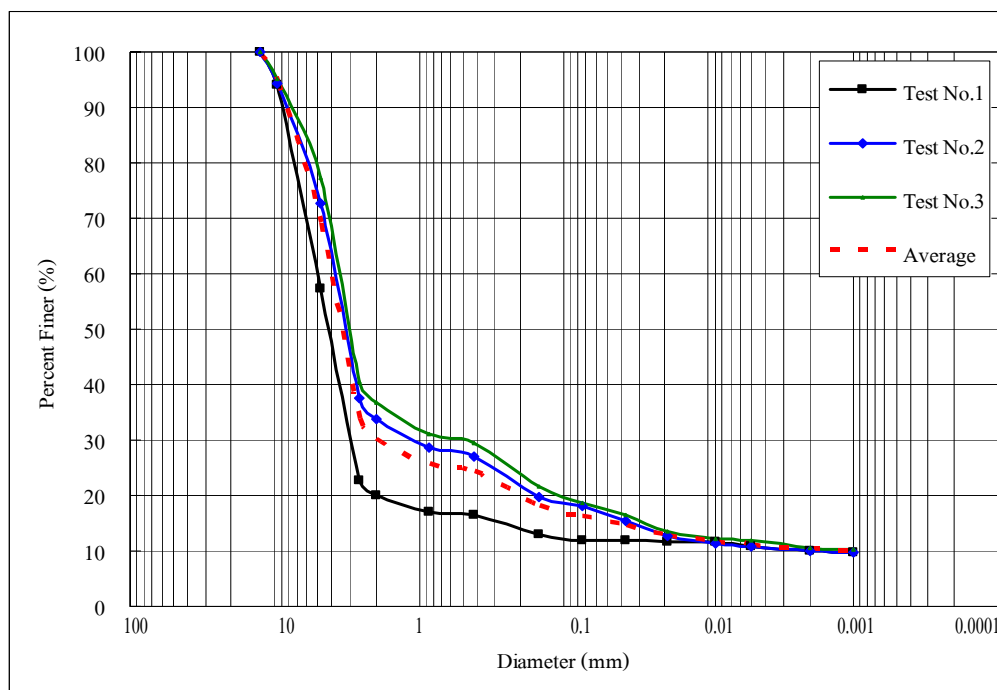
7. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินลูกรังแสดงไว้ดังภาพที่ 10 (ก),(ข) และ(ค) และตารางที่ 7 พบว่า เมื่อพิจารณาเส้นกราฟการกระจายขนาดเม็ดดินของตัวอย่างดินลูกรัง, ค่า Liquid Limit, Plasticity Index, ค่าความสึกหรอโดย Los Angeles Abrasion และค่า Soaked CBR ถือว่าดินลูกรังมีคุณสมบัติไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางและชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย



ภาพที่ 10 (ก) ค่าความสึกหรอของตัวอย่างดินลูกรัง (ข) Plasticity Index ของตัวอย่างดินลูกรัง
(ค) Soaked CBR ของตัวอย่างดินลูกรัง

ตารางที่ 7 คุณสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างดินลูกรัง

คุณสมบัติ	ผลการทดสอบ
องค์ประกอบเนื้อดิน (ระบบ Unified)	
- กรวด (%)	29.28
- ทราย (%)	54.50
- ตะกอนทรายหรือดินเหนียว (%)	16.22
Natural Water Content (%)	2.10-4.40
Specific Gravity	2.79-2.83
Atterberg's Limit	
- Liquid Limit (%)	31.52-36.03
- Plasticity Limit (%)	14.67-18.51
- Plasticity Index (%)	16.85-19.02
- Shrinkage Limit (%)	13.45-17.29
การจำแนกดินระบบ Unified	SC
การจำแนกดินระบบ AASHTO	A-2-6(0)
Modified Compaction	
- ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (t/m^3)	2.175-2.22
- ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)	8.00-8.60
California Bearing Ratio	
- Unsoaked (%)	32
- Soaked (%)	20
การบวมตัว (%)	0.20
Los Angeles Abrasion (%)	45.32



ภาพที่ 11 การกระจายขนาดเม็ดดินของตัวอย่างดินที่เก็บจากสนาม

คุณสมบัติเบื้องต้นของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

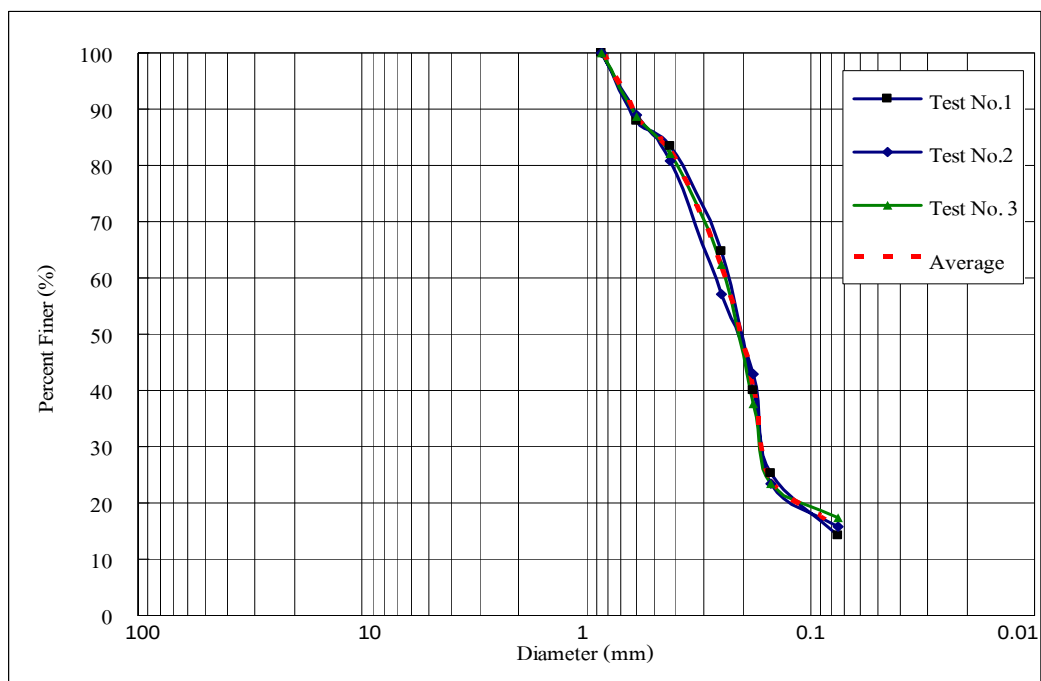
แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหลือทิ้งจากการขบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการบดซึ่งเรียกว่า Ground Calcium Carbonate (GCC) ของโรงงานแคลเซียมโปรดักส์ จ.ลพบุรี โดยทางบริษัทนำแร่แคลไซต์ มาจากแหล่งแร่แคลไซต์ในจังหวัดลพบุรี โดยแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ได้มีการปรับปรุงความละเอียดเบื้องต้นด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แบบแห้ง ลักษณะของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งแสดงไว้ดังภาพที่ 12 จากการศึกษาแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งพบว่า มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมีผลึก มีสีขาวหรือขาวขุ่น เนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ เช่น หิน กรวด ทราย หรือ ดิน เป็นต้น มีลักษณะคล้ายเกลือที่ผลิตได้ในธรรมชาติ สามารถทำให้ละเอียดได้ด้วยการบดโดยใช้แรงไม่มากนัก ลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงไว้ดังภาพที่ 13 การทดสอบคุณสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งทางด้านวิศวกรรมพบว่า Moisture Content มีค่าประมาณ 1%, ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65 เมื่อผสมน้ำแล้วไม่สามารถปั้นให้เป็นแท่งยาวเพื่อหาค่า Plastic Limit ได้ (NP), ผลการทดสอบการบดอัดแบบ Modified Proctor Compaction Test พบว่า

ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าประมาณ 1.90 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 4.50 % ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าประมาณ 1.04×10^{-4} cm./sec.

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง (CaCO_3) เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งยังมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผลิตได้ ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลการทดสอบแคลเซียมคาร์บอเนตจากโรงงานแคลเซียมโปรดักส์ จ.ลพบุรี พบว่า ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประมาณ 35.43-52.13%, เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) น้อยกว่า 0.1%, อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) น้อยกว่า 0.2% , ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) น้อยกว่า 0.3%, แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีค่าน้อยกว่า 0.8%, ไม่มีแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ในส่วนประกอบ, pH มีค่าประมาณ 9.5 ± 0.5 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) ประมาณ 43%



ภาพที่ 12 แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 13 ช่วงการกระจายของของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรด B และ D

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังของลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่ ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้น

กลุ่มดิน	Atterberg's Limits		
	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index
B	29.48	15.47	14.01
D	32.30	17.20	15.10

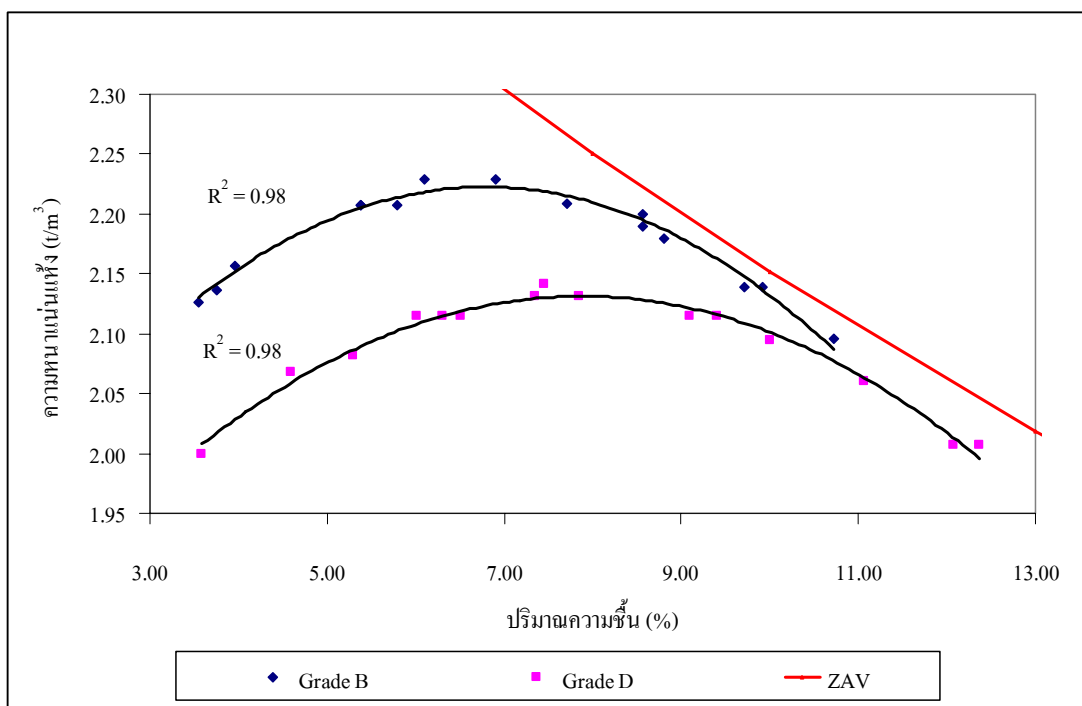
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังเกรด B และ D

คุณสมบัติด้านการบดอัด

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังกลุ่มเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้น โดยการบดอัดด้วย Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว ใช้พลังงานในการบดอัด ประมาณ 56000 ปอนด์-ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.-ft./ft.³) แสดงไว้ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 14 จากการศึกษาพบว่าดินลูกรังเกรด B และ D มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ประมาณ 2.23 และ 2.13 ตันต่อลูกบาศก์เมตร (t/m.³) ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) พบว่าดินลูกรังเกรด B และ D มีปริมาณความชื้นเหมาะสม เท่ากับ 6.8 และ 7.7% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลพบว่ากรณีที่ดินลูกรังเกรด B ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมากกว่าดินลูกรังเกรด D สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากดินลูกรังเกรด B มีปริมาณของขนาดเม็ดกรวดและทรายผสมอยู่เป็นปริมาณมาก จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าสูงกว่าลูกรังเกรด D ทั้งนี้เมื่อพิจารณาขนาดเม็ดตะกอนทรายหรือดินเหนียวของดินลูกรังเกรด B ก็ยังมีปริมาณที่น้อยกว่าอีกด้วย ส่งผลให้ความต้องการใช้ปริมาณความชื้นเหมาะสมเพื่อให้การบดอัดได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าน้อยกว่าอีกด้วย

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรด B และ D

กลุ่มดิน (Grade)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตันต่อลูกบาศก์เมตร)	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (%)
B	2.23	6.8
D	2.13	7.7



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด B และเกรด D

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังของดินลูกรังโดยการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Unsoaked และ Soaked CBR ของลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นแสดงไว้ดังตารางที่ 10 จากผลการทดสอบพบว่า ดินลูกรังเกรด B จะให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR สูงกว่าดินลูกรังเกรด D ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการบดอัดและลักษณะการกระจายขนาดของเม็ดดินที่มีปริมาณขนาดเม็ดกรวดและทรายผสมอยู่เป็นปริมาณมาก ส่งผลให้ได้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR สูงกว่า และเมื่อพิจารณาขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ตะกอนทรายหรือดินเหนียว) ที่มีปริมาณน้อยกว่าจึงส่งผลให้การบวมตัว (Swelling) ของดินลูกรังเกรด B มีค่าน้อยกว่า ดินลูกรังเกรด D

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D

California Bearing Ratio (CBR), (%)			
กลุ่มดิน	Unsoaked	Soaked	Swelling(%)
B	50.18	32.73	0.11
D	20.07	8.29	0.20

คุณสมบัติทางด้านการซึมผ่าน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธี Constant Head โดยใช้ความดันเข้าช่วย ผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 11 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเฉลี่ยของดินลูกรังเกรด B และ D มีค่าประมาณ 9.39×10^{-6} และ 3.37×10^{-6} cm./sec ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านเฉลี่ยของดินลูกรังเกรด B มีค่าสูงกว่าดินลูกรังเกรด D อยู่ประมาณ 6 เท่า

ตารางที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดินลูกรังเกรด B และ D

กลุ่มดิน	ความดันที่ใช้ทดสอบ			ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (cm./sec.)
	0.5 ksc.	1.0 ksc.	2.0 ksc.	
B	4.39E-06	7.65E-06	1.61E-05	9.39E-06
D	3.00E-06	3.57E-06	3.55E-06	3.37E-06

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้น ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งในอัตราส่วน 2, 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยพิจารณาจากค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง โดยการศึกษาจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ประเด็นคือ 1. พิจารณาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index

ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งโดยทดสอบทันทีหลังผสม และ 2. อิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเปรียบเทียบกับดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพดินที่อายุการบ่ม 14 วัน

อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งต่อค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index แสดงไว้ดังตารางที่ 12-13 และ ภาพที่ 15-22 จากผลการศึกษพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมากขึ้นจะทำให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ค่า Plastic Limit มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยดินลูกรังเกรด B มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3.58% ส่วนดินลูกรังเกรด D มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.45% ส่งผลทำให้ค่า Plasticity Index มีแนวโน้มลดลงโดยดินลูกรังเกรด B มีค่า Plasticity Index ลดลงประมาณ 4.38% ส่วนดินลูกรังเกรด D มีค่าลดลงประมาณ 2% ดังนั้นจากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมากขึ้นจะทำให้ดินลูกรังมีค่าความเหนียวลดลงโดยประมาณ 4%

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง โดยเปรียบเทียบค่า Liquid Limit , Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งในกลุ่มเดียวกัน ทดสอบทันทีหลังผสมและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน แสดงไว้ดังภาพที่ 23-30 โดยพิจารณาดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเปรียบเทียบกับดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพดินที่อายุการบ่ม 14 วัน พบว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่า Liquid Limit ของดินลูกรังเกรด B มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าลดลงประมาณ 2.05% ในส่วนของดินลูกรังเกรด D จะมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ค่า Plastic Limit มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในดินลูกรังเกรด B และ D โดยลูกรังเกรด B มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4.70% ในส่วนของดินลูกรังเกรด D มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.15% ส่งผลให้ค่า Plasticity Index มีแนวโน้มลดลงประมาณ 6.76% และ 3.62% และในส่วนของดินลูกรังเกรด B และ D ตามลำดับ จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีค่าความเหนียวลดลงโดยประมาณ 6.76%

สมมติฐานของสาเหตุที่เป็นเช่นนี้พอจะอนุมานได้ดังนี้ คือ 1. แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติด้านความเหนียว (Non-Plasticity) เมื่อผสมลงในดินลูกรังจึงส่งผลให้ดินลูกรังมีค่าความเหนียวลดลง และ 2. อาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุและการจับตัวกันของเม็ดดิน (Cation Exchange and Flocculation) ทำให้อนุภาคนาโนดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็น

ก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ดินร่วนขึ้น ส่งผลให้ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มลดลง, ค่า Plastic Limit มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Plasticity Index มีแนวโน้มลดลง อันอาจเป็นผลทำให้โครงสร้างของดินที่ได้รับการปรับปรุงมีความมั่นคงมากขึ้น จากผลการทดสอบพบว่า การผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ความเหนียวของดินลูกรังมีค่าลดลงในช่วงต้นของปฏิกิริยาและการแลกเปลี่ยนประจุและการจับตัวของเม็ดดินน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ความเหนียวของดินลูกรังมีค่าลดลงในช่วงอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 12 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B
ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
Liquid Limit (%)					
0	29.48	29.37	29.52	29.48	29.56
2	30.09	30.19	30.23	30.19	30.31
4	30.94	30.52	30.28	30.10	29.83
6	29.73	29.79	29.79	29.79	28.93
8	27.52	27.60	27.60	27.60	27.91
10	28.67	28.23	27.90	27.43	27.22
Plastic Limit (%)					
0	15.47	15.77	15.68	15.68	16.03
2	15.92	16.56	17.65	18.93	19.58
4	16.45	17.33	18.32	19.52	19.95
6	17.07	17.76	18.24	18.84	19.58
8	18.16	18.48	18.86	19.03	19.29
10	19.05	19.80	20.16	20.38	20.89

ตารางที่ 12 (ต่อ)

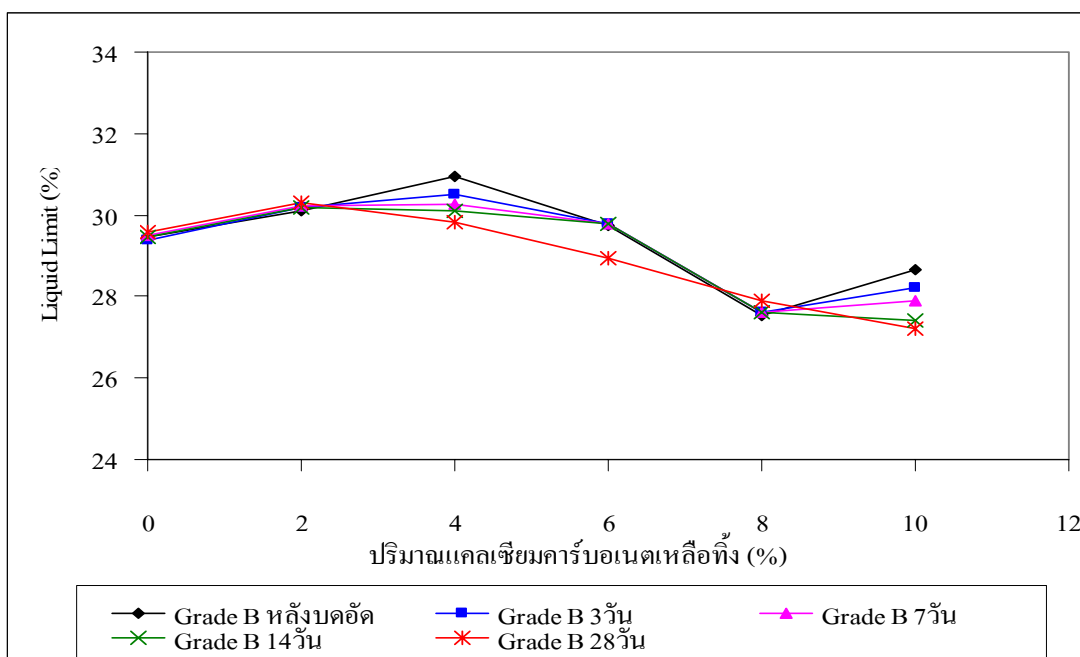
ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
	Plasticity Index (%)				
0	14.01	13.60	13.84	13.81	13.53
2	14.17	13.63	12.58	11.26	10.73
4	14.49	13.19	11.96	10.58	9.88
6	12.66	12.03	11.55	10.95	9.35
8	9.35	9.12	8.74	8.57	8.63
10	9.63	8.43	7.74	7.05	6.34

ตารางที่ 13 ค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด D ผสม
แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

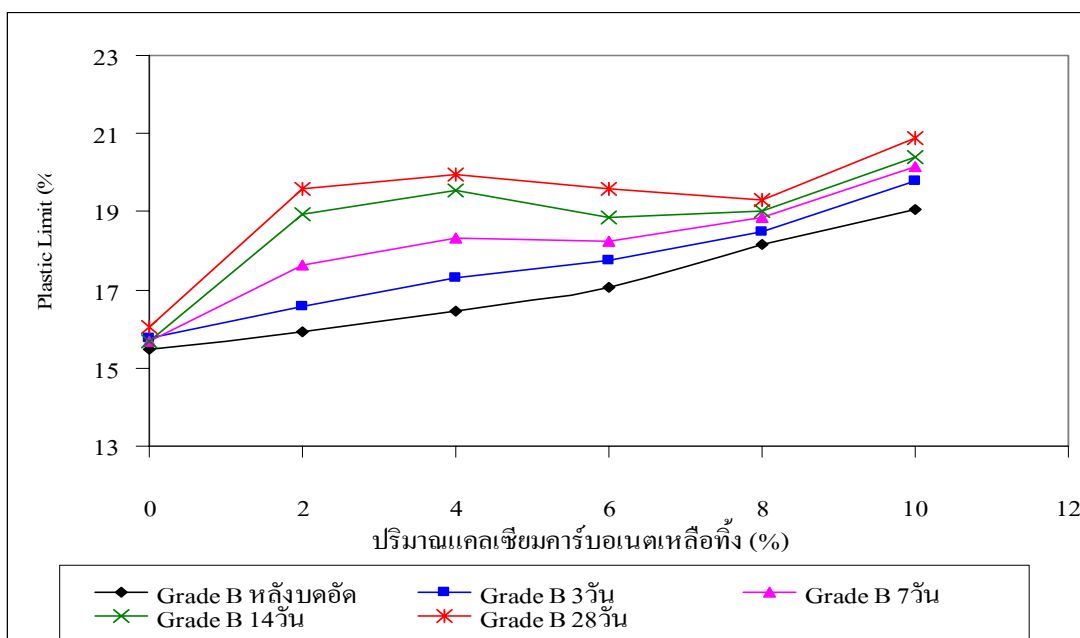
ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
	Liquid Limit (%)				
0	32.30	32.35	32.32	32.32	32.27
2	32.75	32.69	32.43	32.26	32.19
4	31.20	31.52	31.98	32.41	32.28
6	29.46	29.89	30.49	30.99	31.67
8	30.03	30.37	30.60	30.86	31.25
10	32.75	32.73	32.53	32.43	32.32

ตารางที่ 13 (ต่อ)

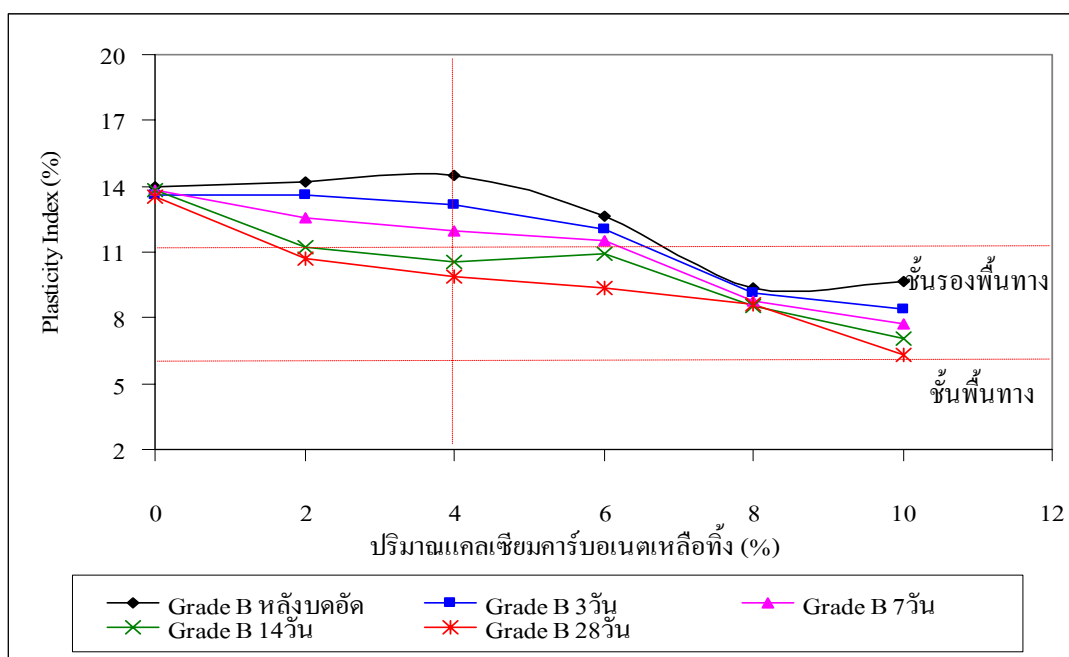
ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)	อายุการบ่ม(วัน)				
	หลังบดอัด	3	7	14	28
Plastic Limit (%)					
0	17.20	17.67	18.28	19.28	19.58
2	17.60	18.06	18.65	19.93	20.45
4	18.10	18.73	19.32	20.42	20.85
6	18.43	19.56	20.04	20.84	21.29
8	18.84	19.98	20.86	21.43	21.93
10	19.65	20.30	20.86	21.28	22.01
Plasticity Index (%)					
0	15.10	14.68	14.04	13.05	12.69
2	15.15	14.63	13.78	12.33	11.74
4	13.10	12.79	12.66	11.99	11.43
6	11.03	10.33	10.45	10.15	10.38
8	11.19	10.39	9.74	9.43	9.32
10	13.10	12.43	11.67	11.15	10.31



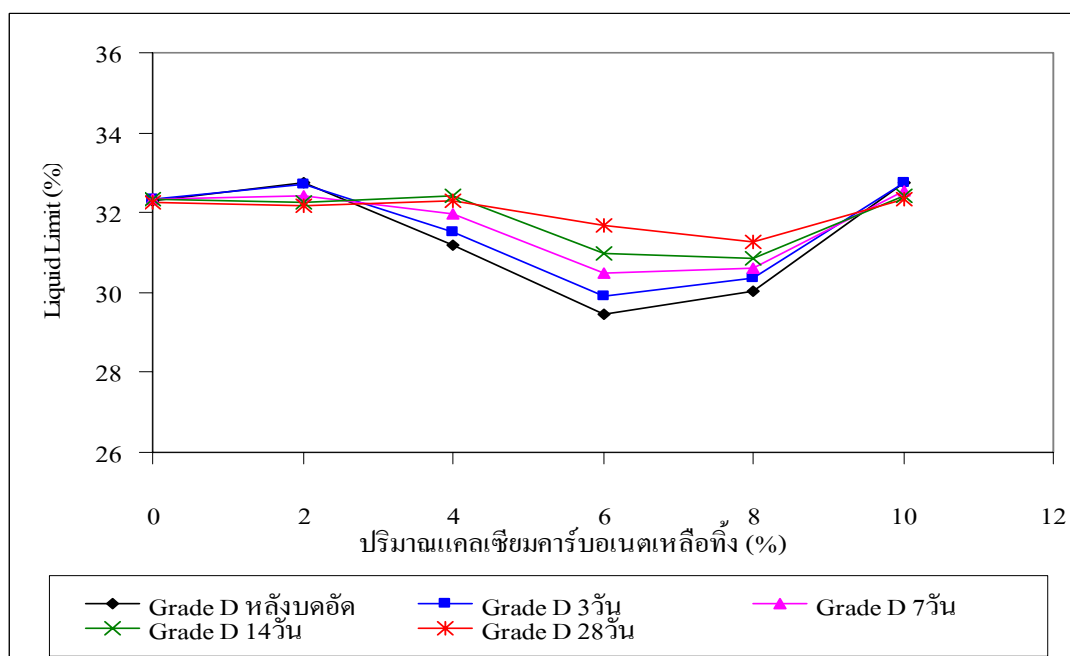
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B



