



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมผสมซีเมนต์บดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer

Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory Compacted Reclaimed Asphalt Pavement Stabilized with Cement

นามผู้วิจัย นายอาวุธ โพธิ์อุดม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์พิพัฒน์ สอนวงษ์, M.Eng. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์จุฑา สุนิตย์สกุล, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์อัคคพัฒน์ สว่างสรีย์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงกูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมผสมซีเมนต์บดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการด้วย  
เครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer

Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory Compacted  
Reclaimed Asphalt Pavement Stabilized with Cement

โดย

นายอาวุธ โพธิ์อุดม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

อาวุธ โพธิ์อุดม 2553: การศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมผสมซีเมนต์บดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ พิพัฒน์ สอนวงษ์, วศ.ม. 98 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DCP Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) และคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างผิวทางเดิมจากทางหลวงหมายเลข 2034 หน้าพระลาน-บ้านครัว จังหวัดสระบุรี โดยแบ่งตัวอย่างผิวทางเดิมออกเป็น 2 ส่วน วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ประกอบด้วยตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับหินเกล็ดอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ประกอบด้วยตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับหินคลุกอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร โดยปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของมวลรวมแห้ง โดยทำการผสมใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด และใช้ปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด พลังงานในการบดอัด 277.50 ตัน/ลูกบาศก์เมตร ในการทดสอบ CBR ใช้ท่อนเหล็กกลมตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว ทำการทดสอบที่อายุการบ่มอายุ 2, 3 และ 4 วัน

$$\text{Unsoaked CBR} = 246.7\text{DPI}^{-1.56}$$

$$\text{Unsoaked CBR} = 16.44\text{UCS}$$

$$\text{UCS} = 15\text{DPI}^{-1.56}$$

จากผลการศึกษานี้จะเป็นการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนามาตรฐานข้อกำหนด เพื่อใช้ในงานตรวจสอบวิเคราะห์สำหรับการควบคุมงานก่อสร้างชั้นทาง

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Arwut Proudum 2010: Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory Compacted Reclaimed Asphalt Pavement Stabilized with Cement. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Piphat Sornwong, M.Eng. 98 pages.

This study aims to determine the relationships among unsoaked CBR, DCP Penetration Index (DPI) and Unconfined Compressive Strength (UCS), and to determine the physical properties of the old pavement materials. The reclaimed asphalt pavement samples were collected from the highway number 2034 (Naphralan – Bankua Saraburi). Two batches of samples were prepared for laboratory tests. The first batch was a mixture of the reclaimed asphalt pavement and granular rock at 1:1 ratio by volume. The second batch was a mixture of the reclaimed asphalt pavement and crushed rock 1:1 ratio by volume. Portland Cement of 2, 4, 6, 8 and 10 percent by weight was used as stabilized materials for both batches. Cement stabilized samples were prepared at the optimum moisture content and wet of optimum moisture content, using the compaction energy of 277.50 ton/m<sup>3</sup>. A piston having a cross-sectional area of 1 in<sup>2</sup> was used in the CBR test. Specimens were cured for 2, 3 and 4 days.

$$\text{Unsoaked CBR} = 246.7\text{DPI}^{-1.56}$$

$$\text{Unsoaked CBR} = 16.44\text{UCS}$$

$$\text{UCS} = 15\text{DPI}^{-1.56}$$

Results from these studies were used to develop the relationships among Unsoaked CBR, DPI and UCS, and to develop guideline and specification during highway construction control.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์พิพัฒน์ สอนวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทาง ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง  
ต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ดร.จุฑา สุนิตย์สกุลและ  
อาจารย์ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะ  
แนวทาง ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณบัญชา เจริญธัญกรณ์ ข้าราชการห้องปฏิบัติการปฐพีและฐานราก  
สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบ

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชาย อันเป็นที่รักของผู้วิจัยที่ให้การ  
สนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ไปด้วยดี

อาวุธ โปธิ์อุดม  
เมษายน 2553

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	30
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DCP และ UCS	67
ภาคผนวก ข ภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม ต่างๆ วัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์	76
ภาคผนวก ค การคำนวณการปรับเทียบขนาดพ่อนเหล็กกลมตันหัวกด CBR และ พลังงานที่ใช้ขีดอัด	86
ภาคผนวก ง ภาพการทดสอบ	90
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดผลของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์	10
2	ขนาดผลวัสดุโครงสร้างทางเดิม	31
3	ผลทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะวัสดุโครงสร้างทางเดิม	32
4	ผลการทดสอบการบดอัด (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน	33
5	ผลการทดสอบหาค่า CBR แบบแช่น้ำ	35
6	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	38
7	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	39
8	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	42
9	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	43
10	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	46
11	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	49
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ก1	ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR กับ DPI วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	68
ก2	ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR กับ DPI วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	70

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก3	ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	72
ก4	ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	74

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	Dynamic Cone Penetrometer (DCP)	5
2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับ DPI	7
3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับค่า UCS	8
4	โครงสร้างของดินซีเมนต์	13
5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำ	15
6	แรงต้านทานต่อการแตกตัวด้านข้าง (Confining Stress)	16
7	ขนาดผลึกวัสดุโครงสร้างทางเดิม	34
8	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1	34
9	ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2	36
10	ผลการทดสอบ CBR at 0.1 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1	36
11	ผลการทดสอบ CBR at 0.2 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1	37
12	ผลการทดสอบ CBR at 0.1 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2	37
13	ผลการทดสอบ CBR at 0.2 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2	40
14	ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	40
15	ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	41
16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	41
17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	44
18	ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	44

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	45
20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	45
21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	48
22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	51
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	52
24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	52
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	53
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	54
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	55
28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	56

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	57
30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	58
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ข1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	77
ข2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	78
ข3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	79
ข4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	80
ข5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	81
ข6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 25 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	83
ข8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 50 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	84
ข9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 75 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	85
ง1	วัสดุผิวทางเดิมที่ใช้วิจัย	91
ง2	การเตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิม	91
ง3	การชั่งน้ำวัสดุโครงสร้างทางเดิมก่อนทดสอบการบดอัด (Compaction Test)	92
ง4	การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)	92
ง5	การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ	93
ง6	การผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	93
ง7	การบดอัดวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามพลังงานที่กำหนดไว้ใน Mold UCS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว	94
ง8	การบ่มวัสดุตัวอย่าง UCS	