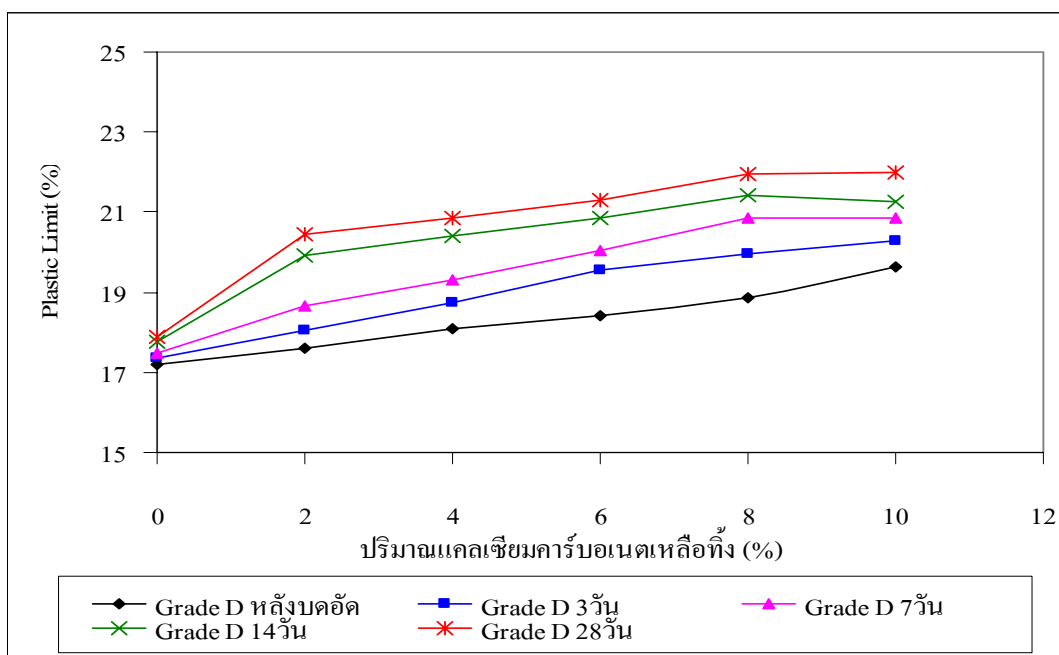
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B



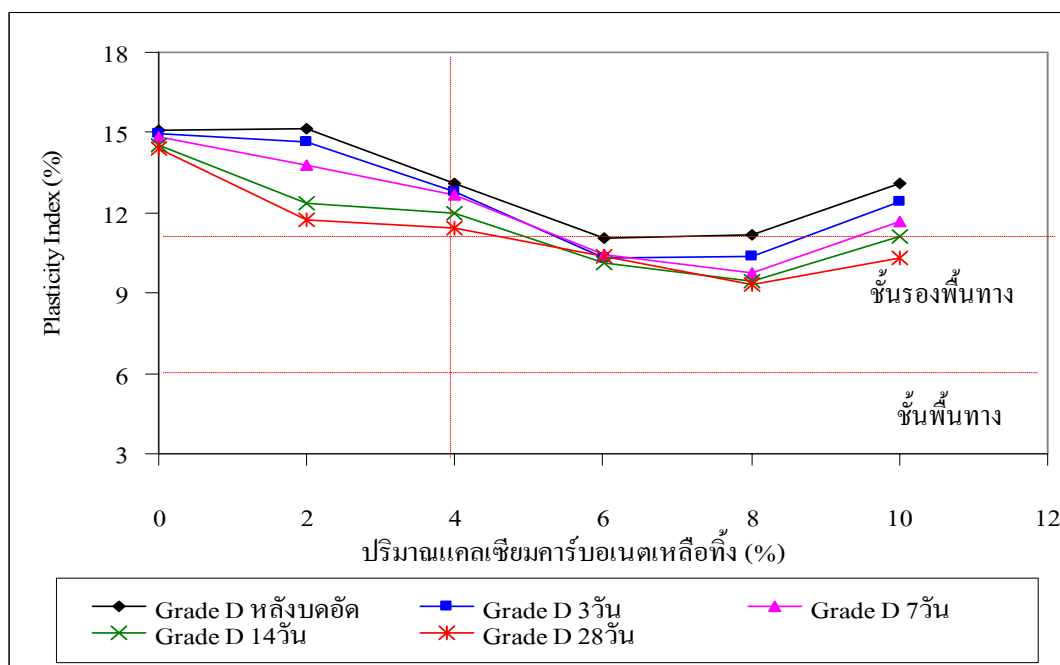
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B



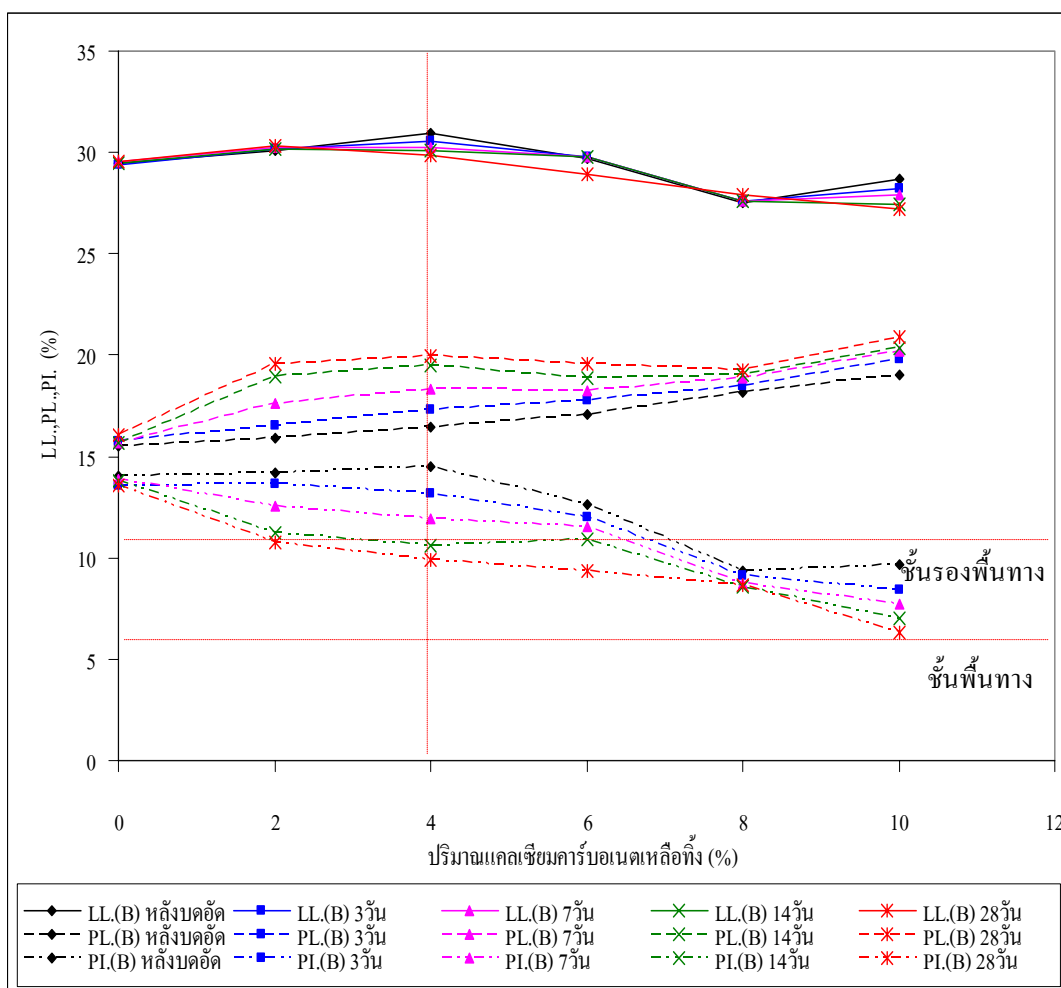
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D



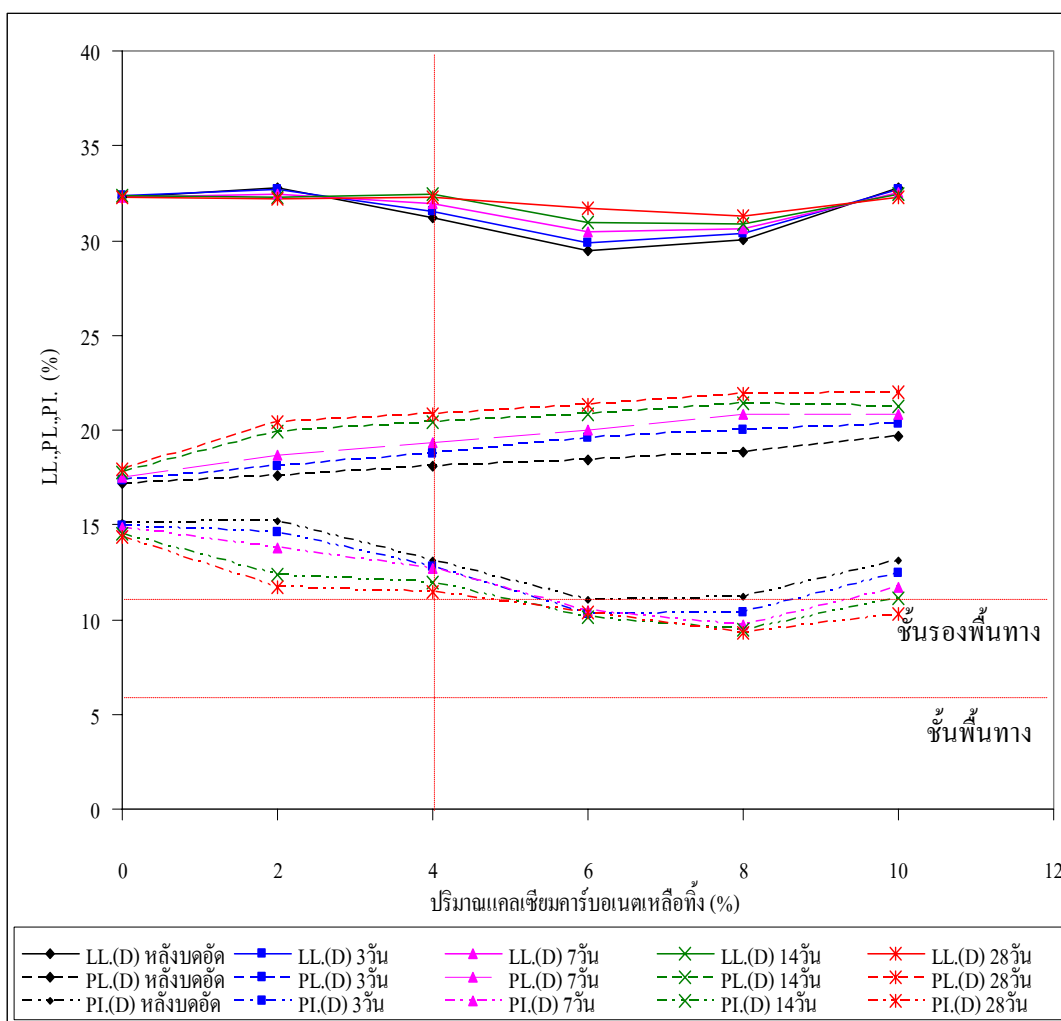
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสม ดินลูกรังเกรด D



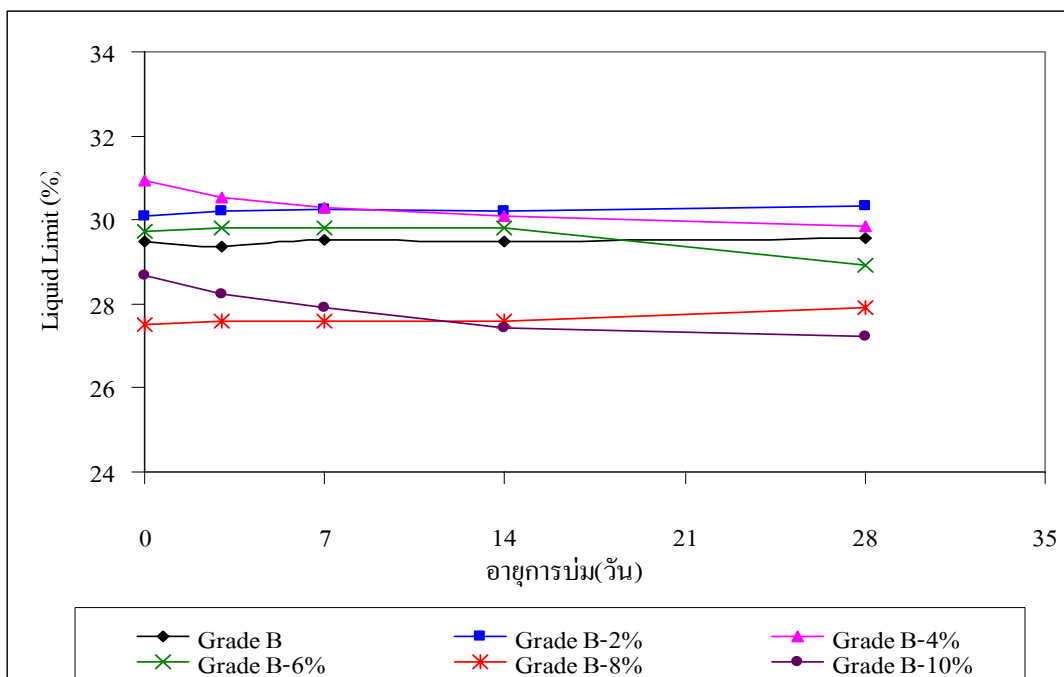
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสม ดินลูกรังเกรด D



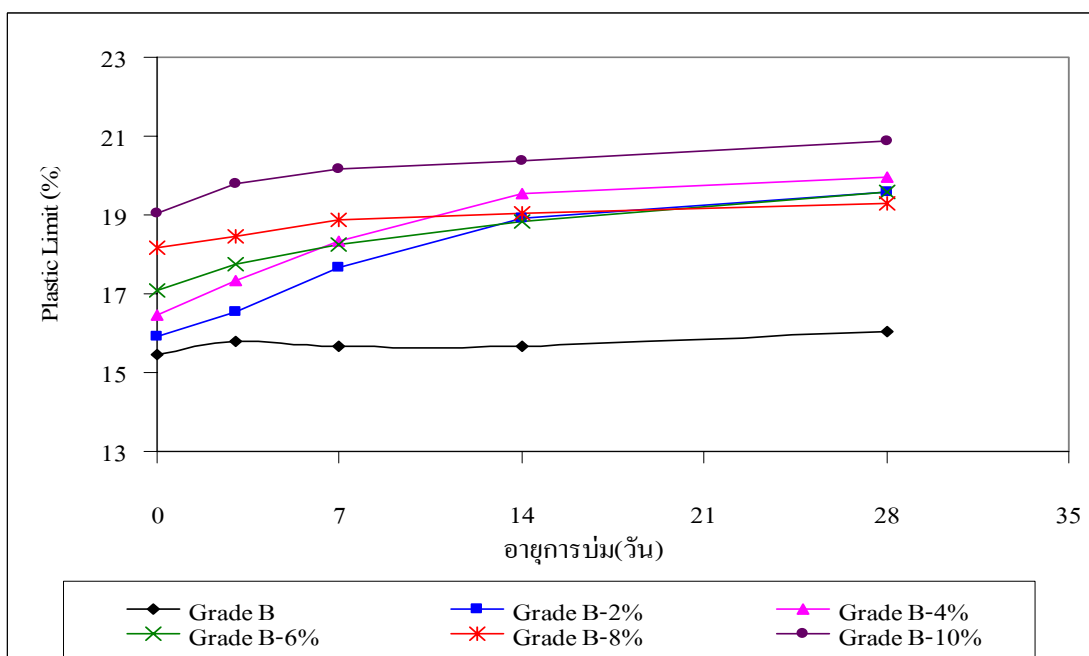
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B



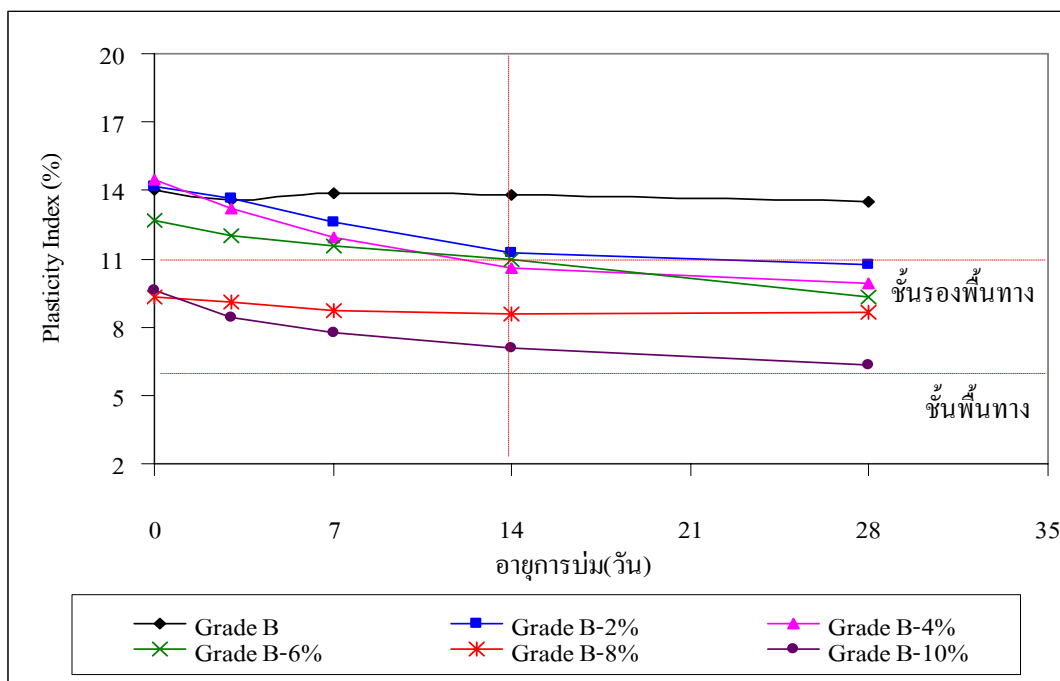
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D



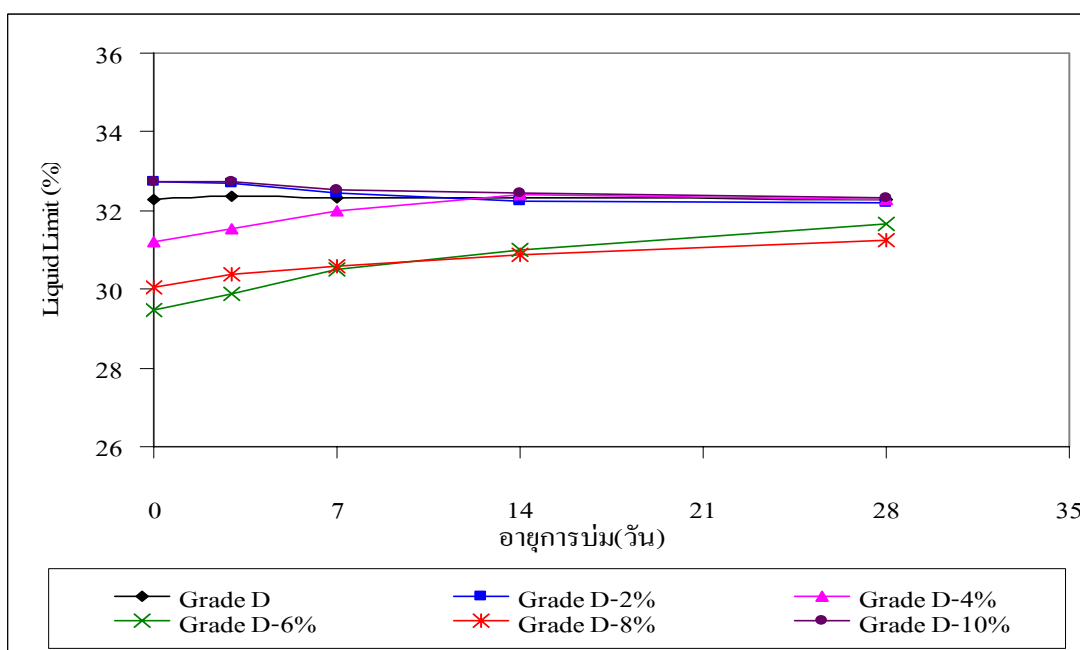
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



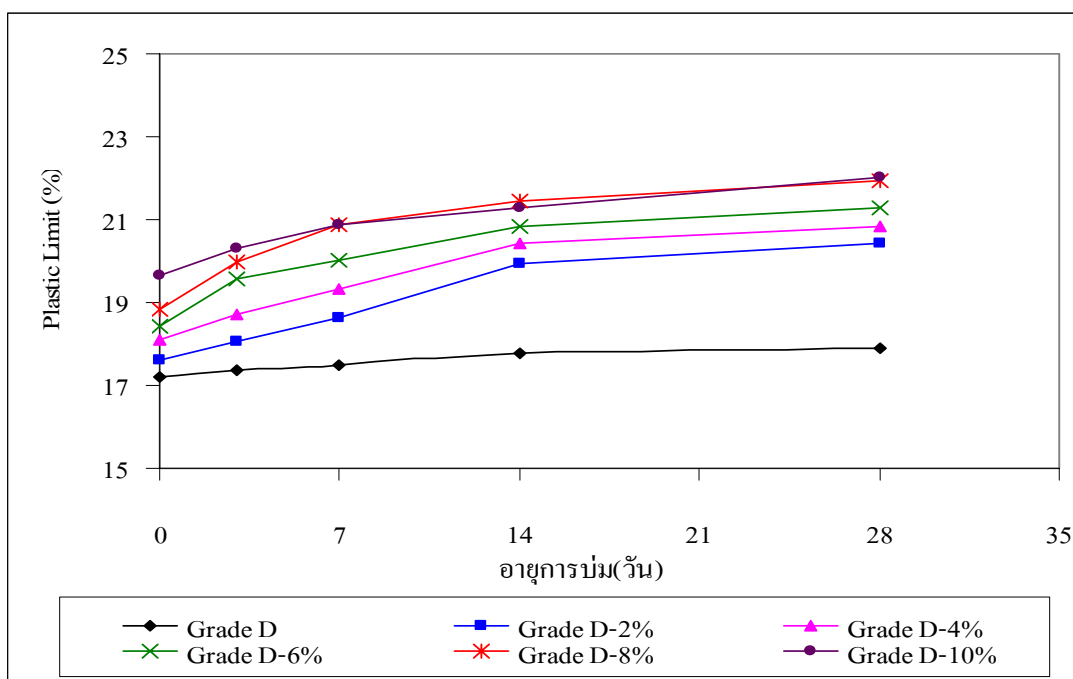
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



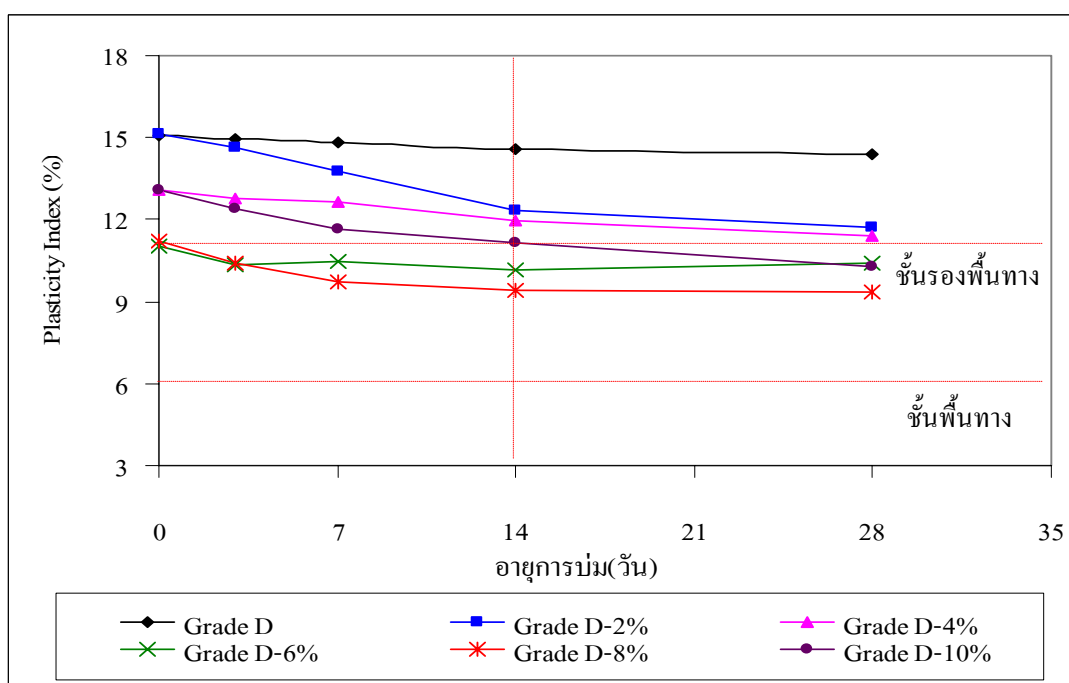
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



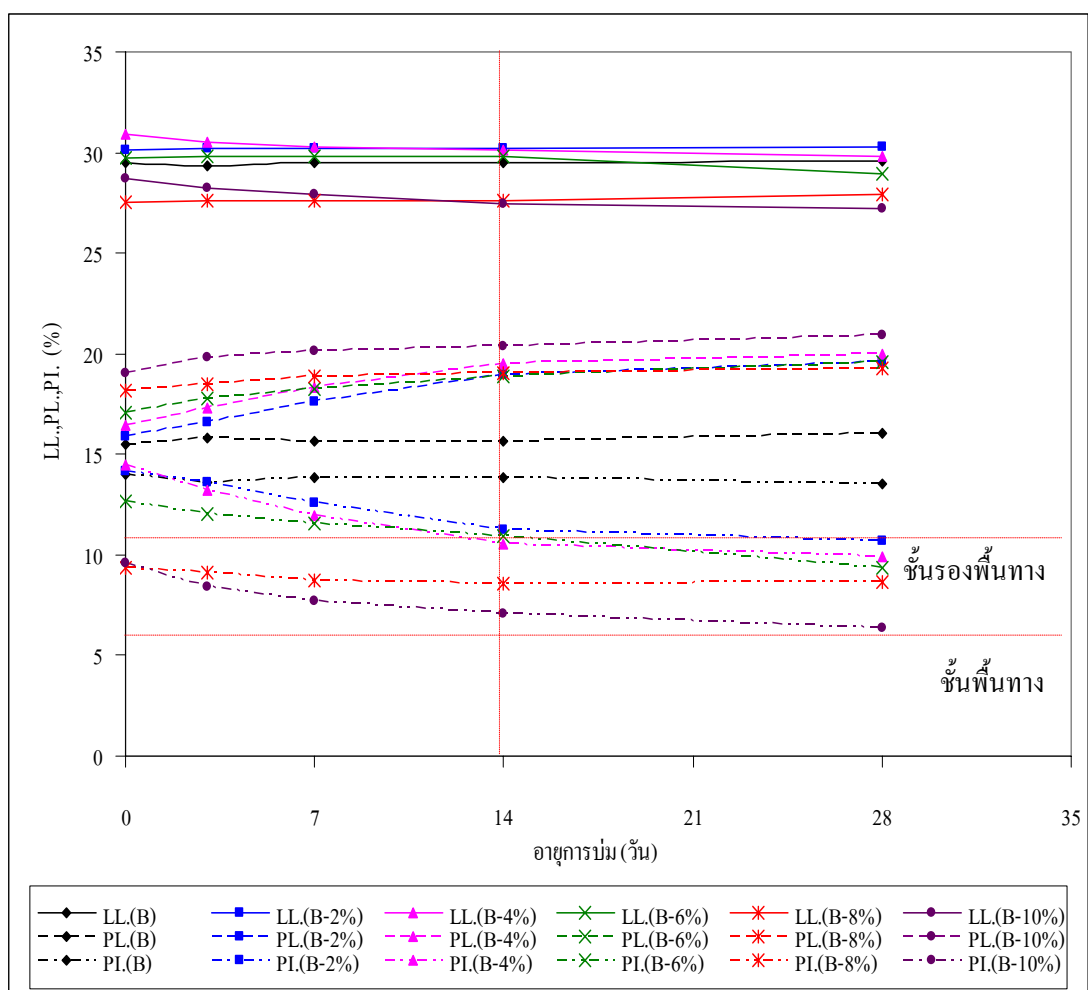
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



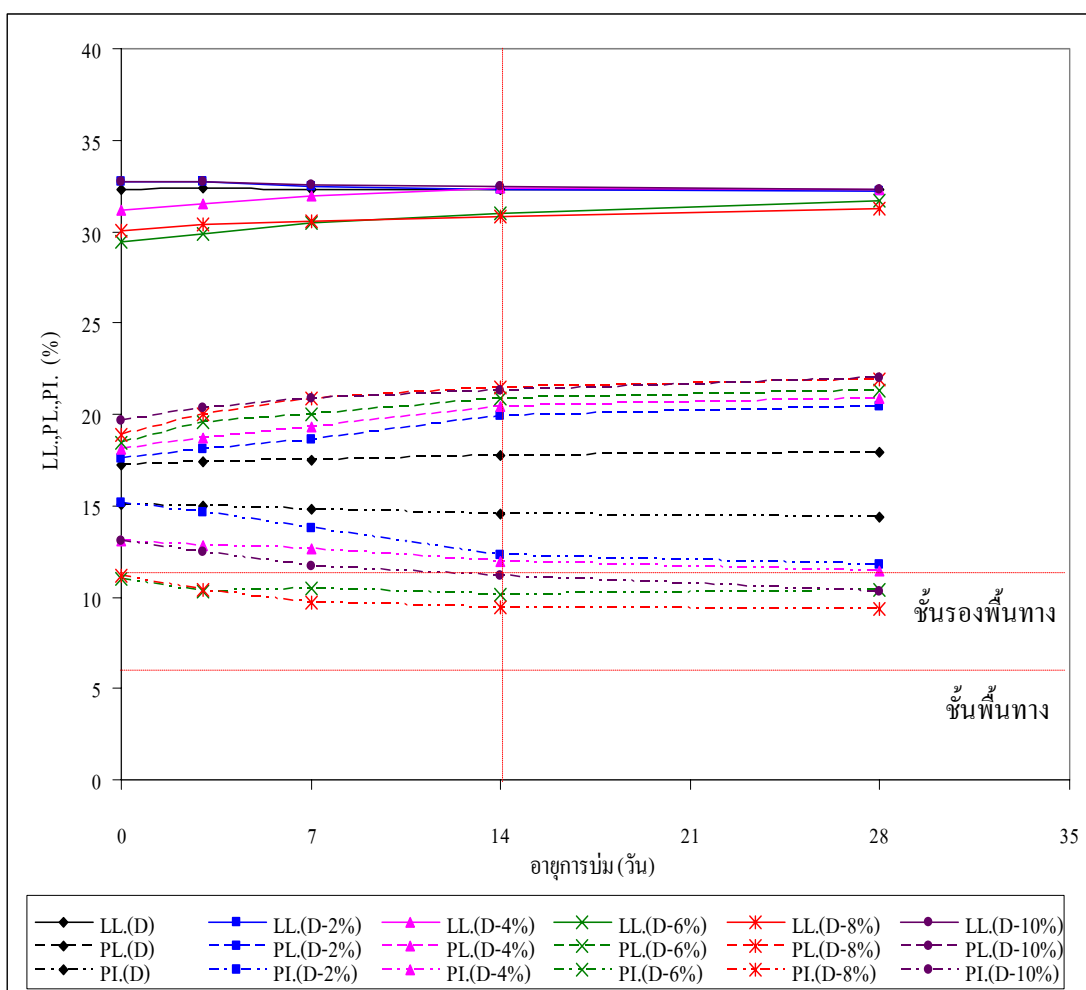
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังเกรด B และ D

คุณสมบัติด้านการบดอัด

ผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยใช้ Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว มีพลังงานประมาณ 56,000 ปอนด์.ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb.ft/ft³) ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อัตราส่วนผสม 2, 4, 6, 8 และ 10 % โดยน้ำหนักของดินแห้ง แสดงไว้ดังตารางที่ 14 และภาพที่ 31-34 พบว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าลดลงทั้งในดินลูกรังเกรด B และ D สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่มีน้ำหนักเบากว่าดินลูกรังลงไปแทนที่ จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลง ในส่วนของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ผสมลงในดินลูกรังมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าดินลูกรังมากพื้นที่ผิวจำเพาะจึงสูงกว่าทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคดินมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อนำผลการทดสอบมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด, ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและปริมาณความชื้นเหมาะสม สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์เบื้องต้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และหาค่า Coefficient of Determination (R^2) แสดงไว้ดังตารางที่ 15-17 จะเห็นได้ว่าค่า (R^2) ของสมการความสัมพันธ์ต่างๆ มีค่าระหว่าง 0.988-0.999 ซึ่งมีค่าสูงมากแสดงว่าแนวโน้มของผลการทดสอบมีความสัมพันธ์กันดีมาก มีความเชื่อถือในเชิงสถิติที่ค่อนข้างสูง จึงมีความเป็นไปได้ที่สมการดังกล่าวจะสามารถนำมาใช้ทำนายถึงค่า MDD และ OMC โดยสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการต่อไปนี้

$$\text{MDD} = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

$$\text{MDD} = a(\text{OMC})^2 + b(\text{OMC}) + c \quad (2)$$

$$\text{OMC} = ax^2 + bx + c \quad (3)$$

เมื่อ MDD = ความหนาแน่นแห้งสูงสุด, (t/m^3)
 OMC = ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม, (%)
 x = ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)
 a, b, c = ค่าคงที่ของสมการ

อนึ่งสมการที่นำเสนอไว้เพื่อใช้ทำนายถึงค่า MDD และ OMC ของดินลูกรังเกรด B และ D ในครั้งนี้จะมีความถูกต้องเฉพาะที่อยู่ในช่วงของข้อมูลปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 0-10% ของน้ำหนักดินแห้งและมีการกระจายขนาดของเม็ดดินตามที่กำหนดไว้เท่านั้น จึงไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนายผลในช่วงที่ไม่มีการทดสอบ

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเกรด B และ D

กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)	MDD (t/m^3)	OMC (%)
B	0	2.23	6.8
	2	2.22	7.1
	4	2.215	7.4
	6	2.205	7.7
	8	2.19	8
	10	2.18	8.5
D	0	2.13	7.7
	2	2.125	8.2
	4	2.112	9
	6	2.09	9.6
	8	2.07	10
	10	2.055	11.1

ตารางที่ 15 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ของดินลูกรังเกรด B และ D กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

กลุ่มดิน (Grade)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (t/m^3)	
	$MDD = ax^2 + bx + c$	R^2
B	$MDD = -0.0002x^2 - 0.0032x + 2.2293$	0.992
D	$MDD = -0.0003x^2 - 0.0045x + 2.1325$	0.988

ตารางที่ 16 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) กับปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

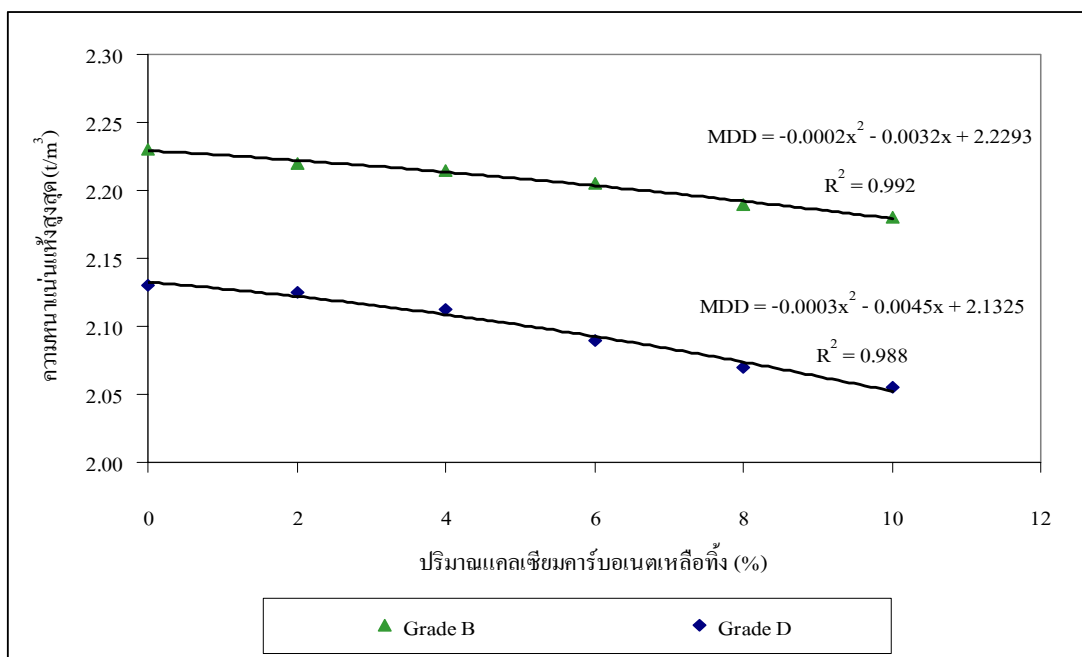
กลุ่มดิน (Grade)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (t/m^3)	
	$MDD = a(OMC)^2 + b(OMC) + c$	R^2
B	$MDD = 0.0002(OMC)^2 - 0.0032(OMC) + 2.2293$	0.992
D	$MDD = 0.0003(OMC)^2 - 0.0045(OMC) + 2.1325$	0.988

ตารางที่ 17 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) ของดินลูกรังเกรด B และ D กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

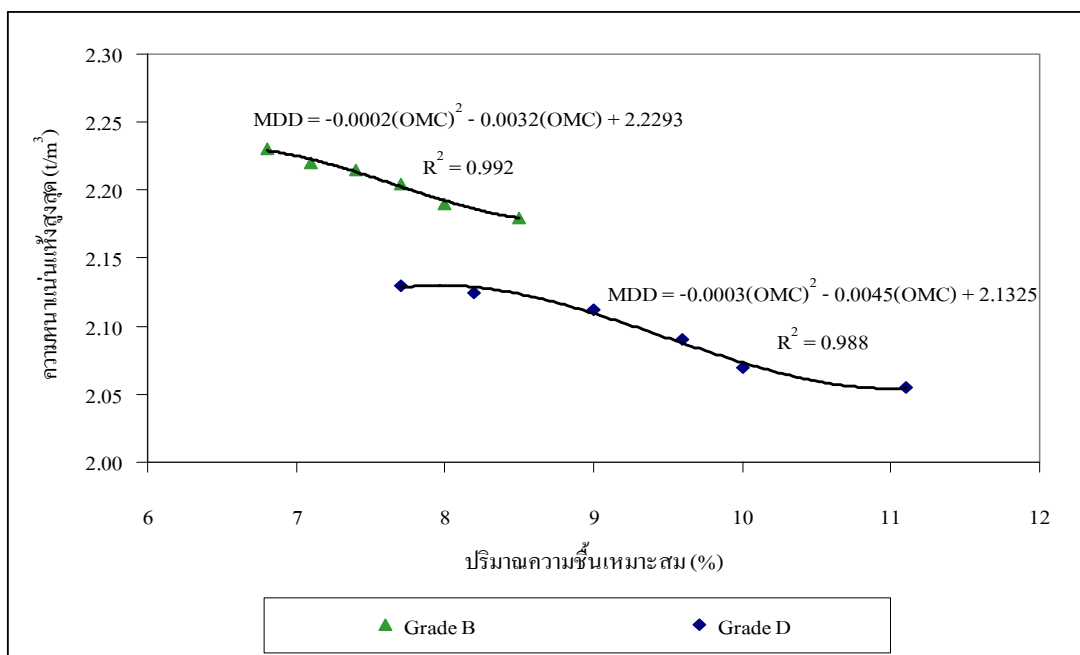
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณความชื้นเหมาะสม (%)	
	$OMC = ax^2 + bx + c$	R^2
B	$OMC = 0.0063x^2 + 0.2661x + 7.7071$	0.999
D	$OMC = 0.0045x^2 + 0.1196x + 6.8214$	0.996

เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดพบว่าดินลูกรังเกรด B และ D จะมีค่าลดลงประมาณ 5 และ 8 กรัมต่อดินลูกรังหนึ่งลูกบาศก์เมตรต่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้น 1 % ของน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับ ในส่วนของอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดพบว่า ดินลูกรังเกรด B และ D จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.164 และ 0.329 % ต่อดินลูกรังหนึ่งลูกบาศก์เมตรต่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้น 1 %

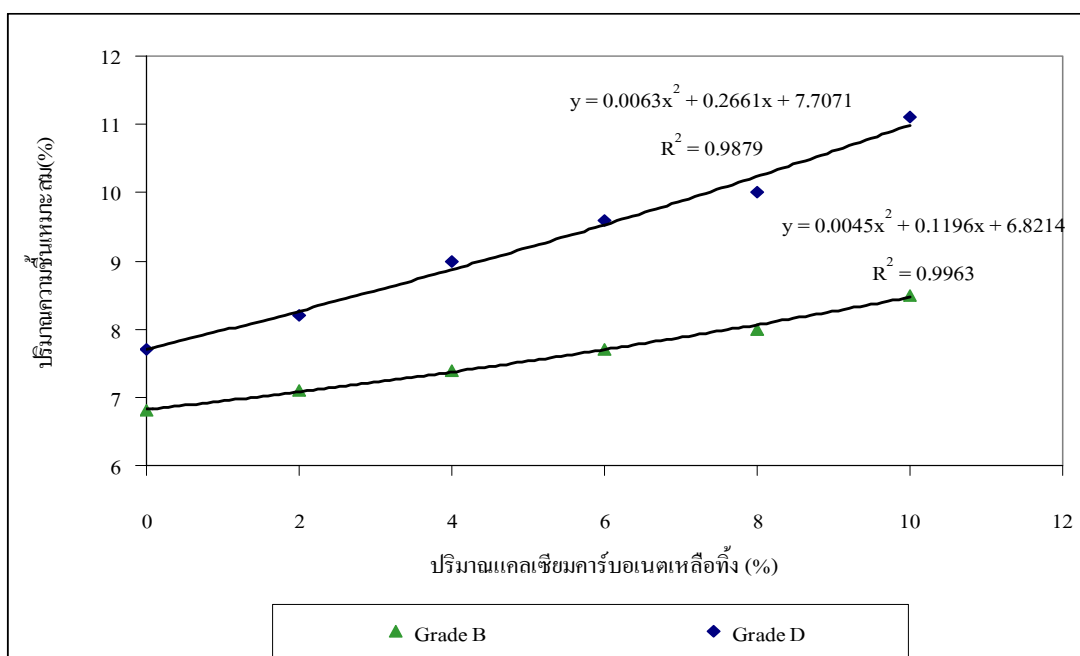
ของน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดพบว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินลูกรังเกรด B และ D จะมีค่าอัตราการลดลงประมาณ 30.30 และ 24.10 กรัมต่อดินลูกรังหนึ่งลูกบาศก์เมตรต่อปริมาณความชื้นเหมาะสมที่เพิ่มขึ้น 1%



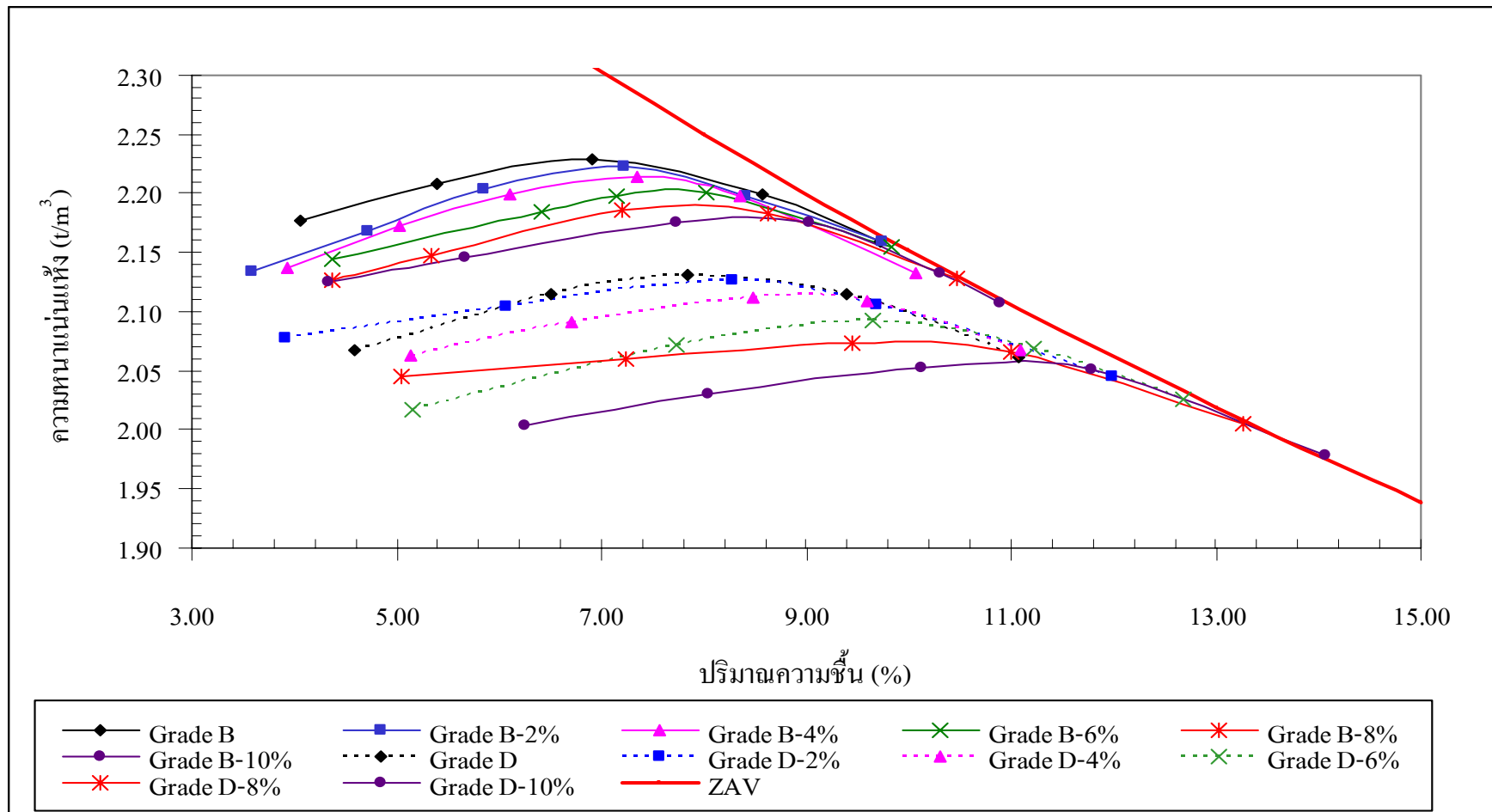
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B และเกรด D



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินลูกรังเกรด B และเกรด D



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B และเกรด D



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

คุณสมบัติด้านกำลัง

ผลการทดสอบ Unsoaked และ Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งโดยใช้อัตราส่วนผสม 2, 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 18-19

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	California Bearing Ratio(%)				
		อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
B	0	50.18	54.54	55.20	54.98	55.63
	2	63.72	109.09	120.00	139.63	152.72
	4	69.05	123.27	137.89	157.08	165.81
	6	63.81	116.50	130.91	149.23	159.27
	8	60.69	87.27	96.54	111.27	115.63
	10	55.89	76.36	84.87	91.63	99.27
D	0	20.07	22.04	22.47	23.78	24.65
	2	36.65	50.62	53.23	58.03	61.09
	4	42.09	85.09	94.91	113.45	117.81
	6	38.25	69.82	84.87	99.49	108.65
	8	33.65	60.25	65.45	78.80	82.91
	10	33.42	56.73	58.91	66.11	76.36

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบ Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

California Bearing Ratio(%)						
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
B	0	32.73	34.69	35.34	36.22	36.87
	2	37.38	65.02	70.91	74.83	90.54
	4	45.54	80.07	82.47	85.52	96.87
	6	40.18	59.56	65.89	71.13	74.62
	8	35.07	47.56	55.63	58.25	58.91
	10	33.05	41.02	46.47	52.14	55.85
D	0	8.29	10.97	11.34	12.43	13.31
	2	16.36	17.67	19.63	25.09	28.36
	4	19.89	33.99	37.09	44.07	45.82
	6	17.96	29.45	30.76	36.44	39.71
	8	17.21	26.04	28.58	33.60	33.60
	10	15.06	20.94	22.90	28.79	30.54

อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่มีผลต่อค่า Unsoaked และ Soaked CBR พบว่า ค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งให้ค่ากำลังของดินมีค่าสูงสุดที่ 4% ของน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมากขึ้นค่ากำลังของดินลูกรังก็จะไม่เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ค่ากำลังของดินลูกรังลดลงโดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังภาพที่ 35-42 เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด B โดยผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของดินแห้งที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่า ค่ากำลังของดินลูกรังจะมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 109.09, 123.27, 116.50, 87.27 และ 76.36% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 2.00, 2.26, 2.14, 1.60 และ 1.40 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 54.54% ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าว

ไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรัง พบว่า จะให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตรา ส่วนผสม

เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด D โดยผสมแคลเซียมคาร์บอเนต เหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของดินแห้งที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่า กำลังของดินลูกรังจะมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 50.62, 85.09, 69.82, 60.25 และ 56.73% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 2.30, 3.86, 3.17, 2.73 และ 2.57 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง ซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 22.04% ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรัง พบว่า จะให้ค่า Unsoaked และ Soaked CBR สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตราส่วนผสมเช่นเดียวกับดินลูกรัง เกรด B โดยค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 3 วัน ของดินลูกรังเกรด B และ D สรุปไว้ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 3 วัน ของดินลูกรังเกรด B และ D

		ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)					
		0	2	4	6	8	10
Grade B	Unsoaked CBR (%)	54.54	109.09	123.27	116.5	87.27	76.36
	อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.00	2.00	2.26	2.14	1.60	1.40
Grade D	Unsoaked CBR (%)	22.04	50.62	85.09	69.82	60.25	56.73
	อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.00	2.30	3.86	3.17	2.73	2.57

อิทธิพลของอายุการบ่มที่มีต่อค่า CBR เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 43-50 พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 14 วันนั้นค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 14 ถึง 28 วัน ค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่าง ต่อเนื่องช้าๆ โดยทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ผสมดินลูกรังมีแนวโน้มการพัฒนา ค่า CBR ไปในแบบเดียวกัน เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด B ผสม

แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 123.27, 137.89, 157.08 และ 165.81% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 1.79, 2.00, 2.27 และ 2.40 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% หลังบดอัดซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 69.05% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า CBR มีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น

เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า Unsoaked CBR มีค่าเท่ากับ 85.09, 93.82, 113.45 และ 117.81% ตามลำดับ ซึ่งค่า Unsoaked CBR เพิ่มขึ้นประมาณ 2.02, 2.23, 2.70 และ 2.80 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% หลังบดอัดซึ่งมีค่า Unsoaked CBR เท่ากับ 42.09% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า CBR มีการพัฒนาสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับดินลูกรังเกรด B โดยค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% สรุปไว้ดังตารางที่ 21

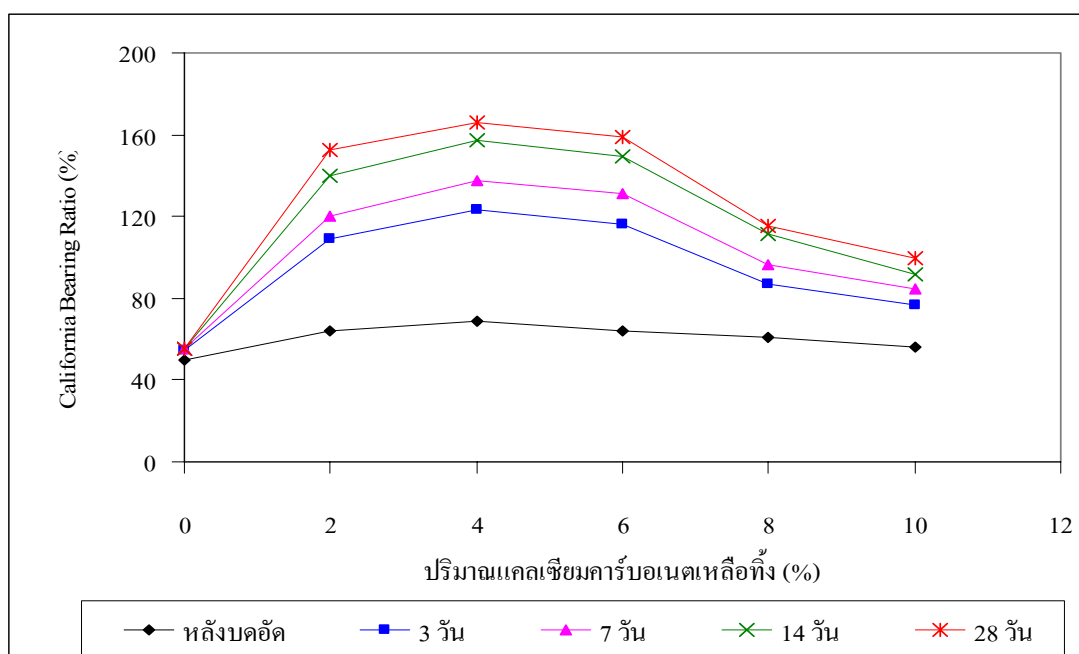
ตารางที่ 21 ค่า Unsoaked CBR และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4%

		อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
Grade B	Unsoaked CBR (%)	69.05	123.27	137.89	157.08	165.81
	อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.00	1.79	2.00	2.27	2.40
Grade D	Unsoaked CBR (%)	42.09	85.09	93.82	113.45	117.81
	อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)	1.00	2.02	2.23	2.70	2.80

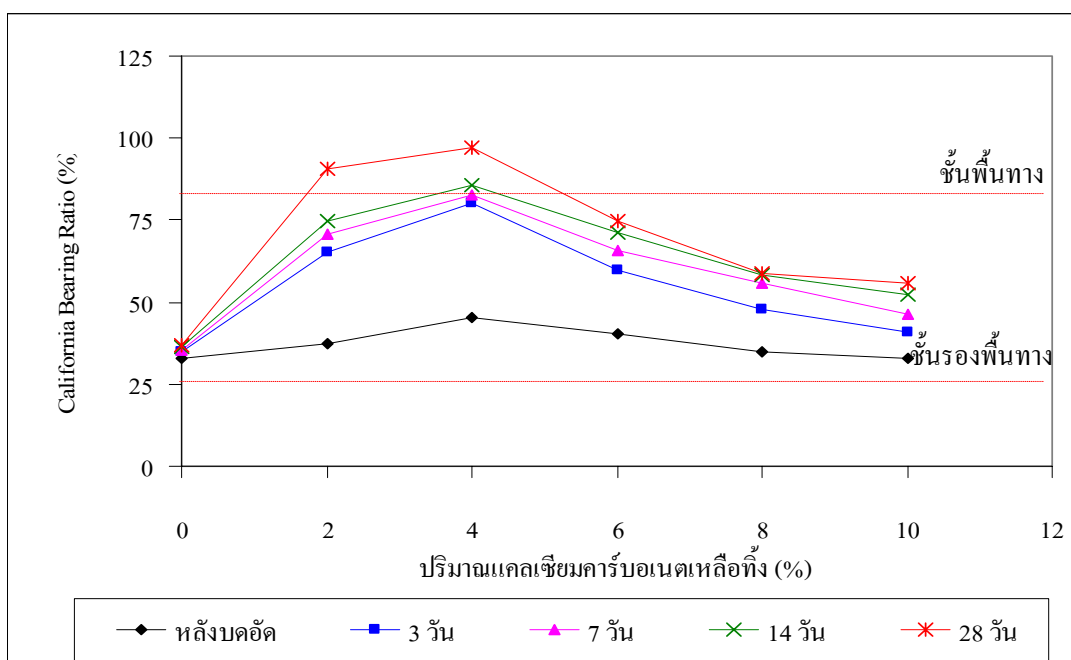
สมมติฐานสาเหตุอาจเนื่องจากเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรัง อาจทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration อันเนื่องมาจากแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ทำปฏิกิริยากับน้ำในดินทันทีที่ถูกผสม ก่อให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน และสร้างรูปร่างโครงข่ายที่แข็งแรงต่อเนื่องกัน มากบ้างน้อยบ้างตามขนาดผลึกของเม็ดดิน ทำให้เม็ดดินที่ถูกทำปฏิกิริยาเข้ามาใกล้ชิดกันส่งผลให้กำลังของดินลูกรังเพิ่มขึ้นในทันทีที่มีการผสม ในส่วนของสมมติฐานการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นตาม

อายุการบ่มนั้นอาจเนื่องจากขบวนการจับตัวกันของเม็ดดิน หลังจากการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพลงไปดินจะทำให้อนุภาคนาอดินเหนียวเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เม็ดดินมีโครงสร้างที่แข็งแรง โดยอาจเกิดรวมกับปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction หรือ การเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาในช่วงอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นนี้ก็จะเกิดสารผลิตภัณฑ์ใหม่ โดย Ca^{2+} จะทำปฏิกิริยากับ Silica และ Alumina ในดินแล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ ได้แก่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งเป็นสารที่จะแข็งตัวตามเวลาและเชื่อมประสานเม็ดดินเข้าด้วยกันส่งผลให้ดินมีกำลังสูงขึ้น โดยปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction นำที่จะเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังของดินมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่จำกัดในดิน ถ้ามีการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเพิ่มมากขึ้นกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดิน แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้นนี้จะไม่ทำให้กำลังเพิ่มขึ้น และอาจทำให้กำลังลดลงด้วย

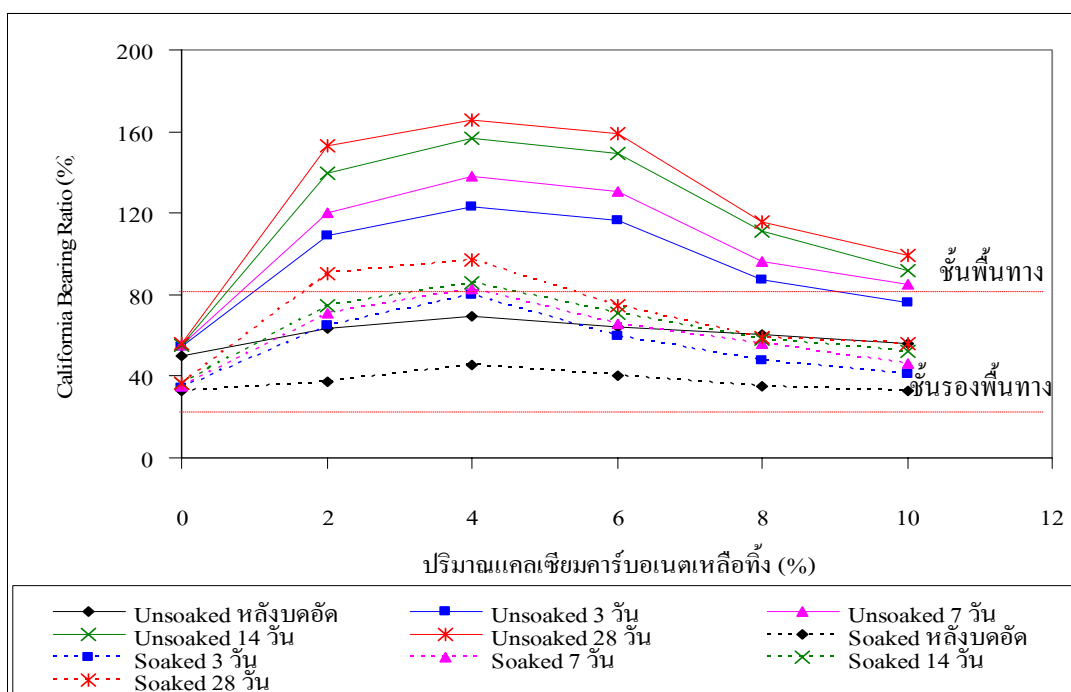
อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบยังมิได้มีการศึกษาถึงขบวนการและกลไกของโครงสร้างและการจับตัวกันของเม็ดดินเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง ดังนั้นจึงควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) หรือ X-Ray Diffraction Method (XRD) เพื่อศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างของเม็ดดินและการจัดตัวที่แท้จริงต่อไป



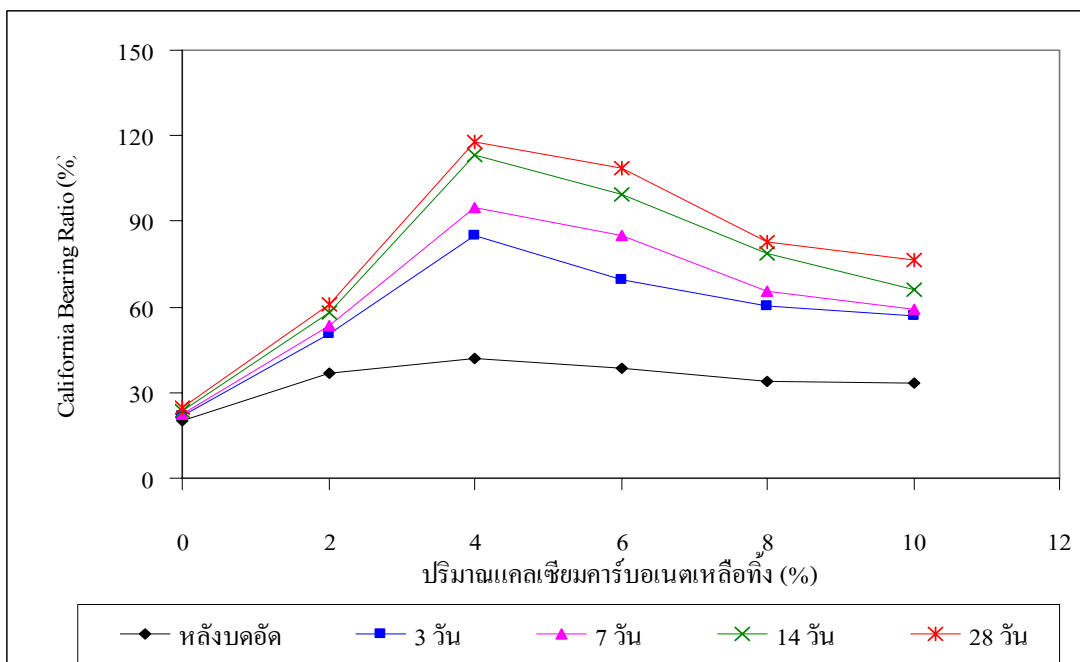
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
ผสมดินลูกรังเกรด B



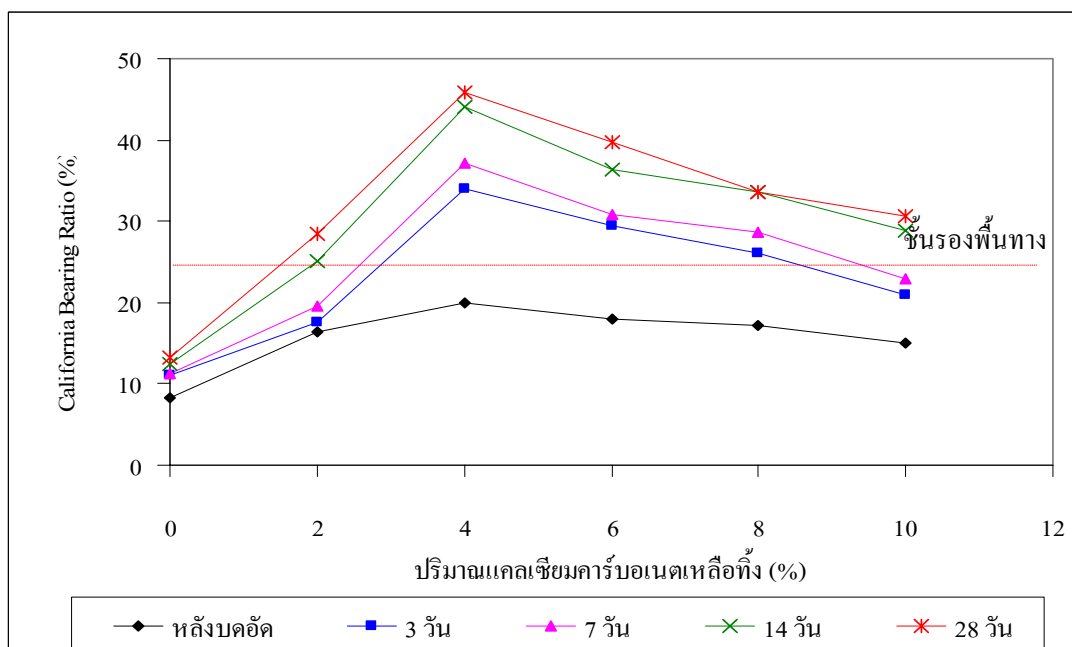
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอนตเหลือทิ้ง
ผสมดินลูกรังเกรด B



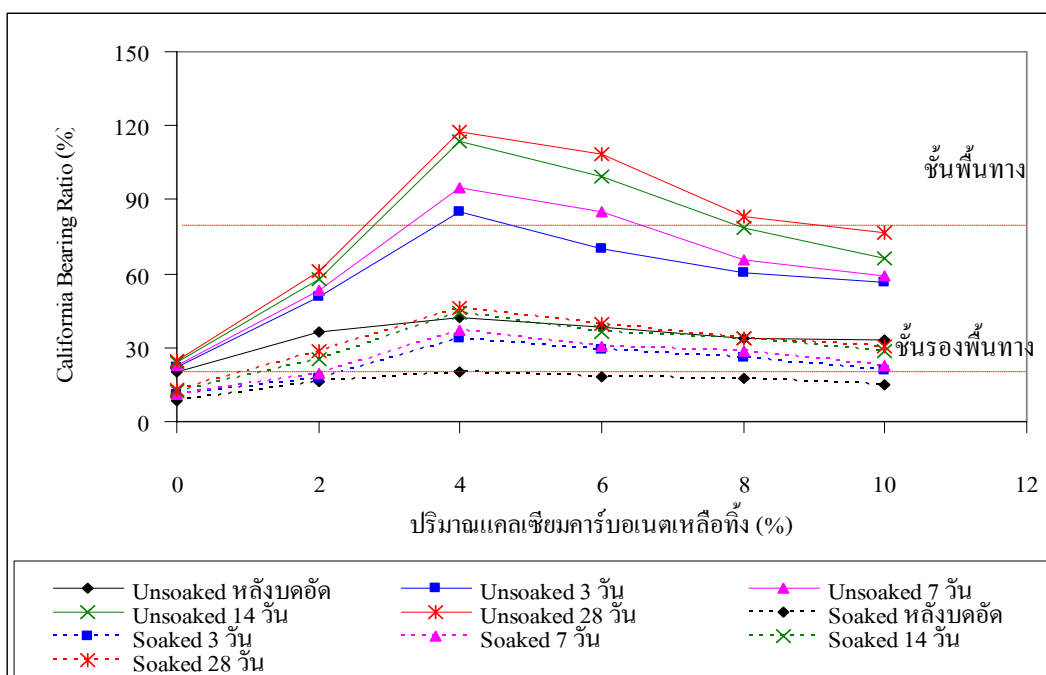
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B



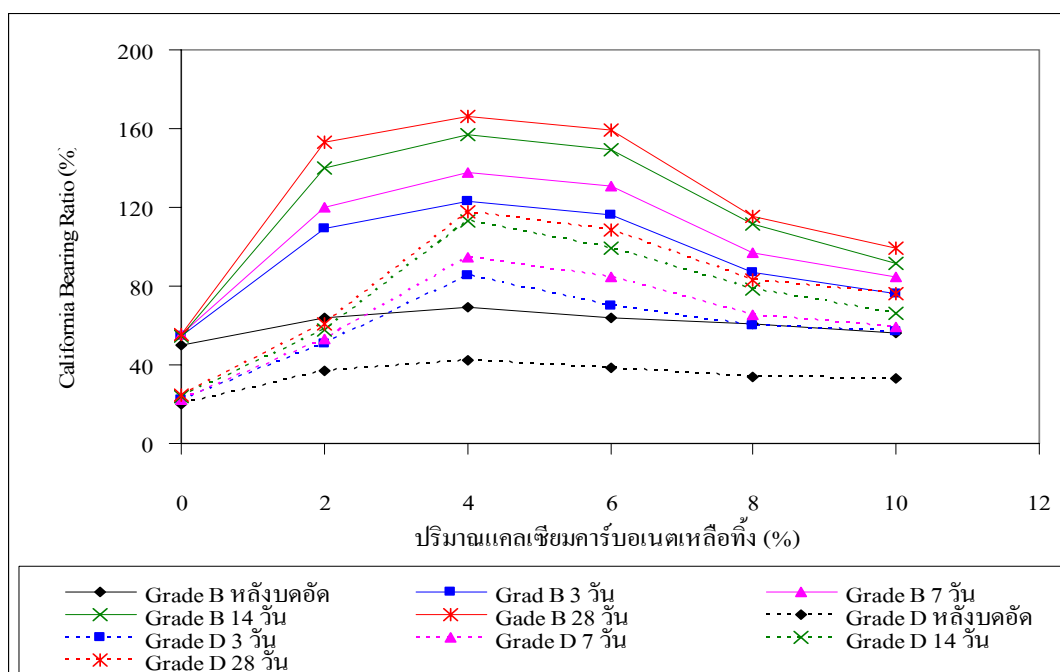
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D



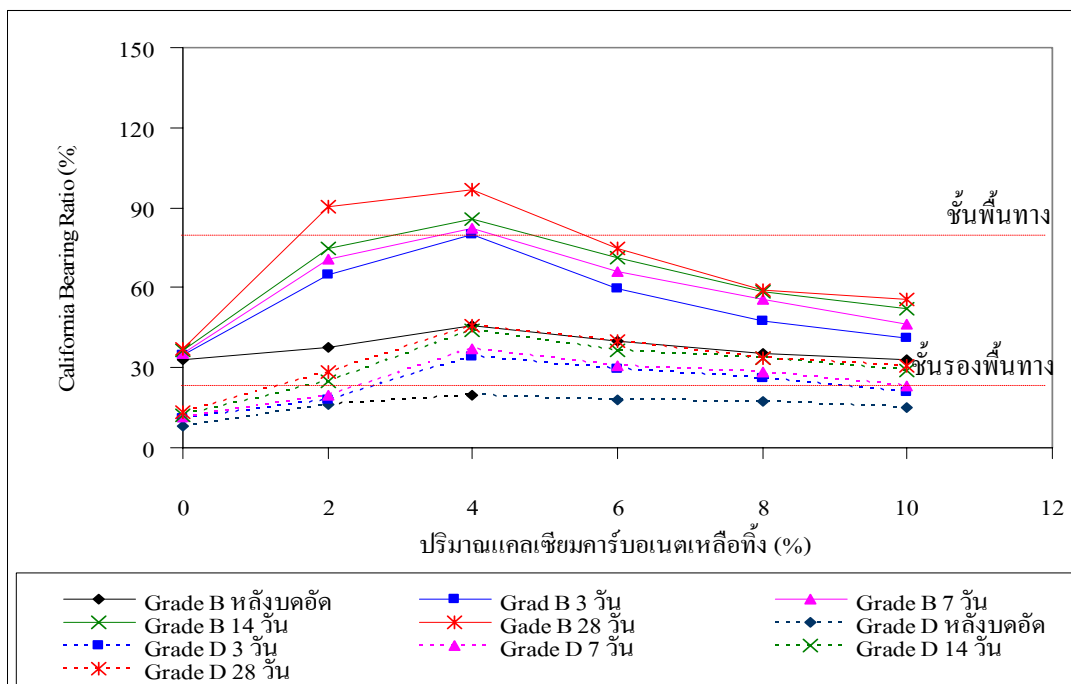
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D



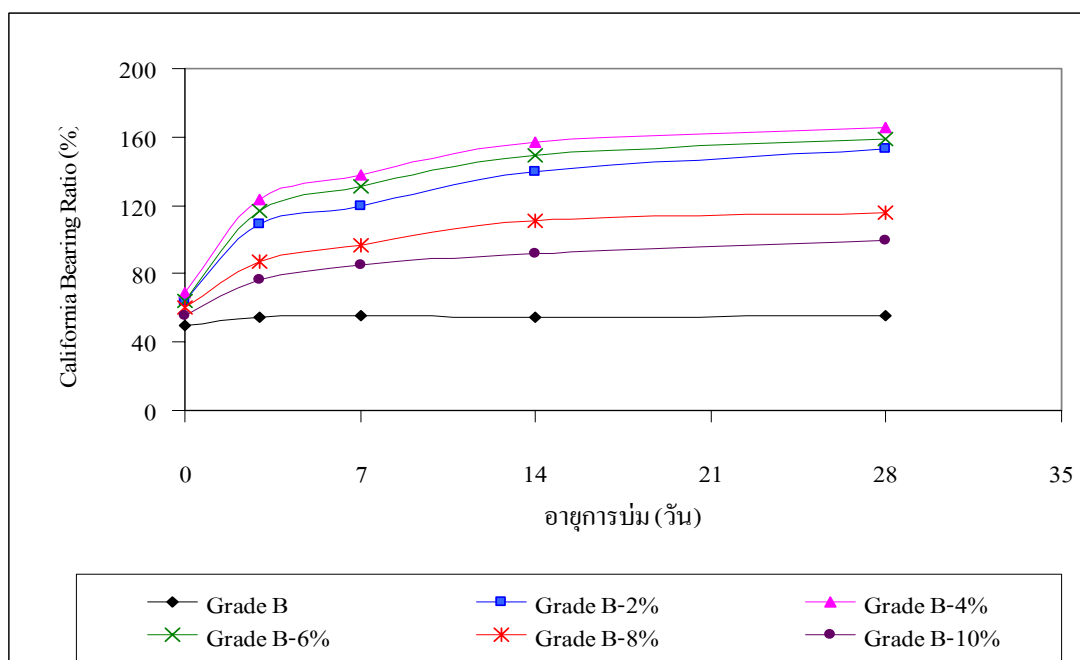
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคลอไรด์เหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D



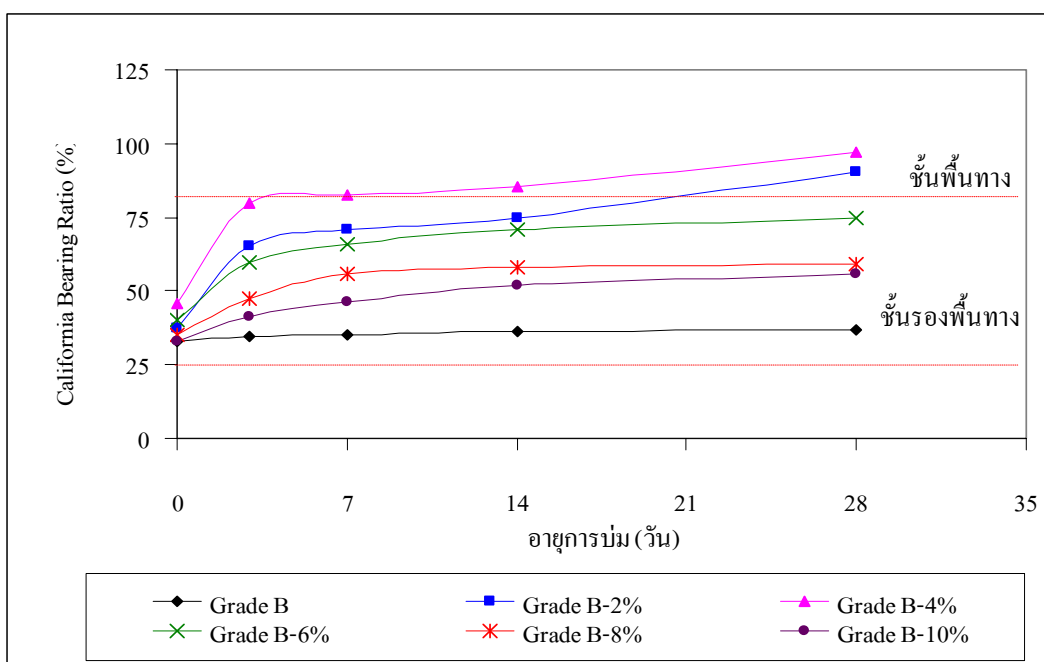
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคลอไรด์เหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B และ D



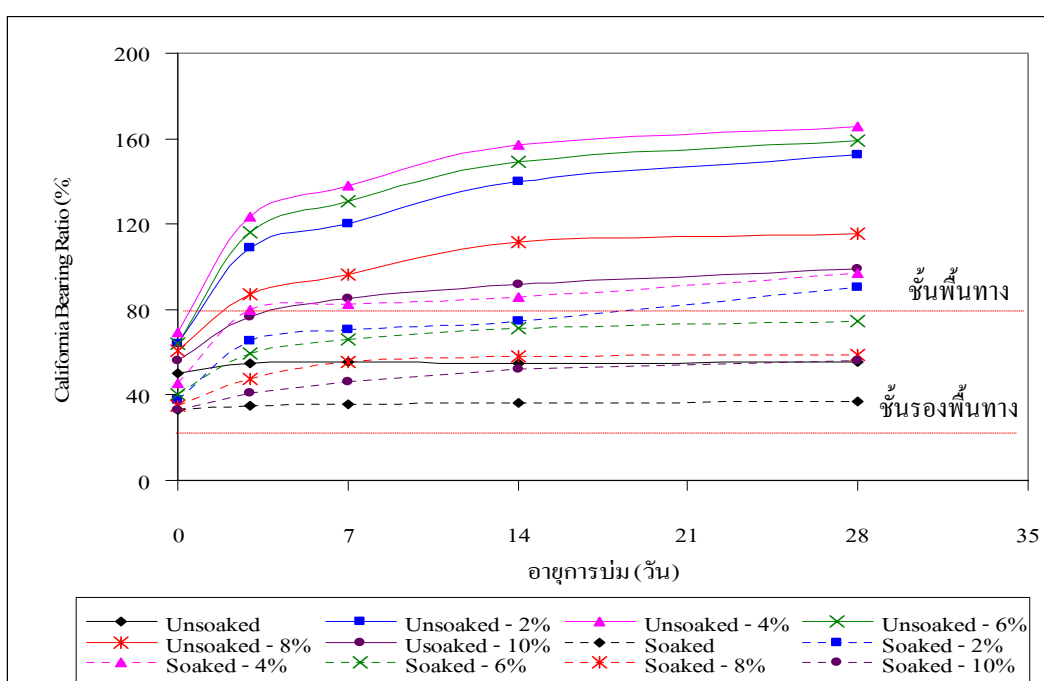
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
ผสมดินลูกรังเกรด B และ D



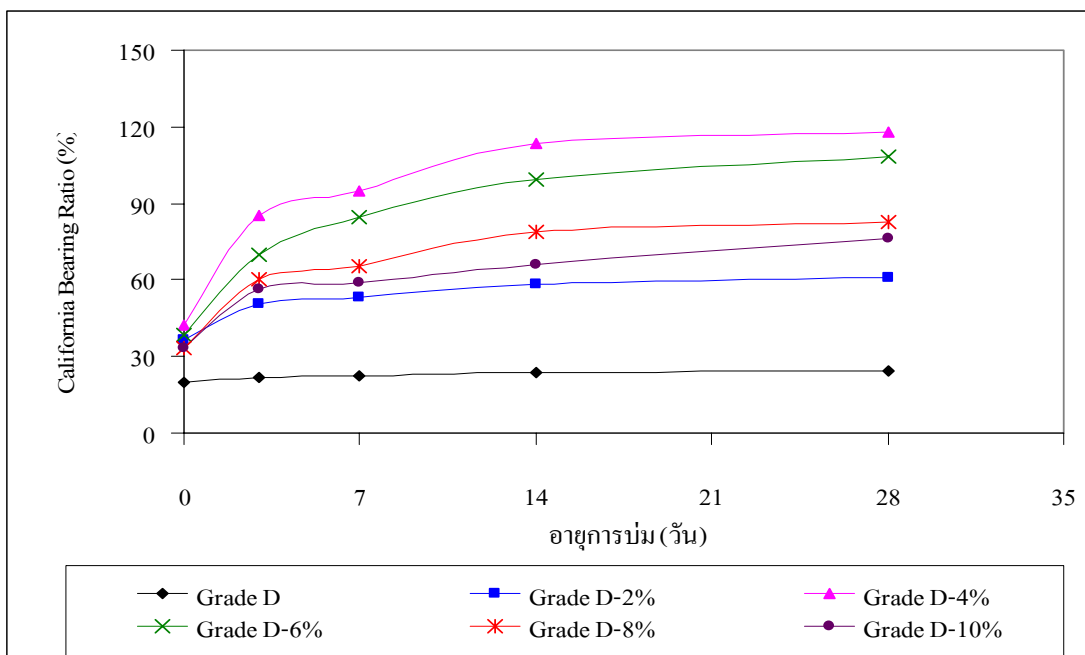
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสม
แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



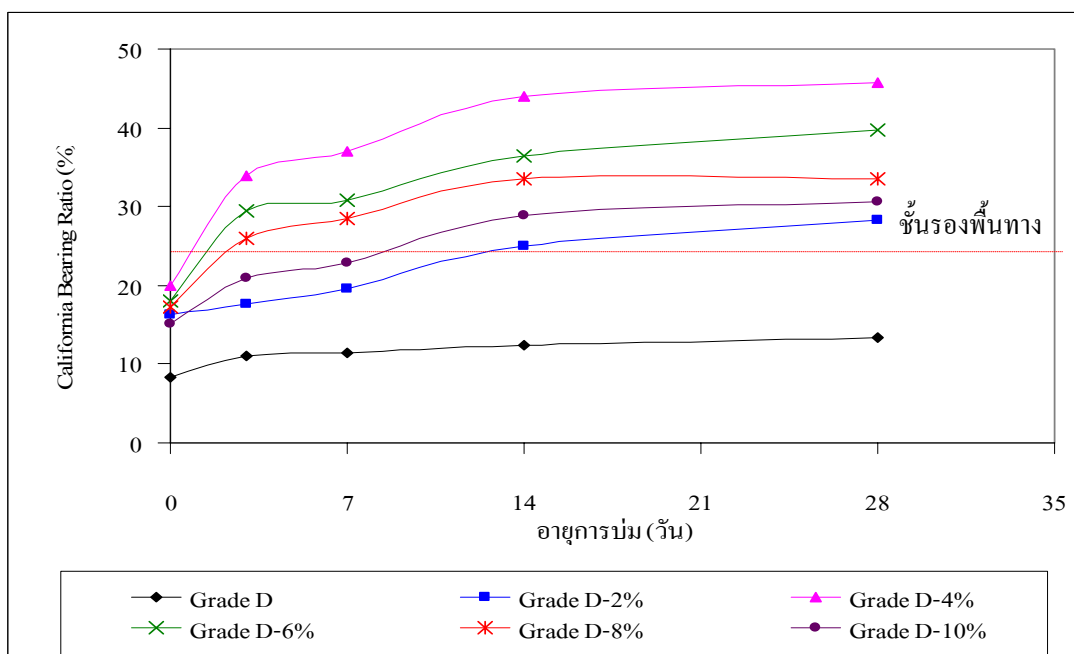
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



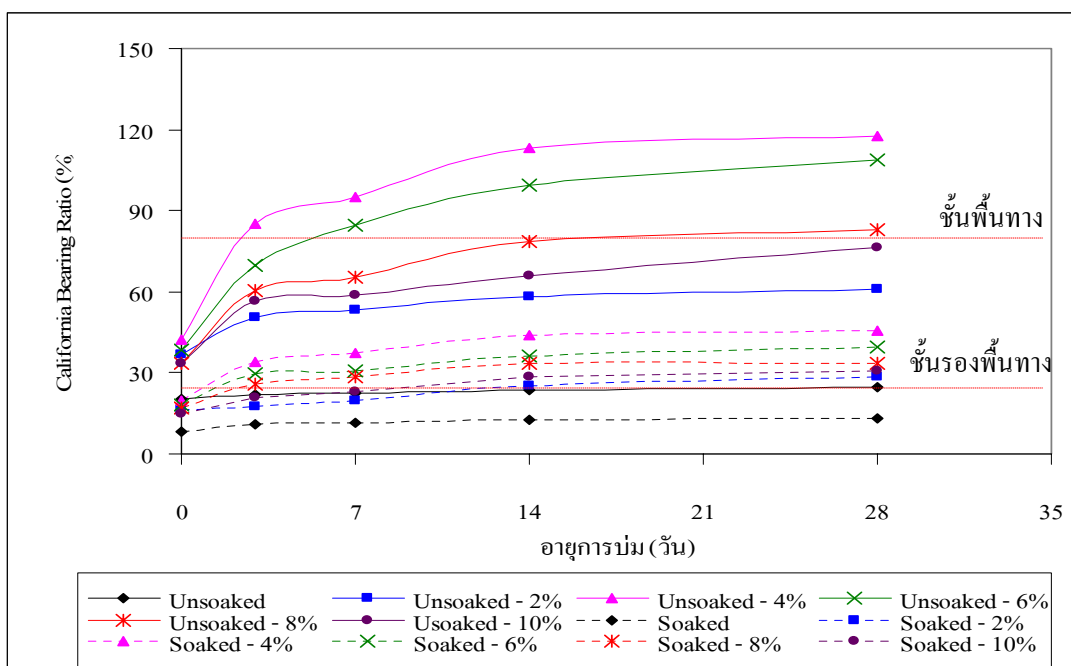
ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



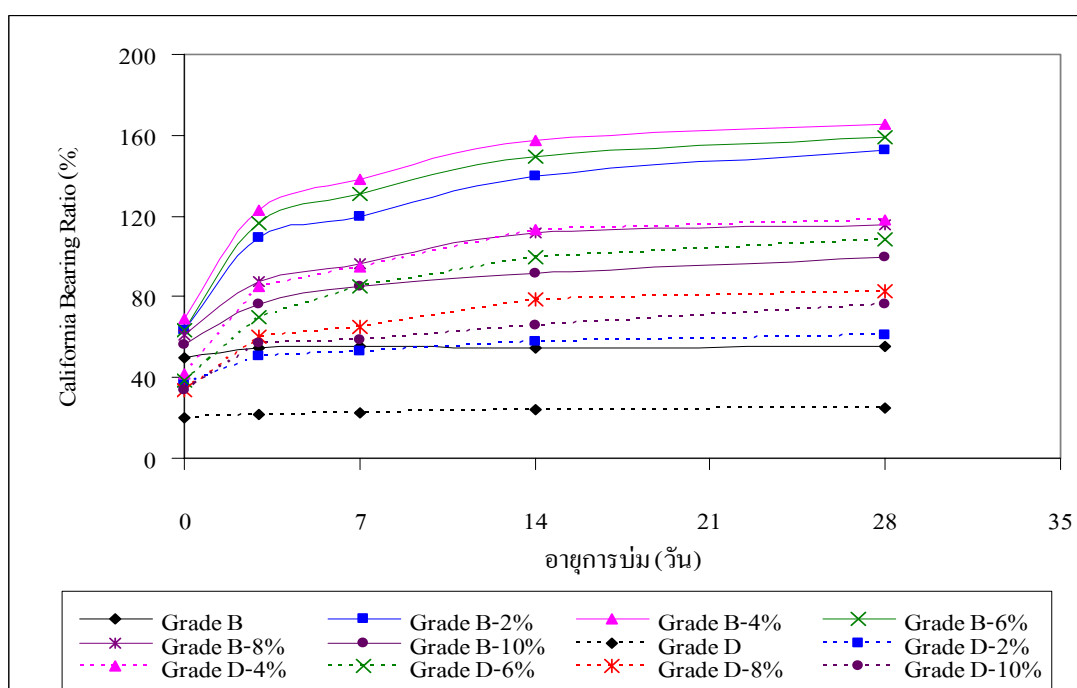
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



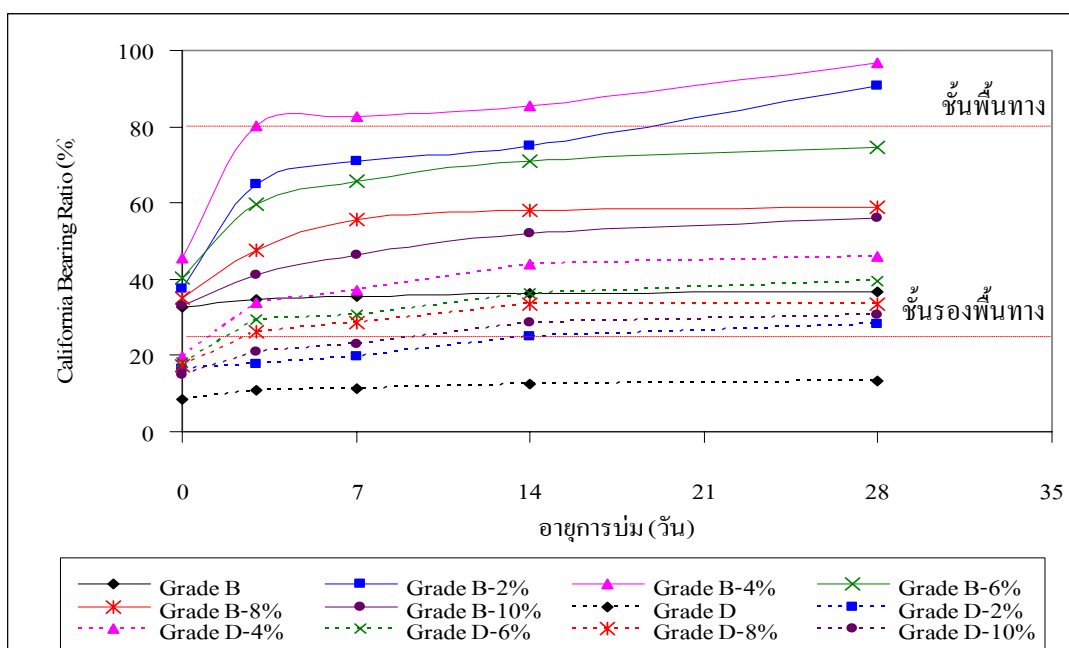
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked และ Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

การคาดการณ์กำลังของดินลูกรัง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า California Bearing Ratio ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของดินแห้งและอายุการบ่มต่างๆ โดยพิจารณาอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm และสร้างสมการเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$\text{CBR} = a \log(t) + b \quad (4)$$

และ $\text{CBR} = a(t) + b \quad (5)$

เมื่อ $\text{CBR} = \text{California Bearing Ratio, \%}$

$t = \text{อายุการบ่ม, วัน}$

$a, b = \text{ค่าคงที่ของสมการ}$

รายละเอียดของแต่ละสมการแสดงไว้ในภาพที่ 51-54 และ ตารางที่ 22-23 โดยสมการต่างๆ มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำมาคาดการณ์กำลังของดินลูกรังในช่วงอายุการบ่มต่างๆ ได้ สำหรับ อัตราปฏิกิริยาของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากสมการที่ (4) และ (5) โดยพิจารณาจากค่าคงที่ a ในแต่ละสมการจะพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4 และ 6 % ของน้ำหนักดินแห้งโดยภาพรวมอัตราปฏิกิริยาน่าจะเกิดมากที่สุด ในช่วง 4-6% ของการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง จากนั้นปฏิกิริยาจะมีแนวโน้มลดลงตาม ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มมากขึ้น

อนึ่งสมการที่นำเสนอไว้เพื่อใช้ทำนายถึงค่า CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ในครั้งนี้จะมีความถูกต้องเฉพาะที่อยู่ในช่วงของข้อมูลปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 0-10% ของน้ำหนักดินแห้ง, อายุการบ่มไม่เกิน 28 วัน และมีการกระจายขนาดของเม็ดดินตามที่กำหนดไว้เท่านั้น จึงไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนายผลในช่วงที่ไม่มีการทดสอบ

ตารางที่ 22 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง	ดินลูกรังเกรด B			
	CBR = a Log(t) + b	R ²	CBR = a(t) + b	R ²
Unsoaked CBR.	0	CBR = 0.9590 Log(t) + 54.149	0.769	
	2	CBR = 46.5835 Log(t) + 84.761	0.979	
	4	CBR = 45.6924 Log(t) + 101.280	0.983	
	6	CBR = 45.6072 Log(t) + 94.334	0.989	
	8	CBR = 31.0572 Log(t) + 72.276	0.965	
	10	CBR = 23.4932 Log(t) + 65.037	0.999	
Soaked CBR.	0	CBR = 2.3017 Log(t) + 33.527	0.991	
	2		CBR = 0.9869(t) + 62.494	0.9865
	4		CBR = 0.6714(t) + 77.504	0.9843
	6	CBR = 15.7485 Log(t) + 52.385	0.993	
	8	CBR = 11.6524 Log(t) + 43.681	0.860	
	10	CBR = 15.6221Log(t) + 33.578	0.995	

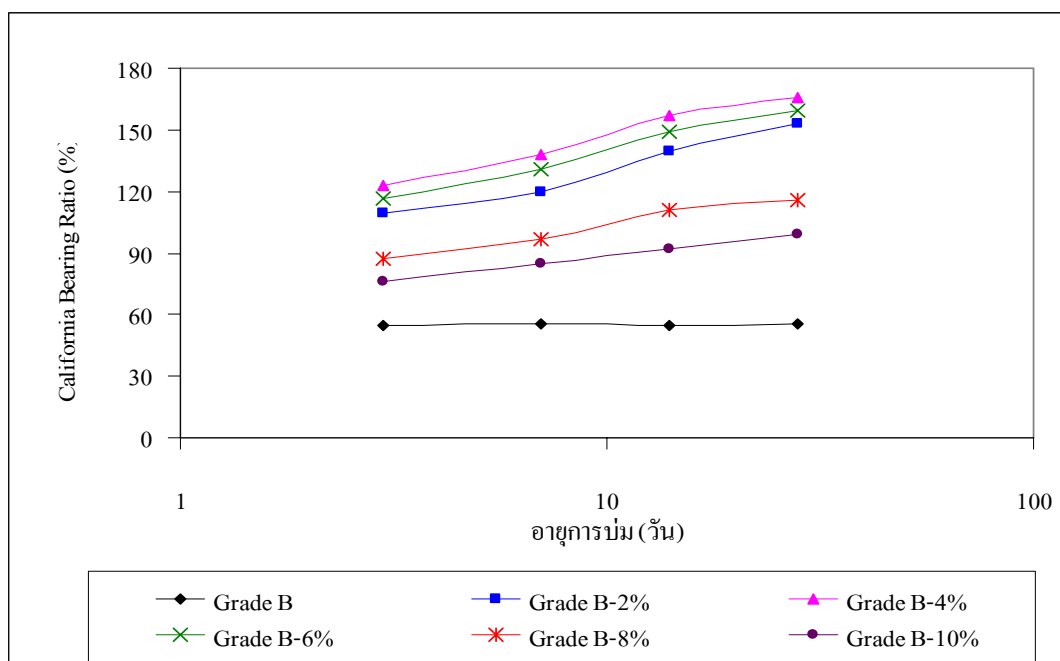
ตารางที่ 23 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง	ดินลูกรังเกรด D			
	CBR = a Log(t) + b	R ²	CBR = a(t) + b	R ²
Unsoaked CBR.	0	CBR = 2.8161 Log (t) + 20.478	0.951	
	2	CBR = 11.2069 Log(t) + 44.772	0.978	
	4	CBR = 36.2772 Log(t) + 67.305	0.952	
	6	CBR = 40.8823 Log(t) + 50.689	0.994	
	8	CBR = 25.1833 Log(t) + 47.200	0.947	
	10		CBR = 0.8032(t) + 54.086	0.9943
Soaked CBR.	0	CBR = 0.2185 Log(t) + 10.779	0.959	
	2	CBR = 11.5778 Log(t) + 11.354	0.956	
	4	CBR = 13.1761 Log(t) + 27.347	0.947	
	6	CBR = 11.2173 Log(t) + 23.110	0.933	
	8	CBR = 8.6374 Log(t) + 22.000	0.901	
	10	CBR = 10.7293 Log(t) + 15.290	0.938	

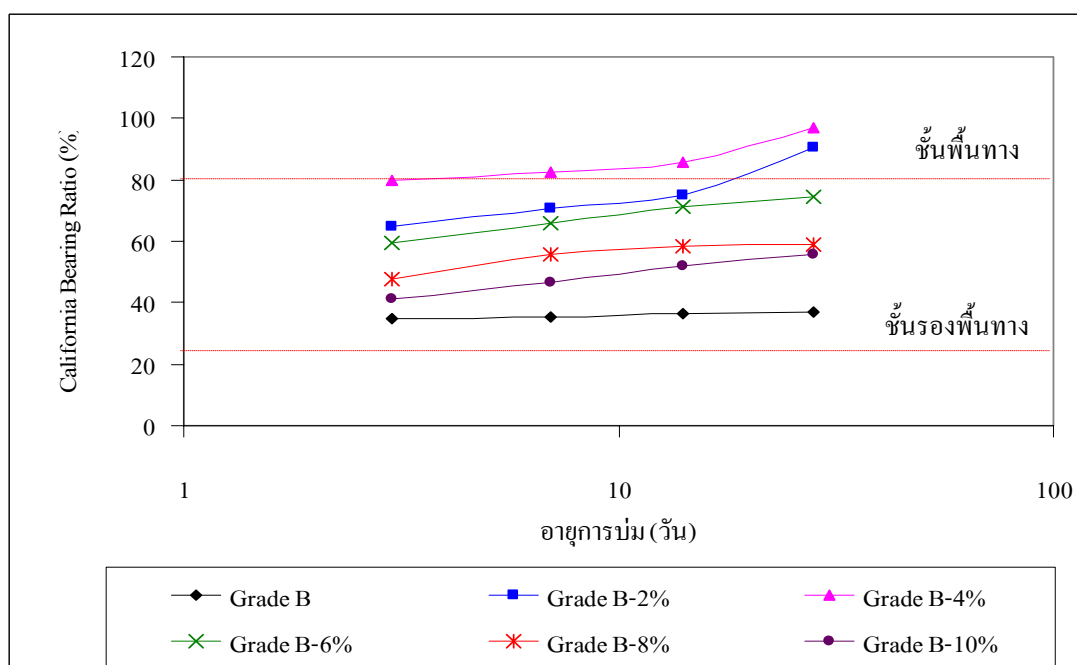
อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง กับอายุการบ่มในช่วง 3 ถึง 14 วัน และ ช่วงอายุการบ่ม 14 ถึง 28 วัน พบว่าค่า CBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 14 วันนั้นค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 14 ถึง 28 วัน ค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช้า ๆ โดยทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ผสมดินลูกรังมีแนวโน้มการพัฒนาค่า CBR ไปในแบบเดียวกัน เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ในช่วง 3 ถึง 14 วัน พบว่าดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% มีค่าเพิ่มขึ้นสูงที่สุดประมาณ 6.29 % ต่ออายุการบ่ม 1 วัน และช่วงอายุการบ่ม 14 ถึง 28 วัน พบว่าดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2% มีค่าเพิ่มขึ้นสูงที่สุดประมาณ 1.12 % ต่ออายุการบ่ม 1 วัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง สรุปไว้ดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

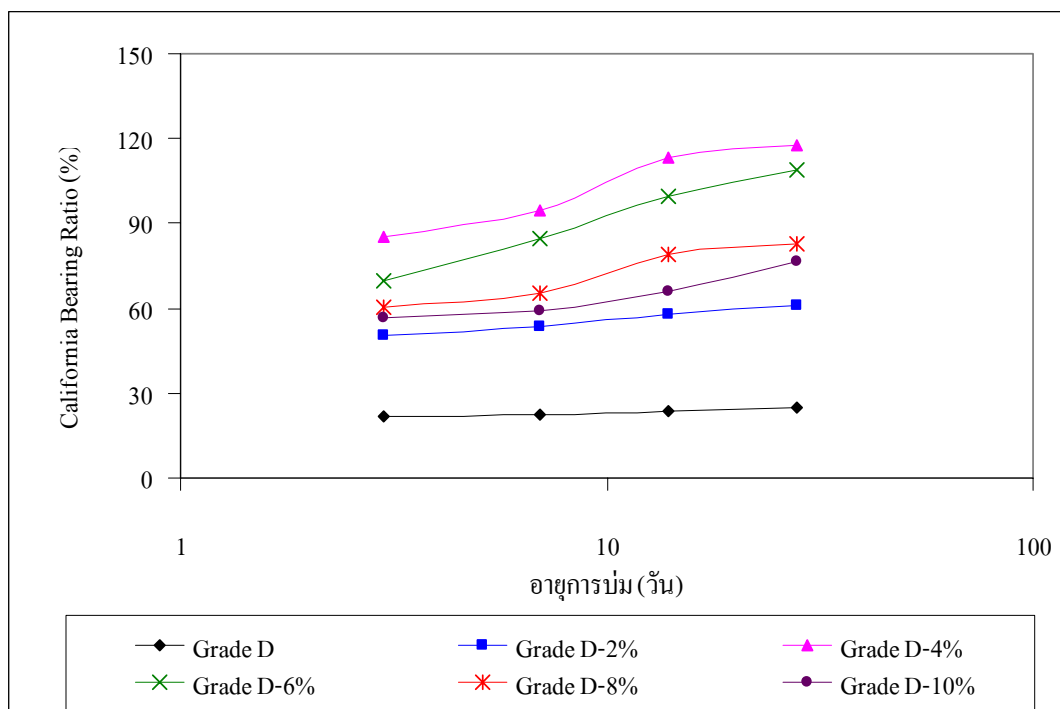
อัตราการเพิ่มของค่า CBR (% ต่ออายุการบ่ม 1 วัน)					
	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	Unsoaked		Soaked	
		14 วัน	28 วัน	14 วัน	28 วัน
Grade B	0	0.34	0.05	0.25	0.05
	2	5.42	0.94	2.68	1.12
	4	6.29	0.62	2.86	0.81
	6	6.10	0.72	2.21	0.25
	8	3.61	0.30	1.66	0.05
	10	2.55	0.55	1.36	0.27
Grade D	0	0.27	0.06	0.30	0.06
	2	1.53	0.22	0.62	0.23
	4	5.07	0.31	1.73	0.13
	6	4.37	0.65	1.32	0.23
	8	3.23	0.29	1.17	0.01
	10	2.34	0.73	0.98	0.13



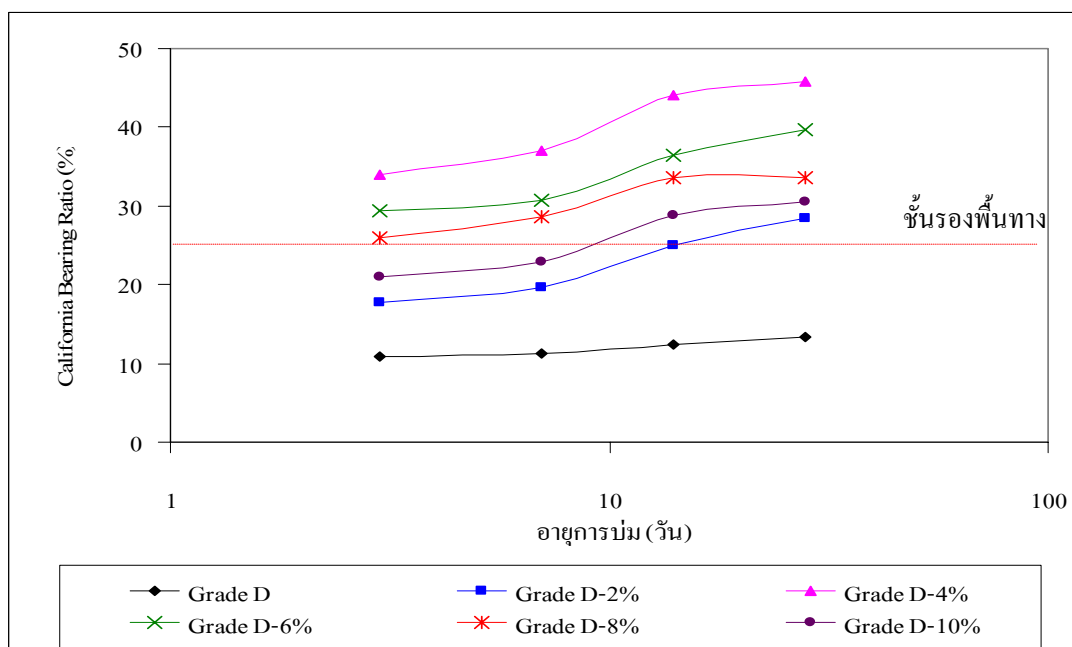
ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR และอายุการบ่มในแกนแบบ logarithm ของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

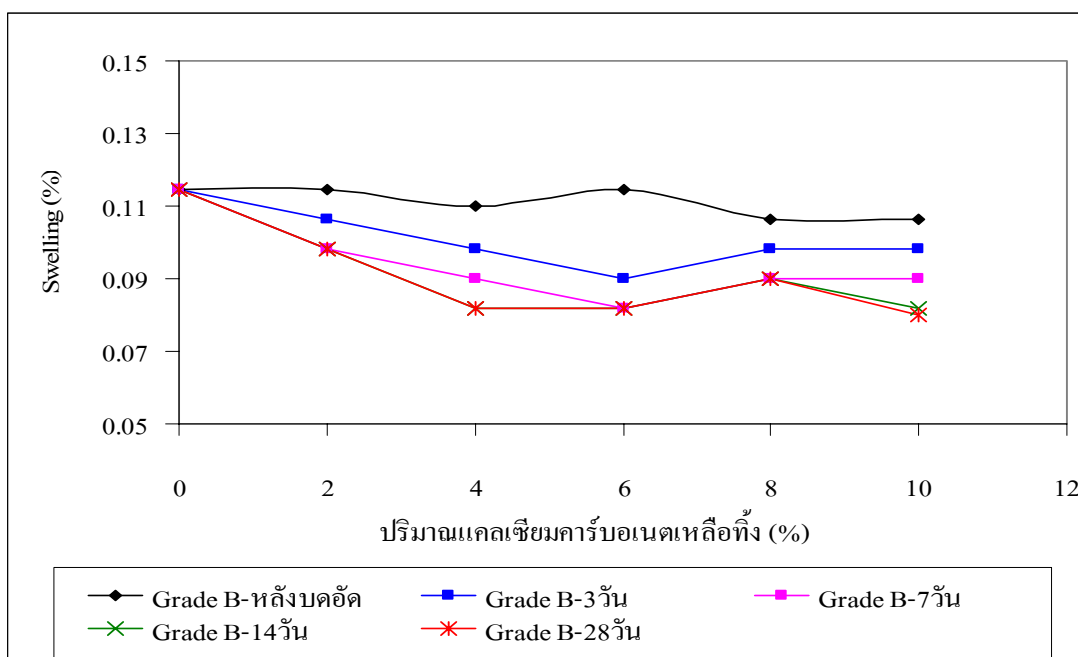
ค่าการบวมตัวของดิน (Swelling)

จากผลการทดสอบ California Bearing Ratio แบบ Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งโดยใช้อัตราส่วนผสม 2, 4, 6, 8 และ 10% โดยน้ำหนักของดินแห้ง จากนั้นวัดค่าการบวมตัวของดิน (Swelling) ผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 25 และภาพที่ 55-60 พบว่า เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมากขึ้น ค่าการบวมตัวของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าน้อยลงและค่าการบวมตัวของดินลูกรังเกรด D นั้นจะมีค่าลดลง

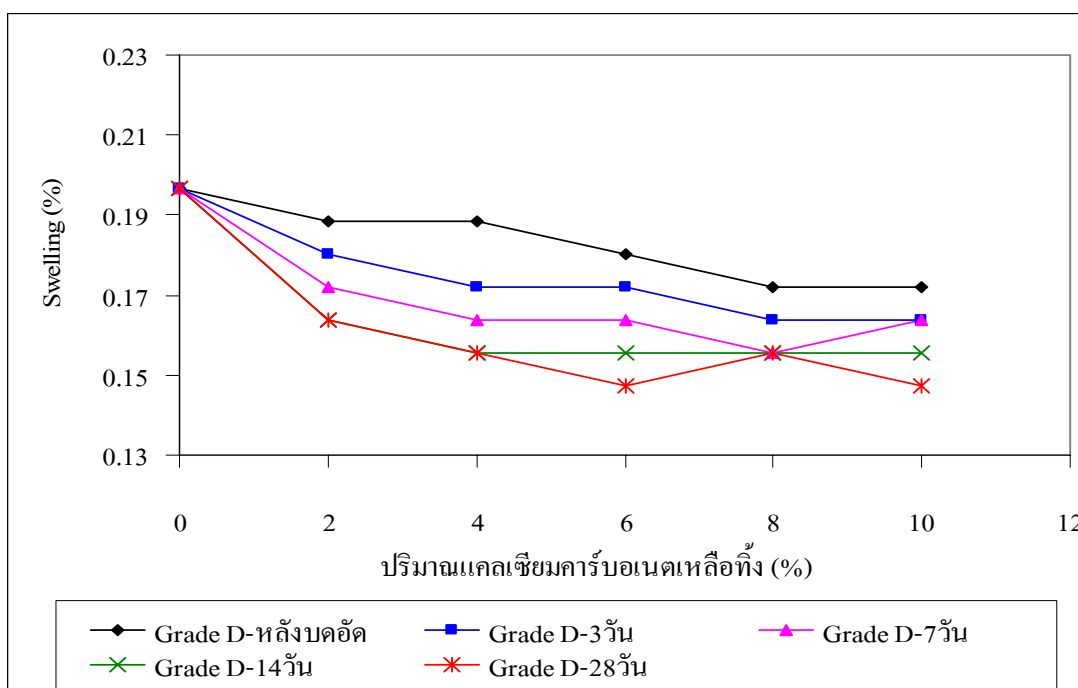
เมื่อพิจารณาอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง พบว่า ค่าการบวมตัวของดินจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 25 ค่าการบวมตัวของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

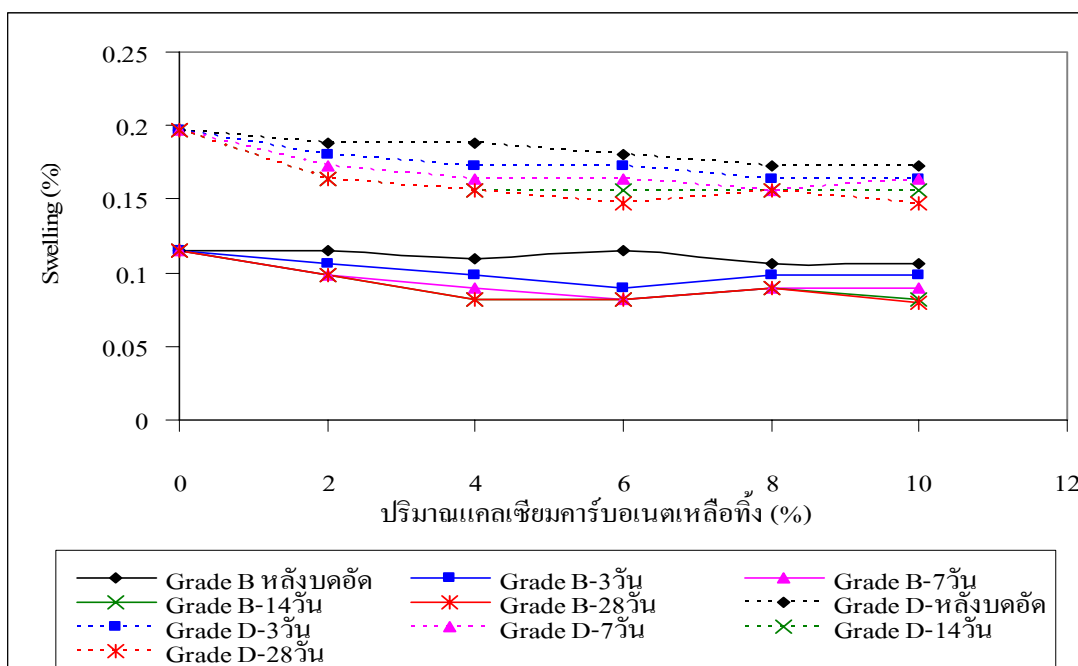
ค่าการบวมตัว (Swelling)						
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	อายุการบ่ม (วัน)				
		หลังบดอัด	3	7	14	28
B	0	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
	2	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
	4	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08
	6	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08
	8	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09
	10	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08
D	0	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	2	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16
	4	0.19	0.17	0.16	0.16	0.16
	6	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15
	8	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16
	10	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15



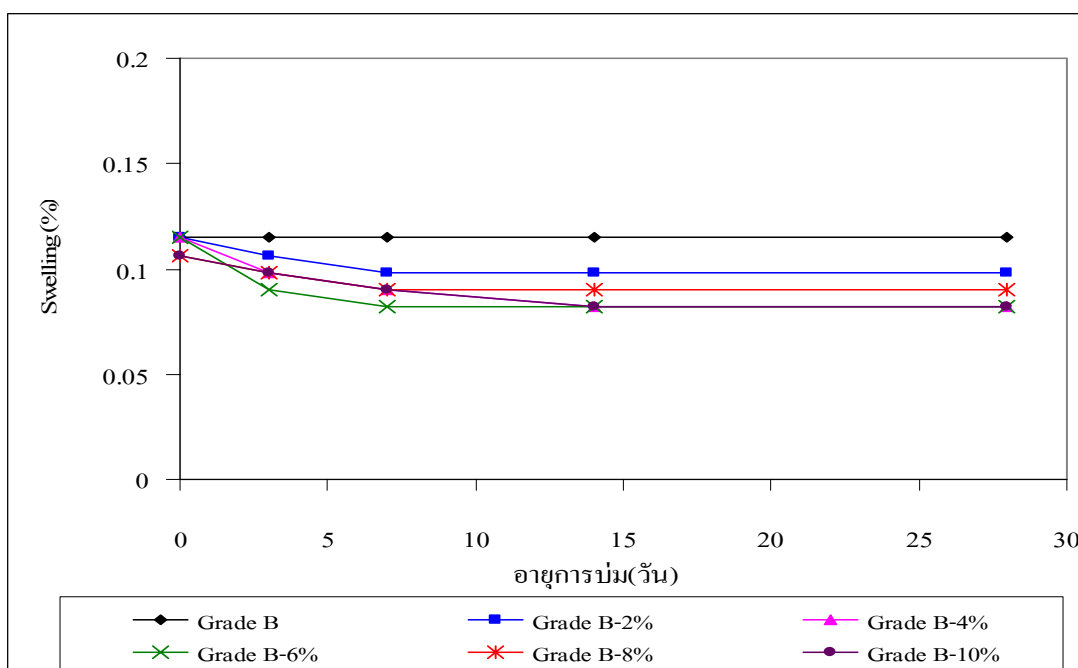
ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B



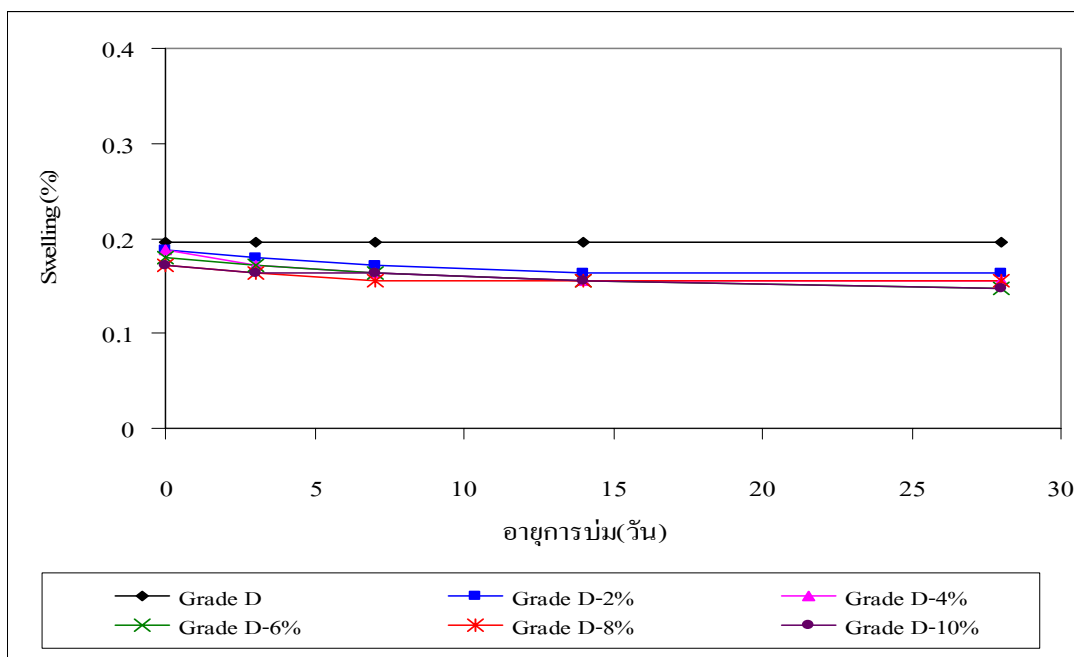
ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด D



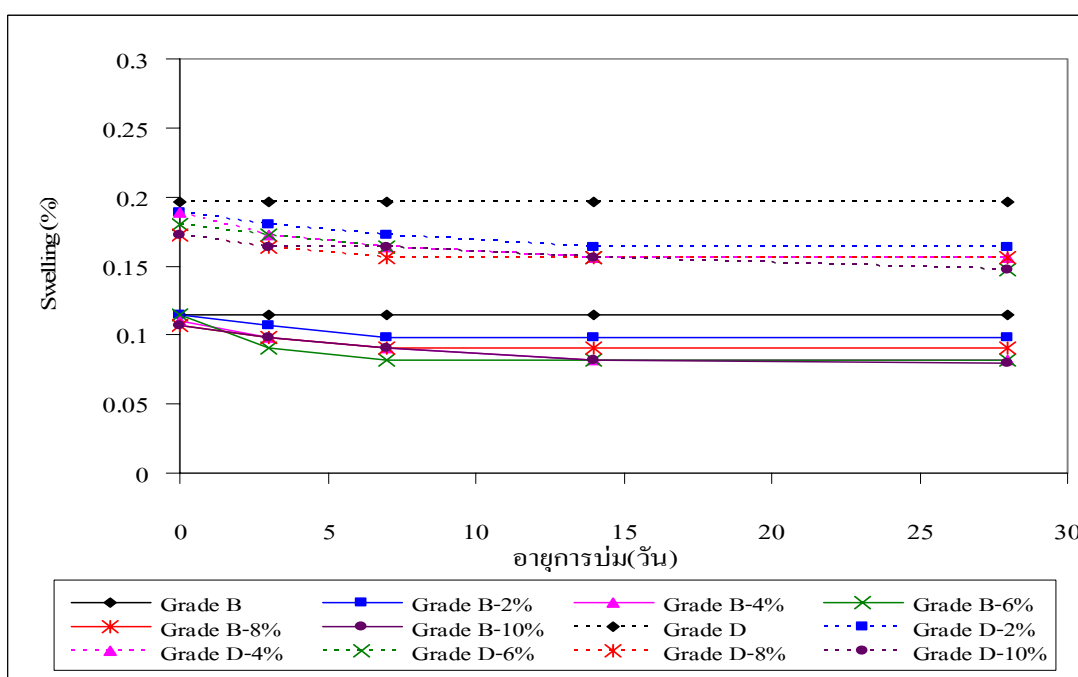
ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งผสมดินลูกรังเกรด B และ D



ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับและอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

เมื่อพิจารณาค่าการบวมตัว กับค่า Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ทุกปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่ม แสดงไว้ดังภาพที่ 61 พบว่า ค่าการบวมตัวของดิน จะมีแนวโน้มลดลงตามค่า Soaked CBR ที่เพิ่มขึ้นสมมติฐานของการลดลงของค่าการบวมตัวของ ดินลูกรัง อาจอธิบายได้ว่า แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ผสมลงในดินจะทำให้ดินมีแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างเม็ดดินมากขึ้นส่งผลให้ดินมีความแข็งแรงขึ้น ดังสาเหตุที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ส่งผลให้ดินมี ค่าการบวมตัวน้อยลง

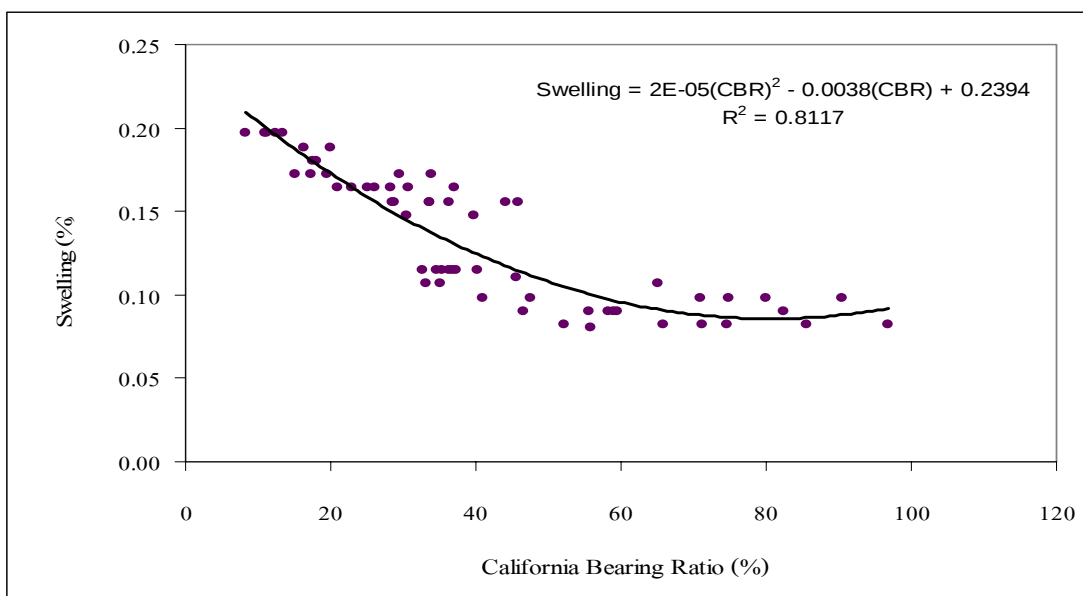
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling ของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้น ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของดินแห้งและอายุการบ่มต่าง ๆ โดยพิจารณาทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D และสร้างสมการเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถจัด ให้อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$\text{Swelling(B)} = 0.0005x^2 - 0.0066x + 0.1141 \quad (6)$$

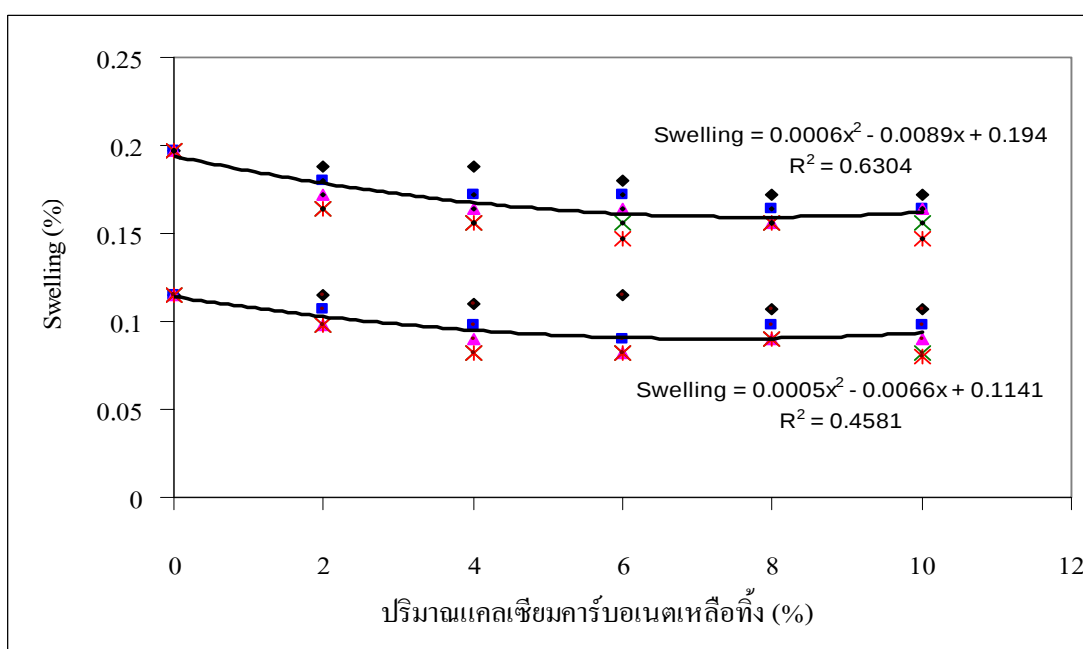
$$\text{Swelling(D)} = 0.0006x^2 - 0.0089x + 0.194 \quad (7)$$

เมื่อ	Swelling	=	ค่าการบวมตัวของดินลูกรัง, %
x		=	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง, %

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุ การบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D แสดงไว้ในภาพที่ 62 เมื่อพิจารณาค่า R^2 มีค่าน้อย แสดงถึง ความแปรปรวนของผลการทดสอบ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้งไม่ส่งผลที่ชัดเจนมากนักกับค่าการบวมตัวของดินลูกรัง อนึ่งสมการที่นำเสนอ ไว้เพื่อใช้ทำนายถึงค่า Swelling ของดินลูกรังเกรด B และ D ในครั้งนี้จะมีความถูกต้องเฉพาะที่อยู่ ในช่วงของข้อมูลปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 0-10% ของน้ำหนักดินแห้ง, อายุการบ่ม ไม่เกิน 28 วัน และมีการกระจายขนาดของเม็ดดินตามที่กำหนดไว้เท่านั้น จึงไม่แนะนำให้ใช้ ในการทำนายผลในช่วงที่ไม่มีการทดสอบสำหรับอัตราการลดลงของการบวมตัวของดินลูกรังผสม แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งพบว่า ดินลูกรังเกรด B และ D มีอัตราการลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 0.0021 และ 0.0032 % ต่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 1% ของน้ำหนักดินแห้ง ตามลำดับ



ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับ Soaked CBR ทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D



ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling กับทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังเกรด B และ D

คุณสมบัติทางด้านการซึมน้ำ

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยทดสอบทันทีหลังบดอัดและที่อายุการบ่ม 28 วัน ด้วยวิธี Constant Head โดยใช้ความดันเข้าช่วย

อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง แสดงไว้ในตารางที่ 26-27 และภาพที่ 63-68 พบว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มต่ำลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าลดลงต่ำสุดประมาณ 3 เท่า และดินลูกรังเกรด D จะมีค่าลดลงต่ำสุดประมาณ 295 เท่า สมมติฐานของค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังที่ลดลงนี้อาจเป็นเพราะแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีขนาดเล็กและเป็นผงเมื่อนำมาผสมกับดินลูกรังแล้วทำการบดอัดจะทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไป โดยอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจะเข้าไปอุดในช่องว่างภายในมวลดินทำให้ดินลูกรังมีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำต่ำลง

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ที่เตรียมขึ้นผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง พบว่าค่าความซึมน้ำของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าต่ำลงตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้นและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นโดยจะมีค่าลดลงต่ำสุดประมาณ 6 เท่า ในส่วนของดินลูกรังเกรด D เมื่อพิจารณาอายุการบ่มที่ 28 วันพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังจะมีค่าลดลงตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าลดลงต่ำสุดประมาณ 18 เท่า แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ทดสอบทันทีหลังบดอัดพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินลูกรังจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น สมมติฐานของปฏิกิริยาอาจเนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange) และการจับตัวกันของเม็ดดิน (Flocculation) ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและมีอนุภาคใหญ่ขึ้นส่งผลให้น้ำในมวลดินสามารถไหลซึมผ่านได้ดีขึ้น อีกสมมติฐานหนึ่งอาจเนื่องมาจากเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรังจะทำให้ปริมาณความชื้นในมวลดินลดต่ำลงอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) โดยผลของปฏิกิริยาจะทำให้ดินมีค่าพิกัดหดตัว (Shrinkage Limit) สูงขึ้นส่งผลให้รอยแตกในช่องว่างขนาดเล็กในมวลดินขยายใหญ่ขึ้นทำให้น้ำในมวลดินไหลซึมผ่านได้มากขึ้น

ตารางที่ 26 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต
เหลือทิ้งทดสอบทันทีหลังการบดอัด

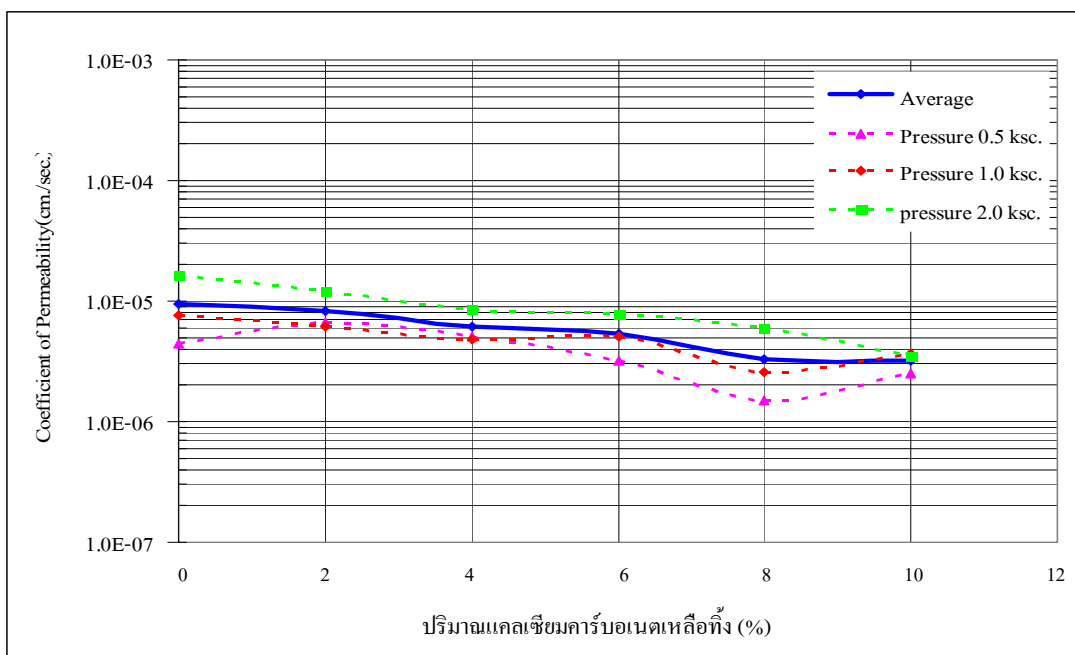
Coefficient of Permeability (cm./sec.)					
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	ความดันที่ใช้ทดสอบ			ค่าสัมประสิทธิ์ ความชื้นน้ำเฉลี่ย
		0.5 ksc.	1.0 ksc.	2.0 ksc.	
B	0	4.39E-06	7.65E-06	1.61E-05	9.39E-06
	2	6.60E-06	6.19E-06	1.22E-05	8.34E-06
	4	5.15E-06	4.80E-06	8.53E-06	6.16E-06
	6	3.21E-06	5.03E-06	7.90E-06	5.38E-06
	8	1.49E-06	2.58E-06	5.94E-06	3.34E-06
	10	2.49E-06	3.62E-06	3.45E-06	3.19E-06
D	0	3.00E-06	3.57E-06	3.55E-06	3.37E-06
	2	9.65E-07	9.06E-07	2.15E-06	1.34E-06
	4	7.48E-07	1.05E-06	8.27E-07	8.75E-07
	6	4.61E-07	6.62E-07	9.07E-07	6.77E-07
	8	-	7.22E-08	1.37E-07	1.05E-07
	10	-	8.58E-09	1.43E-08	1.14E-08

หมายเหตุ (-) คือ ไม่สามารถวัดปริมาณการไหลของน้ำได้เนื่องจากตัวอย่างดินมีความทึบน้ำมาก

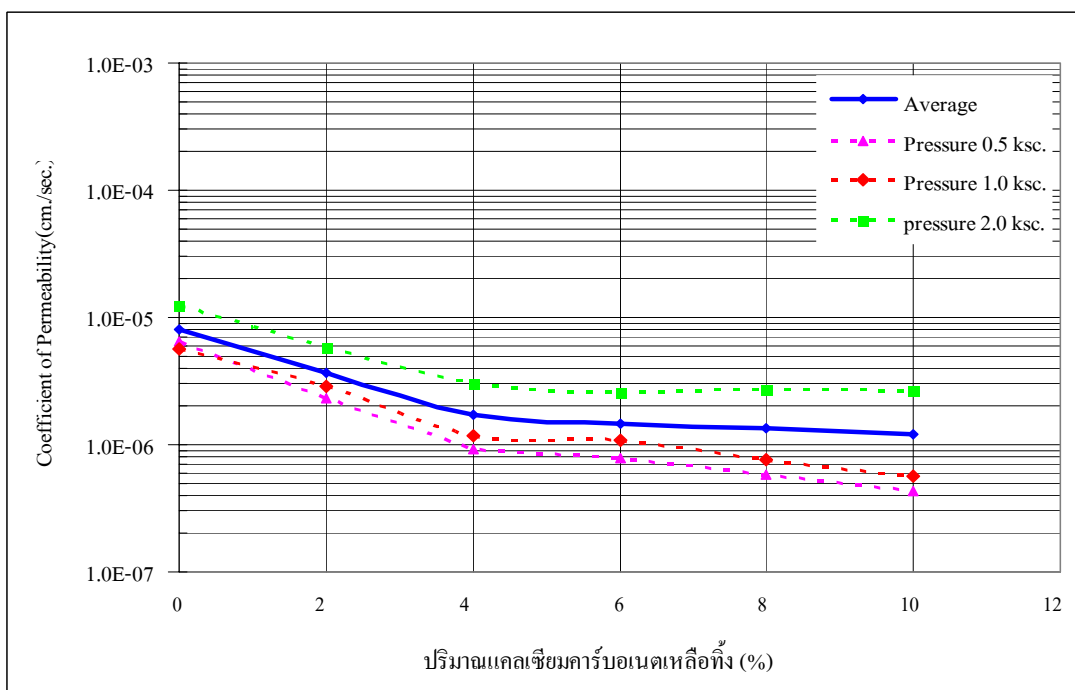
ตารางที่ 27 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต
เหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 28 วัน

Coefficient of Permeability(cm./sec.)					
กลุ่มดิน (Grade)	ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	ความดันที่ใช้ทดสอบ			ค่าสัมประสิทธิ์ ความชื้นน้ำเฉลี่ย
		0.5 ksc.	1.0 ksc.	2.0 ksc.	
B	0	6.52E-06	5.65E-06	1.23E-05	8.14E-06
	2	2.34E-06	2.90E-06	5.88E-06	3.71E-06
	4	9.34E-07	1.19E-06	3.06E-06	1.73E-06
	6	7.75E-07	1.09E-06	2.58E-06	1.48E-06
	8	5.75E-07	7.66E-07	2.69E-06	1.34E-06
	10	4.31E-07	5.60E-07	2.63E-06	1.21E-06
D	0	5.66E-07	1.08E-06	2.96E-06	1.53E-06
	2	7.67E-07	5.68E-07	2.86E-06	1.40E-06
	4	7.14E-07	9.72E-07	2.45E-06	1.38E-06
	6	5.41E-07	6.97E-07	1.31E-06	8.49E-07
	8	3.58E-07	2.15E-07	3.94E-07	3.22E-07
	10	-	1.02E-07	6.43E-08	8.30E-08

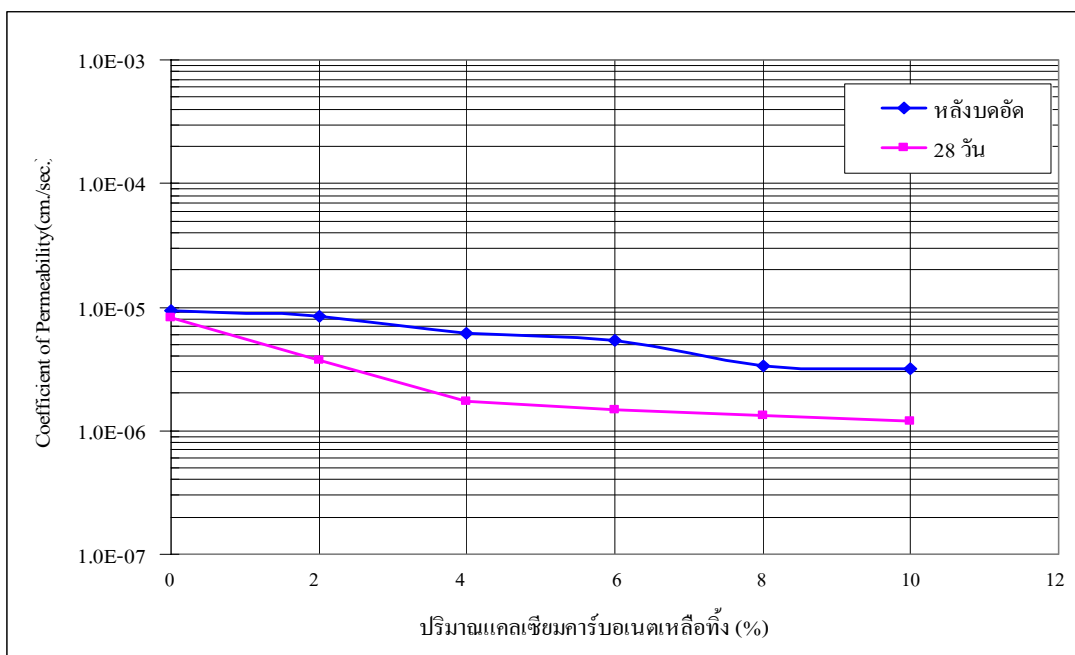
หมายเหตุ (-) คือ ไม่สามารถวัดปริมาณการไหลของน้ำได้เนื่องจากตัวอย่างดินมีความทึบน้ำมาก



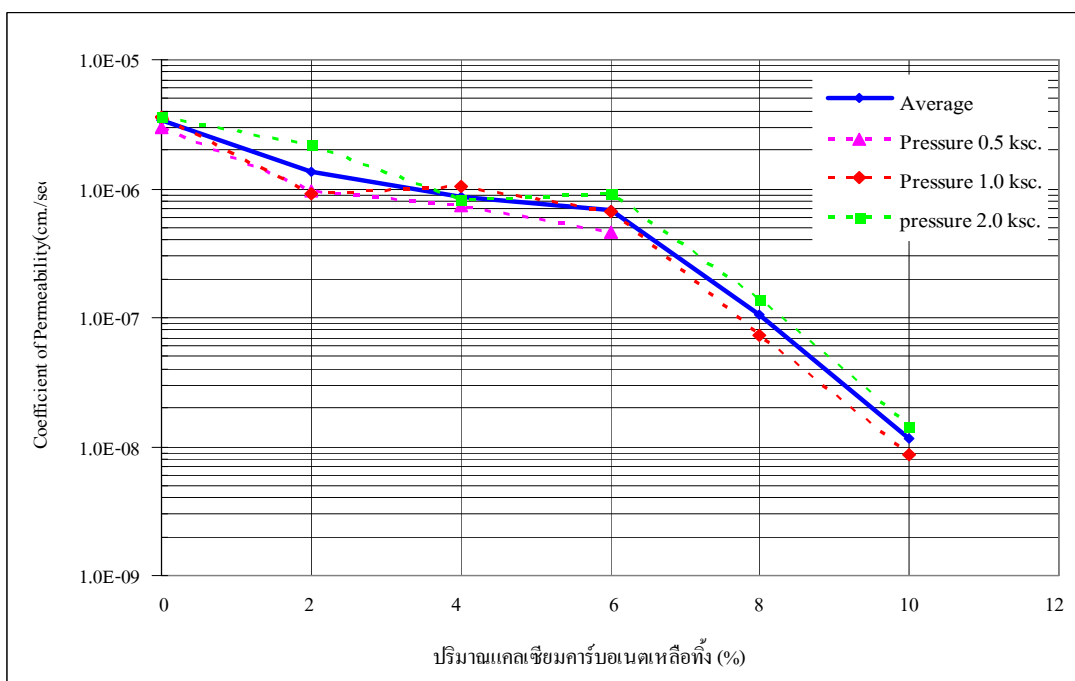
ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต
เหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B ทดสอบทันทีหลังบดอัด



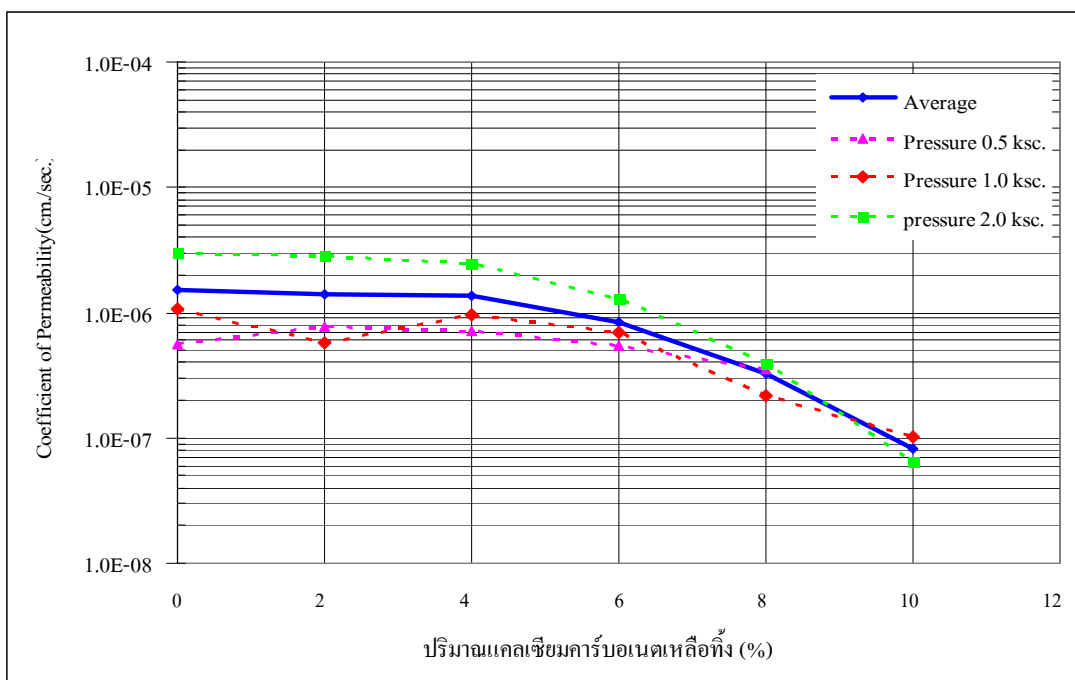
ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต
เหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B อายุการบ่ม 28 วัน



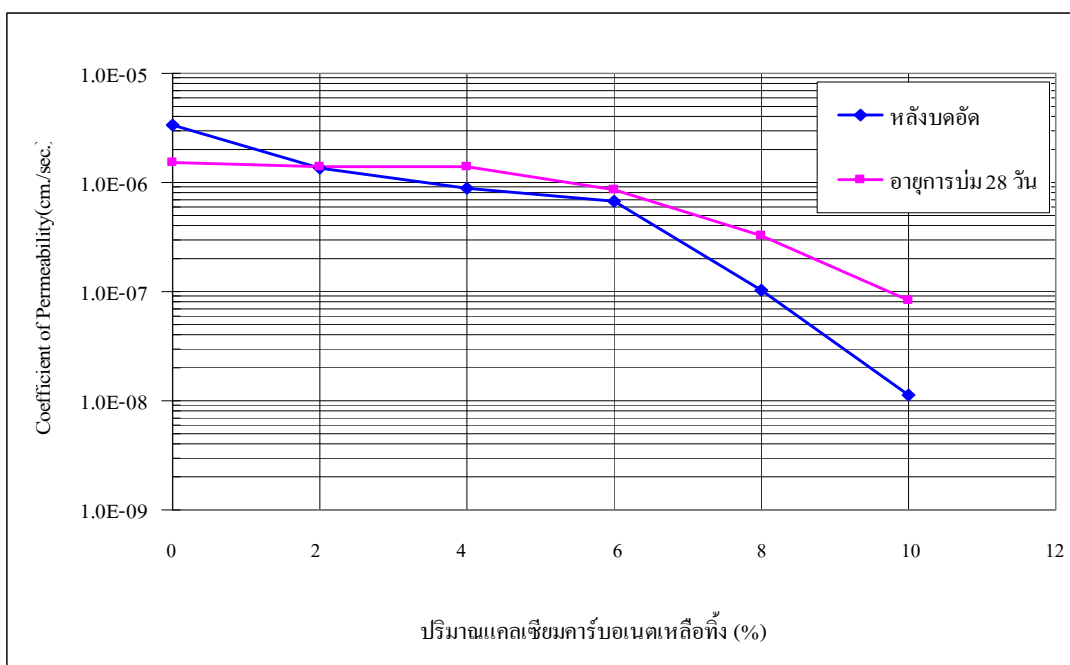
ภาพที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด B ทดสอบทันทีหลังบดอัดและอายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด D ทดสอบทันทีหลังบดอัด



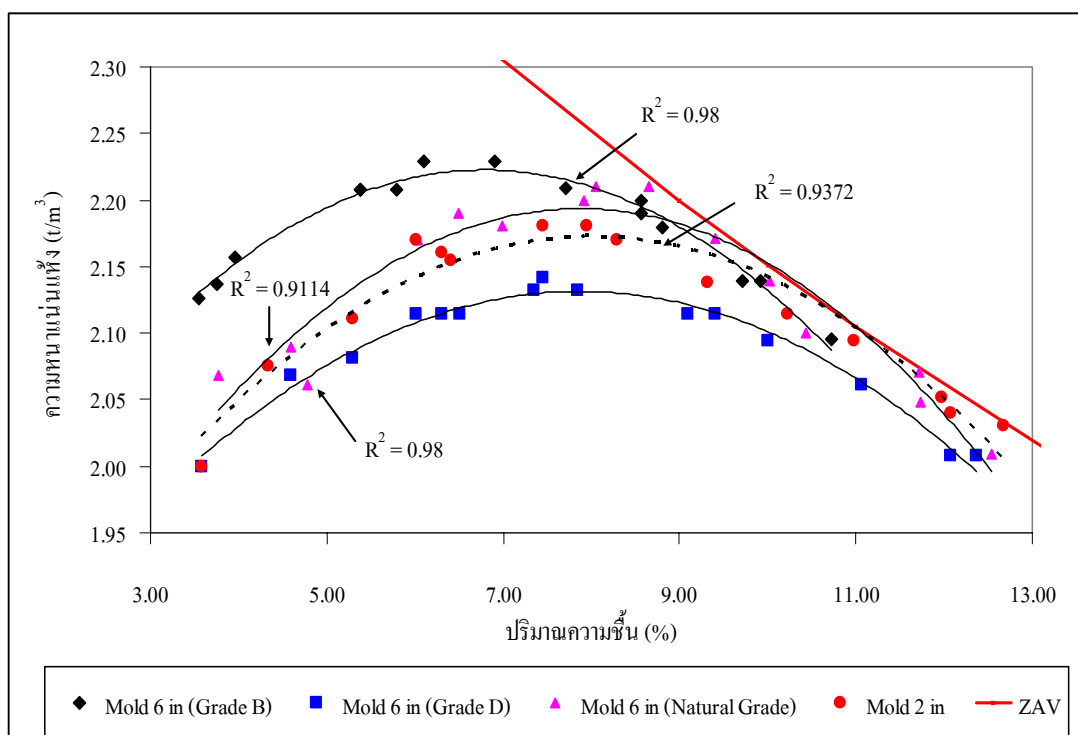
ภาพที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด D อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งของดินลูกรังเกรด D ทดสอบทันทีหลังบดอัดและอายุการบ่ม 28 วัน

การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังเพื่อใช้ในการทดสอบ UCS

ผลการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของดินลูกรังแสดงไว้ในตารางที่ 28 และภาพที่ 69 โดยการบดอัดด้วย Mold มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว พลังงานบดอัดประมาณ 55830 ปอนด์ ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต (lb-ft/ft³) ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) มีค่าระหว่าง 2.203-2.130 ตันต่อลูกบาศก์เมตร (t/m³) และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มีค่าระหว่าง 6.80-8.40% ในส่วนของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว ทำการบดอัดให้มีพลังงานเทียบเท่ากับการบดอัดใน Mold มาตรฐาน โดยใช้ Hammer หนักประมาณ 2.54 ปอนด์ ระยะยกของ Hammer เท่ากับ 0.50 ฟุต จำนวนชั้นในการบดอัดเท่ากับ 5 ชั้น แต่ละชั้นบดอัด 62 ครั้ง ปริมาตรของ Mold เท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์ฟุต พลังงานบดอัดเท่ากับ 54165 lb-ft/ft³ มีค่า MDD ประมาณ 2.175 t/m³ และ OMC มีค่าประมาณ 8.20%



ภาพที่ 69 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นในมวลดินของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว และ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานระหว่าง Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว กับ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว โดยพิจารณาค่าพลังงานที่ใช้ในการบดอัด, เส้นกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นเหมาะสมของดิน, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นเหมาะสมในการบดอัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว มาใช้ในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานสำหรับการทดสอบ UCS ได้อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัดและ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว ในครั้งนี้ไม่แนะนำให้ใช้แทนวิธีการมาตรฐานในการหาค่าความหนาแน่นของดินและปริมาณความชื้นเหมาะสม อันเนื่องมาจากข้อมูลการทดสอบในดินประเภทต่างๆ และข้อมูลการทดสอบยังมีไม่เพียงพอที่จะให้ความถูกต้องมากนัก

ตารางที่ 28 เปรียบเทียบผลการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วย Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.6 นิ้ว กับ Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 4 นิ้ว ของตัวอย่างดินลูกรัง

คุณสมบัติ	Mold มาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว	Mold มาตรฐาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว
เส้นผ่านศูนย์กลาง (ft)	0.50	0.17
ความสูง (ft)	0.38	0.33
ปริมาตร (ft ³)	0.08	0.01
Hammer (lb)	10.00	2.54
ระยะยก Hammer (ft)	1.50	0.50
จำนวนชั้นที่บดอัด (layer)	5.00	5.00
จำนวนครั้งการบดอัด (blow / layer)	56.00	62.00
พลังงานบดอัด (lb-ft/ft ³)	55830	54165
MDD (t/m ³)	2.203-2.130	2.175
OMC (%)	6.80-8.40	8.20

ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS)

ผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength (UCS) ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง (Air Dry) โดยดำเนินการทดสอบภายหลังการบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน โดยผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 29 และภาพที่ 70

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบ UCS ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

Unconfined Compressive Strength (ksc.)						
ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	อายุการบ่ม (วัน)					
	หลังบดอัด	3	7	14	28	90
0	7.49	8.15	8.68	8.81	9.25	9.44
2	7.74	10.26	12.28	14.85	18.04	20.20
4	7.61	11.36	15.50	17.84	21.55	23.61
6	7.59	10.85	15.49	18.67	21.53	24.56
8	7.07	10.51	14.19	18.15	20.56	22.26
10	6.53	10.04	13.15	17.71	20.36	21.50

อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่มีต่อค่า UCS พบว่า เมื่อพิจารณาดินลูกรังผสมแคลเซียมเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่าค่า UCS จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งให้ค่ากำลังของดินมีค่าสูงสุดประมาณ 4% ของน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมากขึ้นกำลังของดินลูกรังก็จะไม่เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้กำลังของดินลูกรังลดลง เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังโดยผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของดินแห้งที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่า ค่า UCS เท่ากับ 10.26, 11.36, 10.85, 10.51 และ 10.04 ksc. ตามลำดับ ซึ่งค่า UCS เพิ่มขึ้นประมาณ 1.26, 1.39, 1.33, 1.29 และ 1.23 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า UCS ของดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งมีค่า UCS เท่ากับ 8.15 ksc. ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรัง พบว่า จะให้ค่า UCS

สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตราส่วนผสม โดยค่า UCS และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 3 วัน ของดินลูกรังสรุปไว้ดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ค่า UCS และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 3 วัน ของดินลูกรัง

	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)					
	0	2	4	6	8	10
UCS (ksc.)	8.15	10.26	11.36	10.85	10.51	10.04
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.00	1.26	1.39	1.33	1.29	1.23

อิทธิพลของอายุการบ่มที่มีต่อค่า UCS เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 71 พบว่าค่า UCS จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 28 วันนั้นค่า UCS จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 28 ถึง 90 วัน ค่า UCS จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช้าๆ โดยทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ผสมดินลูกรังมีแนวโน้มการพัฒนาค่า UCS ไปในแบบเดียวกัน เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน พบว่า UCS มีค่าเท่ากับ 11.36, 15.50, 17.84, 21.55 และ 23.61 ksc. ตามลำดับ ซึ่งค่า UCS เพิ่มขึ้นประมาณ 1.49, 2.04, 2.34, 2.83 และ 3.10 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า UCS ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% หลังบดอัดซึ่งมีค่า UCS เท่ากับ 7.61 ksc. ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า UCS มีการพัฒนาสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นโดยค่า UCS และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% สรุปไว้ดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ค่า UCS และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า UCS กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4%

	อายุการบ่ม (วัน)					
	หลังบดอัด	3	7	14	28	90
UCS (ksc.)	7.61	11.36	15.50	17.84	21.55	23.61
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.00	1.49	2.04	2.34	2.83	3.10

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของดินแห้งและอายุการบ่มต่าง ๆ และสร้างสมการเบื้องต้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$UCS = a \log(t) + b \quad (8)$$

เมื่อ UCS = Unconfined Compressive Strength, ksc.

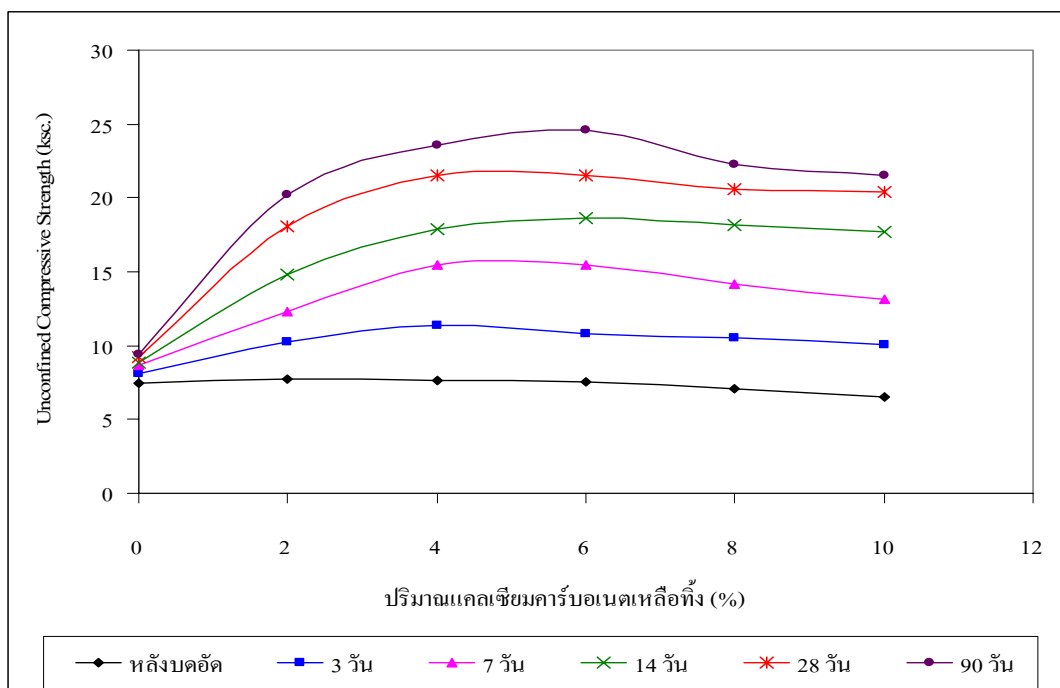
t = อายุการบ่ม, วัน

a, b = ค่าคงที่ของสมการ

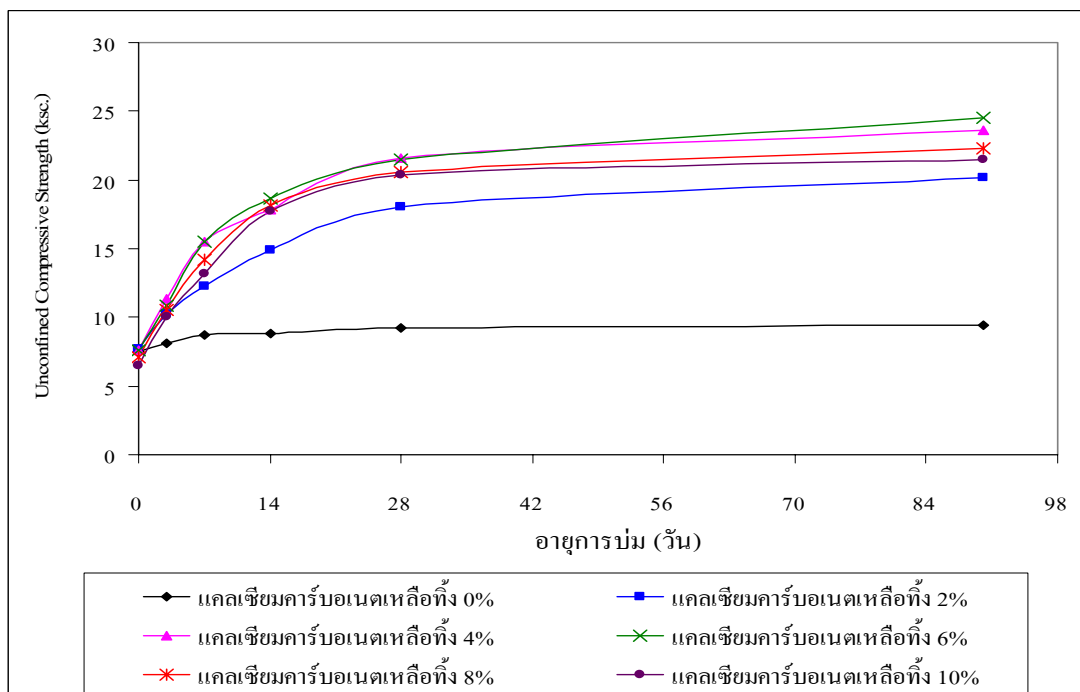
รายละเอียดของสมการแสดงไว้ในตารางที่ 32 โดยสมการต่างๆ สามารถนำมาคาดการณ์กำลังของดินลูกรังในช่วงอายุการบ่มต่างๆ ได้ อนึ่งสมการที่นำเสนอไว้เพื่อใช้ทำนายถึงค่า UCS ของดินลูกรังในครั้งนี้จะมีความถูกต้องเฉพาะที่อยู่ในช่วงของข้อมูลปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 0-10% ของน้ำหนักดินแห้งและอายุการบ่มที่ไม่เกิน 90 วันและมีการกระจายขนาดของเม็ดดินตามที่กำหนดไว้เท่านั้น จึงไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนายผลในช่วงที่ไม่มีการทดสอบ

ตารางที่ 32 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	Unconfined Compressive Strength, (ksc.)	
	UCS = a Log (t) + b	R ²
0	UCS = 0.7662Log (t) + 7.8415	0.945
2	UCS = 6.2565Log (t) + 6.7766	0.978
4	UCS = 7.4375 Log (t) + 8.1669	0.967
6	UCS = 8.0485 Log (t) + 7.3107	0.975
8	UCS = 7.2228 Log (t) + 7.4967	0.941
10	UCS = 7.2500 Log (t) + 6.8791	0.919



ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอนไฟเบอร์เหลือทิ้งที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอนไฟเบอร์เหลือทิ้ง

Modulus of Elasticity (E)

ตารางที่ 33 ค่า Modulus of Elasticity (E_{50}) ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจากการทดสอบ UCS

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	Modulus of Elasticity (ksc.)					
	อายุการบ่ม (วัน)					
	หลังบดอัด	3	7	14	28	90
0	255	278	294	299	315	321
2	301	418	503	595	639	690
4	313	422	603	694	787	821
6	308	404	596	695	792	911
8	275	429	526	674	762	824
10	242	390	488	605	723	799

Modulus of Elasticity (E) ที่ 50% ของค่า Unconfined Compressive Strength ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งโดยใช้อัตราส่วนผสม 2 , 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้งทดสอบหลังบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 33 และ ภาพที่ 72-73 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจะมีแนวโน้มทำนองเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง กล่าวคือ ค่า E จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วค่า E จะมีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% ของน้ำหนักดินแห้งจะให้ค่า E เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อลองพิจารณาผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังโดยผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของดินแห้งที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่า ค่า E เท่ากับ 502.90, 602.96, 596.32, 525.85 และ 488.30 ksc. ตามลำดับ ซึ่งค่า E เพิ่มขึ้นประมาณ 1.71, 2.05, 2.03, 1.79 และ 1.66 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า E ของดินลูกรังที่ยังมิได้มีการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งมีค่า เท่ากับ 293.95 ksc. ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มเป็นดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรัง พบว่า จะให้ค่า E สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตราส่วนผสมโดย ค่า E และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 7 วัน ของดินลูกรัง สรุปไว้ดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ค่า E และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 7 วัน ของดินลูกรัง

	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)					
	0	2	4	6	8	10
E (ksc.)	293.95	502.90	602.96	596.32	525.85	488.30
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.00	1.71	2.05	2.03	1.79	1.66

ตารางที่ 35 ค่า E และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4%

	อายุการบ่ม (วัน)					
	หลังบดอัด	3	7	14	28	90
E (ksc.)	313.27	421.93	602.96	693.96	787.12	821.04
อัตราการเพิ่มขึ้น(เท่า)	1.00	1.35	1.92	2.22	2.51	2.62

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า E และอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งด้วยการสร้างสมการเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel พบว่า สมการที่สร้างขึ้นเป็นสมการเส้นโค้งแบบ Logarithm โดยเส้นกราฟมีค่า Coefficient of Determination (R^2) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.95-0.98 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าในช่วงแรกของอายุการบ่ม 3 ถึง 28 วัน ค่า E จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุ 28 ถึง 90 วัน ค่า E จะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องอย่างช้าๆ ซึ่งทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ผสมกับดินลูกรังมีแนวโน้มของการพัฒนาค่า E แบบเดียวกัน เมื่อลองพิจารณาตัวอย่างดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อัตราส่วน 4% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน จะให้ค่า E เท่ากับ 421.93, 602.96, 693.96, 787.12 และ 821.04 ksc. ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1.35, 1.92, 2.22, 2.51 และ 2.62 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า E ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งทดสอบทันทีหลังบดอัดซึ่งมีค่า E เท่ากับ 313.27 ksc. อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรัง พบว่า จะให้ค่า UCS สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตราส่วนผสมเมื่อมีอายุการบ่มมากกว่า 3 วัน เป็นต้นไปโดย ค่า E และ

อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า E กับอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% สรุปไว้ดังตารางที่ 35

โดยสมการการเพิ่มขึ้นของค่า E ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ปริมาณ และอายุการบ่มต่างๆ แสดงดังตารางที่ 36 และสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$E = a \log(t) + b \quad (9)$$

เมื่อ E = Modulus of Elasticity (E_{50}) , ksc.

t = อายุการบ่ม, วัน

a, b = ค่าคงที่ของสมการ

เมื่อนำค่า E และ UCS มาหาความสัมพันธ์ของข้อมูลทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งโดยใช้อัตราส่วนผสม 2, 4, 6, 8 และ 10% โดยน้ำหนักของดินแห้ง แสดงไว้ดังภาพที่ 74 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง มีค่าความลาดชัน (slope) ของสมการเส้นตรงเท่ากับ 34.995 โดยเส้นกราฟมี Coefficient of Determination (R^2) ประมาณ 0.97 ซึ่งเป็นค่าที่สูงพอสมควรแสดงว่าแนวโน้มของผลการทดสอบมีความสัมพันธ์กันดีมากมีความน่าเชื่อถือในเชิงสถิติที่ค่อนข้างสูงจึงมีความเป็นไปได้มากที่สมการดังกล่าวจะสามารถนำมาทำนายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E และ UCS ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง ทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มได้ โดยสามารถจัดให้อยู่ในสมการดังต่อไปนี้

$$E = 34.995 (UCS) + 24.815 \quad (10)$$

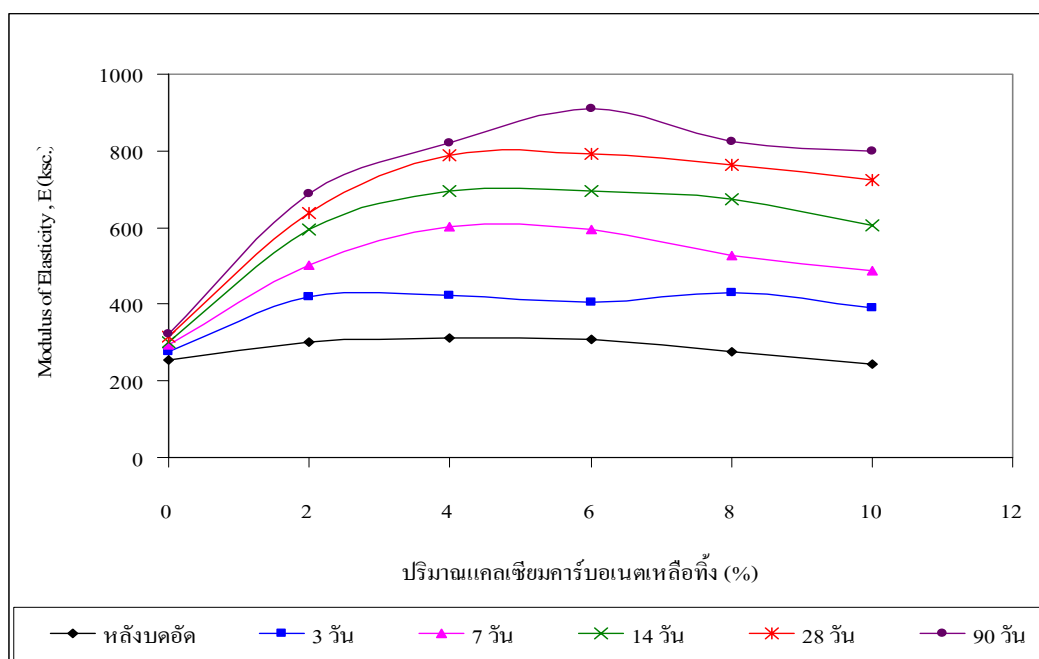
เมื่อ E = Modulus of Elasticity (E_{50}) , ksc.

UCS = Unconfined Compressive Strength , ksc.

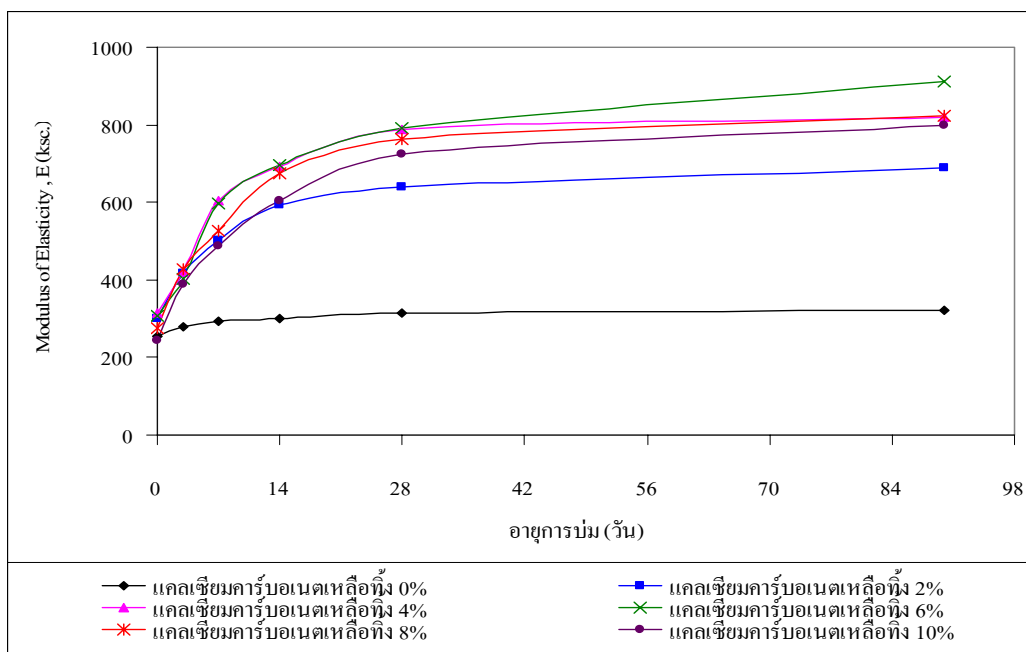
อนึ่งสมการที่นำเสนอไว้เพื่อใช้ทำนายถึงค่า E ของดินลูกรังในครั้งนี้จะมีความถูกต้องเฉพาะที่อยู่ในช่วงของข้อมูลปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 0-10%ของน้ำหนักดินแห้งและอายุการบ่มที่ไม่เกิน 90 วันและมีการกระจายขนาดของเม็ดดินตามที่กำหนดไว้เท่านั้น จึงไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนายผลในช่วงที่ไม่มีการทดสอบ

ตารางที่ 36 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E) และอายุการบ่มของ
ดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

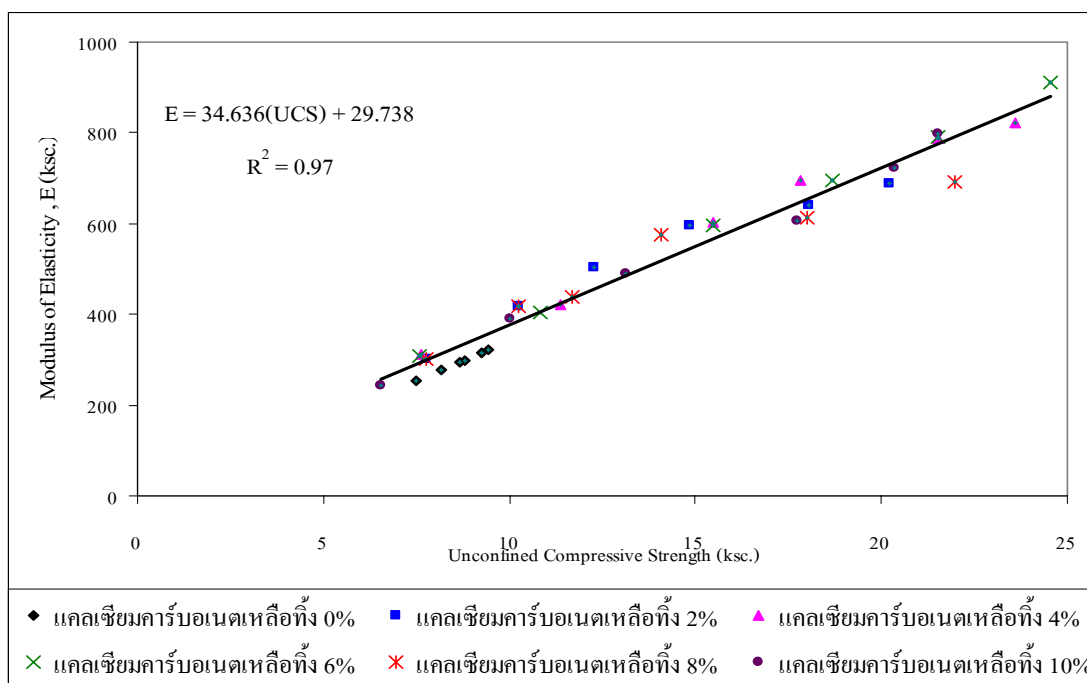
ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนตเหลือทิ้ง (%)	Modulus of Elasticity, E (ksc.)	
	$E = a \text{ Log}(t) + b$	R^2
0	$E = 26.0700 \text{ Log}(t) + 266.50$	0.953
2	$E = 164.9366 \text{ Log}(t) + 348.89$	0.949
4	$E = 236.8768 \text{ Log}(t) + 348.99$	0.899
6	$E = 296.4151 \text{ Log}(t) + 284.25$	0.970
8	$E = 248.3023 \text{ Log}(t) + 311.80$	0.947
10	$E = 256.0003 \text{ Log}(t) + 259.45$	0.972



ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E) กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต
เหลือทิ้งที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E) ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอนเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่มต่างๆ



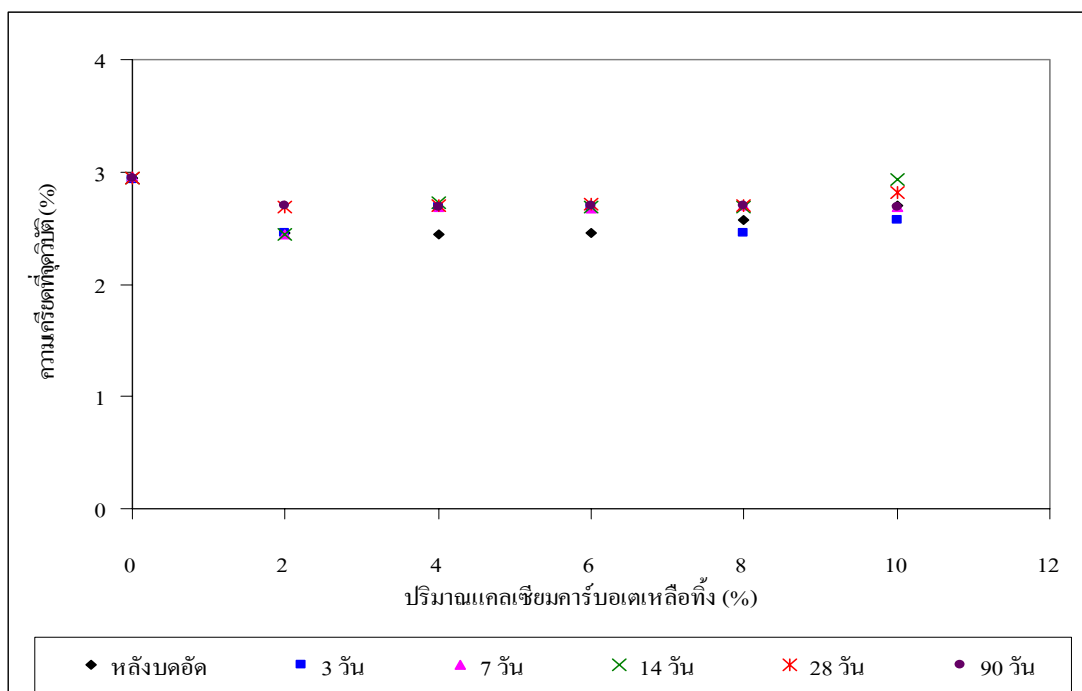
ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity (E) กับ UCS ทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตเหลือทิ้งและทุกอายุการบ่มของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอนเนตเหลือทิ้ง

ค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p)

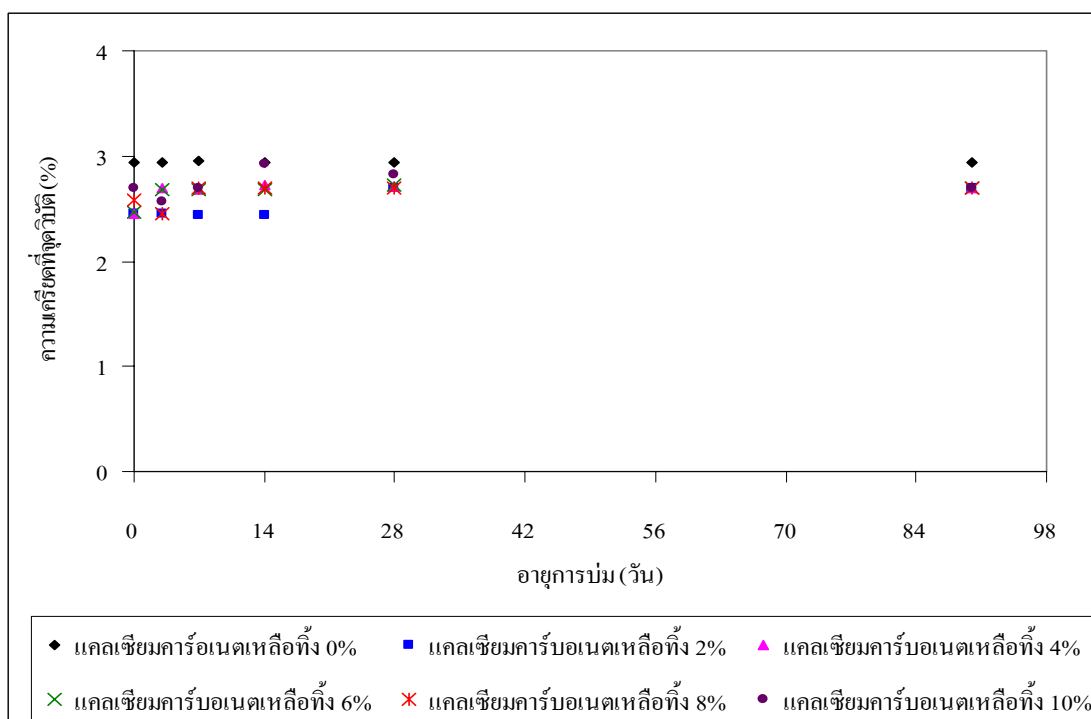
ค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) จากผลการทดสอบ Unconfined Compressive Strength ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งโดยใช้อัตราส่วนผสม 2, 4, 6, 8 และ 10% โดยนำหั่นดินแห้ง ทดสอบทันทีหลังการบดอัดและอายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน แสดงไว้ในตารางที่ 37 และภาพที่ 75-76 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีแนวโน้มค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) ลดลงในทุกปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง แสดงให้เห็นว่าดินลูกรังมีแนวโน้มเป็นวัสดุแข็งเปราะ (Brittle Characteristic) มากขึ้น โดยจะส่งผลให้ลักษณะของการวิบัติเป็นแบบ Brittle Failure ซึ่งจะวิบัติที่ความเครียดต่ำกว่าการดินลูกรังที่ยังมิได้ทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยพบว่า ความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) ของดินลูกรังที่ไม่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีค่าเท่ากับ 2.94% และเมื่อปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งแล้วความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) จะมีค่าน้อยลงใกล้เคียงกันสำหรับทุกอายุการบ่มและทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) อยู่ในช่วงระหว่าง 2.45-2.83%

ตารางที่ 37 ค่าความเครียดที่จุดวิบัติ (ϵ_p) ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง
จากการทดสอบ UCS

ค่าความเครียดที่จุดวิบัติ, (ϵ_p) (%)						
ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง(%)	อายุการบ่ม (วัน)					
	หลังบดอัด	3	7	14	28	90
0	2.94	2.94	2.95	2.94	2.94	2.94
2	2.45	2.45	2.44	2.44	2.69	2.70
4	2.45	2.69	2.69	2.72	2.70	2.69
6	2.46	2.69	2.68	2.69	2.72	2.70
8	2.58	2.45	2.70	2.69	2.70	2.70
10	2.70	2.57	2.69	2.83	2.82	2.69



ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่จุดวิกฤติ (ε_p) กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่จุดวิกฤติ (ε_p) กับอายุการบ่มของดินลูกรังผสม
แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

การพิจารณานำผลการทดสอบไปใช้ในงานถนน

การพิจารณาเพื่อนำดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งใช้เป็นชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางของถนน ในครั้งนี้ แบ่งเกณฑ์การพิจารณาออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1. พิจารณาจากความสามารถในการรับน้ำหนักของดินลูกรังโดยใช้ค่า Soaked CBR เป็นมาตรฐาน และ 2. พิจารณาจากค่าความเหนียวของดิน (Plasticity Index) เป็นมาตรฐาน

ค่า Soaked CBR ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 14 วัน แสดงไว้ดังภาพที่ 77 โดยข้อกำหนดสำหรับชั้นพื้นทางจะต้องมีค่า Soaked CBR มากกว่า 80% และชั้นรองพื้นทางจะต้องมีค่ามากกว่า 25% โดยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางแสดงไว้ดังตารางที่ 38 เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบพบว่า ดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% ของน้ำหนักดินแห้งจะสามารถนำไปใช้งานในชั้นพื้นทางได้โดยจะให้ค่า Soaked CBR ประมาณ 85.52% ในส่วนของชั้นรองพื้นทางนั้น ดินลูกรังเกรด B สามารถที่จะนำมาใช้งานชั้นรองพื้นทางได้โดยไม่จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดิน ส่วนดินลูกรังเกรด D ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสม คือ 2-10% ซึ่งค่า Soaked CBR จะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งประมาณ 4% ของน้ำหนักดินแห้งโดยจะให้ค่า Soaked CBR ประมาณ 44.07%

เมื่อพิจารณาค่าความเหนียว (Plasticity Index) ของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 14 วัน แสดงไว้ดังภาพที่ 78 โดยข้อกำหนดสำหรับชั้นพื้นทางจะต้องมีค่า Plasticity Index น้อยกว่า 6% และชั้นรองพื้นทางจะต้องมีค่า Plasticity Index น้อยกว่า 11% โดยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางแสดงไว้ดังตารางที่ 39 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบพบว่า ดินลูกรังเกรด B และ D ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ในส่วนของชั้นรองพื้นทางนั้น ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับดินลูกรังเกรด B และเกรด D คือประมาณ 4-10% และ 6-10% ของน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ

เมื่อพิจารณาทางด้านราคาโดยไม่คำนึงถึงค่าขนส่ง พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจะมีราคาประมาณ 200 บาท ต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร(ราคาปี 2550 แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเพื่อนำไปกำจัด) หรือมีราคากิโลกรัมละประมาณ 0.10 บาท ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมที่

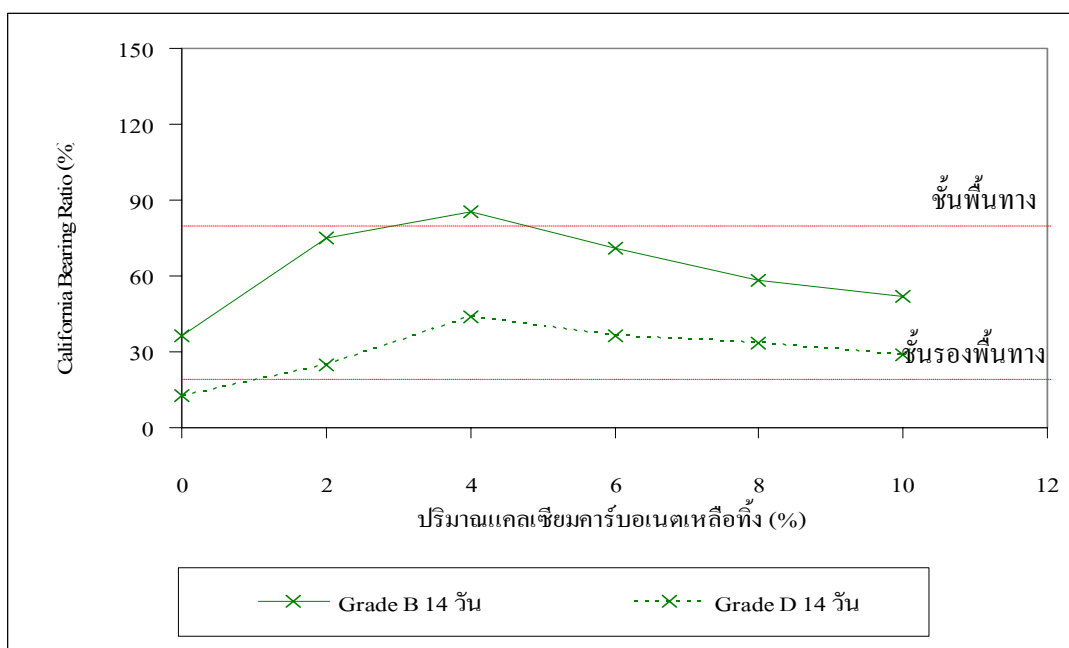
เหมาะสมในการนำไปใช้งานโดยพิจารณาถึงกำลังรับน้ำหนักของดินและราคาต่ำสุด พบว่าชั้นพื้นทางสำหรับลูกรังเกรด B ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมจะมีเพียงปริมาณเดียว คือ 4% ของน้ำหนักดินแห้ง หรือประมาณ 90 กิโลกรัมต่อดินหนึ่งลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะมีราคาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเท่ากับ 9 บาทต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร สำหรับดินลูกรังเกรด D ไม่แนะนำให้ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งในการปรับปรุงคุณภาพดิน ในส่วนของชั้นรองพื้นทางพบว่า ลูกรังเกรด B สามารถที่จะนำมาใช้งานชั้นรองพื้นทางได้โดยไม่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ ส่วนลูกรังเกรด D นั้นปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมซึ่งจะให้ค่า Soaked CBR สูงสุด คือ 4% ซึ่งจะมีราคาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังเท่ากับ 9 บาทต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรเช่นกัน

ตารางที่ 38 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของดินลูกรังเกรด B และ D จากผลการทดสอบ Soaked CBR

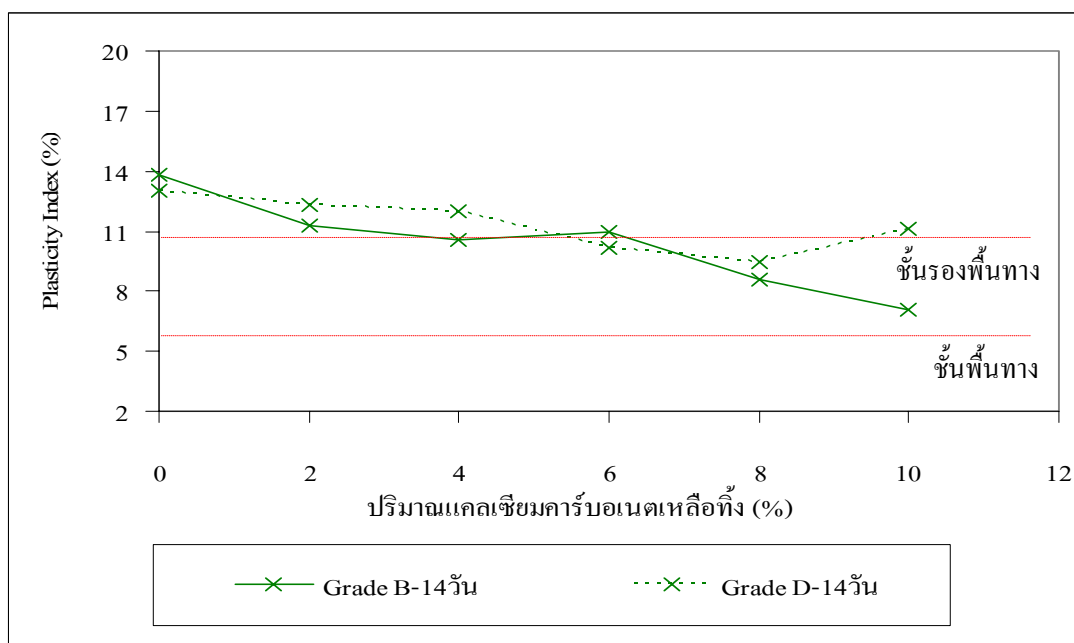
กลุ่มดิน	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทาง (%)	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นรองพื้นทาง (%)
B	4	0-10
D	-	2-10

ตารางที่ 39 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของดินลูกรังเกรด B และ D จากผลการทดสอบความเหนียวของดิน (Plasticity Index)

กลุ่มดิน	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทาง (%)	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นรองพื้นทาง (%)
B	-	4-10
D	-	6-10



ภาพที่ 77 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Soaked CBR กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 14 วันของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง



ภาพที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่อายุการบ่ม 14 วันของดินลูกรังเกรด B และ D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ลักษณะเมื่อดินลูกรังส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลแดงอิฐ มีรูปร่างค่อนข้างกลมมน ประกอบด้วยปริมาณของกรวด (Gravel) และทราย (Sand) เป็นหลัก ประมาณ 83.78% ที่เหลือเป็นตะกอนทราย (Silt) กับดินเหนียว (Clay) มีการกระจายขนาดของเม็ดดินคละกันไม่ดี (Poorly Grade Soil) เนื่องจากเป็นดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Gap Grade) การจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่ม SC ซึ่งมีลักษณะเป็นทรายมีตะกอนทรายหรือดินเหนียวปน ขนาดคละกันไม่ดีผสมกันและตามระบบ AASHTO อยู่ในกลุ่ม A-2-6 โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลต่างๆ สรุปว่าตัวอย่างดินลูกรังมีคุณสมบัติไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางและชั้นพื้นทางตามมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย

2. แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหลือทิ้งจากการขบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธีการบดซึ่งเรียกว่า Ground Calcium Carbonate (GCC) ของโรงงานแคลเซียมโปรดักส์ จ.ลพบุรี โดยปรับปรุงความละเอียดเบื้องต้นด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แบบแห้ง มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมีผลึก มีสีขาวหรือขาวขุ่น มีการกระจายขนาดมีลักษณะสม่ำเสมอ (Uniform Grade) คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง พบว่า Moisture Content มีค่าประมาณ 1% , ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65, ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด มีค่าประมาณ 1.90 ตันต่อลูกบาศก์เมตร, ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าประมาณ 4.50 % ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำมีค่าประมาณ 1.04×10^{-4} cm./sec. องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประมาณ 35.43-52.13%, เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) น้อยกว่า 0.1% , อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) น้อยกว่า 0.2% , ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) น้อยกว่า 0.3% , แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีค่าน้อยกว่า 0.8%, ไม่มีแมงกานีสออกไซด์ (MnO) ในส่วนประกอบ, pH มีค่าประมาณ 9.5 ± 0.5 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOD) ประมาณ 43%

3. ดินลูกรังเกรด B และ D มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ประมาณ 2.23 และ 2.13 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณความชื้นเหมาะสมพบว่าดินลูกรังเกรด B และ D มีปริมาณความชื้นเหมาะสม ประมาณ 6.8 และ 7.7% ตามลำดับ, ค่า Unsoaked และ Soaked CBR

ของดินลูกรังเกรด B มีค่าสูงกว่าดินลูกรังเกรด D และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินลูกรังเกรด B และ D มีค่าประมาณ 9.39×10^{-06} และ 3.37×10^{-06} cm./sec. ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำเฉลี่ยของดินลูกรังเกรด B มีค่าสูงกว่าดินลูกรังเกรด D อยู่ประมาณ 6 เท่า

4. เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ผสมลงในดินลูกรังเกรด B และ D เพิ่มขึ้นพบว่าค่า Liquid Limit ของดินลูกรังเกรด B มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าลดลงประมาณ 2.05% ในส่วนของดินลูกรังเกรด D จะมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ค่า Plastic Limit มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในกลุ่มดินลูกรังเกรด B และ D โดยลูกรังเกรด B มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4.70% ในส่วนของดินลูกรังเกรด D มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.15% ส่งผลให้ค่า Plasticity Index ของดินลูกรังเกรด B และ D ลดลงประมาณ 6.76% และ 3.62% ตามลำดับ

5. เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เพิ่มสูงขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มลดลงและปริมาณความชื้นเหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

6. ค่า Unsoaked และ Soaked CBR ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งประมาณ 4% โดยจะให้ค่ากำลังของดินมีค่าสูงสุด จากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมากขึ้นกำลังของดินลูกรังก็จะไม่เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้กำลังของดินลูกรังลดลง อิทธิพลของอายุการบ่มที่มีต่อค่า CBR จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 14 วันนั้นค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 14 ถึง 28 วัน ค่า CBR จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช้า ๆ โดยทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ผสมดินลูกรังมีแนวโน้มการพัฒนา ค่า CBR ไปในแบบเดียวกัน โดยดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 4% ให้ค่า Unsoaked CBR สูงสุดประมาณ 165.81% และ Soaked CBR สูงสุดประมาณ 117.81%

7. ผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งและอายุการบ่มต่อการบวมตัวของดินลูกรังพบว่า เมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งลงในดินลูกรังควบคู่กับการบดอัดจะทำให้การบวมตัวของดินลดลงโดยประมาณ 0.01-0.05%

8. เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B และ D มีแนวโน้มต่ำลง โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด B จะมีค่าลดลงประมาณ 3 เท่า และดินลูกรังเกรด D จะมีค่าลดลงประมาณ 295 เท่า และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้ดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีค่าต่ำลงประมาณ 6 และลูกรังเกรดจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 18 เท่า ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของดินลูกรังเกรด D ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 10% ของดินแห้งโดยดำเนินการทดสอบทันทีหลังบดอัด มีค่าต่ำสุดประมาณ 1.14×10^{-8} cm./sec.

9. ค่า UCS จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งประมาณ 4% ของน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นแม้จะเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมากขึ้นกำลังของดินลูกรังก็จะไม่เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้กำลังของดินลูกรังลดลง เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่า UCS จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอายุการบ่มในช่วงแรก 3 ถึง 28 วันนั้นค่า UCS จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นในช่วงอายุการบ่ม 28 ถึง 90 วัน ค่า UCS จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช้า ๆ โดยทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่ใช้ผสมดินลูกรังมีแนวโน้มการพัฒนา ค่า UCS ไปในแบบเดียวโดยทุกปริมาณของการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง จะให้ค่า UCS สูงกว่าดินลูกรังที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพทุกอัตราส่วนผสมโดยค่า UCS สูงสุดมีค่าประมาณ 24.56 ksc., ค่า E จะมีแนวโน้มทำนองเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS ทั้งในส่วนของคุณสมบัติและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยค่า E สูงสุดมีค่าประมาณ 911 ksc. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E และ UCS ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีแนวโน้มเป็นสมการเส้นตรง และค่า Strain of Failure (ϵ_p) ของดินลูกรังที่ไม่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีค่า 2.94% และเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง 2, 4, 6, 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง แล้วค่า (ϵ_p) จะมีค่าน้อยลงใกล้เคียงกันสำหรับทุกอายุการบ่มและทุกปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งซึ่งค่าความเค้นที่จุดวิบัติ (ϵ_p) อยู่ในช่วงระหว่าง 2.45-2.83%

10. การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้เสนอแนวทางในการนำแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ด้านงานทางโดยใช้เป็นวัสดุงานชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย โดยพิจารณาจากค่า Soaked CBR ที่อายุการบ่ม 14 วันของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งมีค่ามากกว่า 80% สำหรับชั้นพื้นทางของถนน และมีค่ามากกว่า 25% สำหรับชั้นรองพื้นทางของถนน ซึ่งปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางของดินลูกรังเกรด B ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้ง คือ 4% ของน้ำหนักดินแห้งจะสามารถนำไปใช้

งานในชั้นพื้นทางได้โดยจะให้ค่า Soaked CBR. ประมาณ 85.52% ในส่วนของชั้นรองพื้นทางนั้น ดลูกรังเกรด B สามารถที่จะนำมาใช้งานชั้นรองพื้นทางได้โดยไม่จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดิน ส่วนลูกรังเกรด D ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสม คือ 2-10% ซึ่งค่า Soaked CBR จะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งประมาณ 4% ของน้ำหนักดินแห้ง โดยจะให้ค่า Soaked CBR ประมาณ 44.07% ซึ่งปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสม สำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของดินลูกรังเกรด B และ D สรุปไว้ดังตารางที่ 40

ตารางที่ 40 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทางและรองพื้นทางของดินลูกรังเกรด B และ D

กลุ่มดิน	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นพื้นทาง (%)	ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งที่เหมาะสมสำหรับชั้นรองพื้นทาง (%)
B	4	0-10
D	-	2-10

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งในดินลูกรังเกรดอื่นๆ และดินชนิดอื่นๆ เช่น ดินเหนียว หรือดินทราย
2. ควรมีการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ และสารผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเพื่อใช้ในการอธิบายโครงสร้างและขั้นตอนการพัฒนาของกำลังของดินที่ได้รับการปรับปรุง อันประกอบด้วย การศึกษา Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อศึกษาในด้าน Physico-Chemical ต่อไป
3. ควรทำแปลงทดสอบดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งในสนาม เพื่อที่จะได้ทราบพฤติกรรมที่แท้จริงในการนำไปใช้ประโยชน์และเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่ได้จากในสนามและในห้องปฏิบัติการ

4. ควรทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการบ่มและความล่าช้าของการบดอัดต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของดินลูกรังผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งในการเติมลงในดินลูกรังเพื่อใช้ในการบดอัดในขณะที่การทำงานจริงในสนามไม่สามารถที่จะควบคุมปริมาณความชื้นและเวลาการทำงานให้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาสั้นได้ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงควรศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณความชื้นและความล่าช้าในการบดอัดอย่างละเอียดชัดเจนมากขึ้น

5. สมการที่ใช้ในการคาดการณ์กำลังระยะยาวนั้น สร้างจากผลการทดสอบในงานวิจัยเท่านั้น งานวิจัยในอนาคตจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมและควรนำเอาผลการทดสอบจากหลายๆ แห่งมาสร้างสมการที่เหมาะสมมากขึ้นต่อไป

6. การศึกษาในครั้งนี้ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งเป็นสารเชื่อมประสานเพียงชนิดเดียว ดังนั้นควรทำการศึกษาการใช้สารเชื่อมประสานประเภทอื่นๆ มาเป็นสารผสมเพิ่ม เช่น เถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าหนักจากตะกรันเตาถลุง เถ้าลอยแอนทราไซต์ แคลเซียมคาร์ไบด์ หรือ แอนทราไซต์ เพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง ลดมลภาวะที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ให้คุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

กรวิศว์ พรหมชาติ, กฤตวิทย์ สรรพคุณ และ อัดพล เจริญชัยสกุล. 2546. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลท์คอนกรีตเก่าผสมลูกรัง. ปรินูญานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ขวัญชัย อุทัยอร่าม, พยงค์ ภักดีวานิช และ สัมพันธ์ เทียนห้าว. 2542. การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหิน และกากแคลเซียมคาร์ไบด์. ปรินูญานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

จิรพัฒน์ โชติกร. 2529. การออกแบบทาง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

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

ณัฏยาณี บำเพ็ญผล และ คุณากร แพรกทอง. 2549. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้แคลเซียม. ปรินูญานิพนธ์ปริญาตรี, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

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

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

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ วุฒิชัย วัชรวิทย์เกียรติ. 2528. กลสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทยศึกษา
เน้นหนักการใช้ประโยชน์ในงานทางหลวง. รายงานฉบับที่ วว.96 กองวิเคราะห์และวิจัย
กรมทางหลวง.

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

_____, และ สุรเชษฐ์ เอี่ยมเชย. 2532. ความคงทนของดินซีเมนต์ รายงานฉบับที่ วว. 120.
กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.

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

พลาการ พิรภาคย์. 2542. การปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังโดยวิธีผสมเถ้าลอยลิกไนต์.
การศึกษาพิเศษประกาศนียบัตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พิทักษ์พงษ์ ทองยอดอินทร์ และ สุรศักดิ์ โสพส. 2544. การปรับปรุงดินลูกรังเพื่อใช้เป็นพื้นทาง
โดยใช้เถ้าลอย. ปริญญาณิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มนตรี นันทิพย์, สมพล ศรีวงษา และ ณัฐพล พาหะมวด. 2543. การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดิน
ลูกรังโดยใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัส. ปริญญาณิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ.

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

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

- วินัย สระอุบลม, สมคาน เอี่ยมสรรพางค์, สมบัติ ปิติพิรกุล และ อำนวย พาณิชกุลพงศ์. 2543. ผลของปริมาณเถ้ามวลเบาที่ผสมในดินและอายุการบ่มที่มีต่อค่า CBR, น. 151-156. ใน รายงานการประชุมทางวิศวกรรมโยธา ครั้งที่ 6. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- วุฒิชัย วัชวุฒิกเกียรติ. 2526. การศึกษาคุณสมบัติและความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินลูกรัง ในประเทศไทย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า, กรุงเทพฯ.
- ศุภกิจ นนทนันทน์. 2537. การปรับปรุงคุณภาพดิน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- _____, และ อติมนต์ ยุพกรณ์. 2544. อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์และปริมาณน้ำในมวลดินที่มี ต่อความแข็งแรงของดินลูกรังผสมซีเมนต์, น. GTE 91-97. ใน การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ
- สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง. 2539. มาตรฐานงานทาง. กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.
- สุภาพร สนิทวงศ์ชัย. 2528. อิทธิพลของพลังงานบดอัดที่มีต่อดินลูกรัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมพร ฤดีวิโรจน์. 2548. การปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังโดยใช้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนิรุทธ์ ธงไชย และ สุเทพ นิมนวล. 2530. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยในการเป็นวัสดุสร้างทาง หลวง. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- Alexander, L.T. and G. Cady. 1962. Genesis and Hardening of Laterite Soils. **U.S.Dept Agri. Tech. Bull.** No. 1282: 56.
- American Society for Testing and Materials. 1980. **Annual Book of ASTM Standard.** AASHTO office, Washington, D.C.

Baldovin, G. 1969. The shear strength of lateritic soils. **Proc. Spec. Session Eng. Properties Lateritic Soils** 1: 129-142

Bauer, M. 1898. **Beitrage zur geologie der seyschellen insbeson dere zur kenntnis des laterites.** n.p.

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

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. 1958. **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.

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

- 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. 1903. The constitution, origin and dehydration of laterite. **Geol. Mag.** 14(10): 59-69.
- Hongnoi, M. 1969. **Effect of method of preparation on the compaction and strength characteristic of lateritic soils**. Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Jones, J.H. and C. Yimsirikul. 1965. **Technical Note No. 22**. 58 p.
- 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. Doyné. 1927. Laterite and lateritic soil in Sierra Leone. **J. Agri.Sci.** 17: 530-546.
- Moh, Z.C., Y.P. Chin and S.C. Ng. 1967. **Proceeding 3 rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.** 3 p.
- 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 Ghanaian 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 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 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. IowacState University, Iowa, U.S.A.
- Vallerga, A.A. and N. R. ananand. 1969. **Stabilization of material by compaction.** Papers in Geotech. Eng. 554 p.
- Woo, S.M. 1971. Lime Stabilization of Selected Lateritic Soil. M.Eng. Thesis, SEATO Graduate School of Engineering, Bangkok, Thailand.
- Winterkorn, H.F. and E.C. Chandrasekharan. 1951. **Highway Research Board of Bull.** 44: 20.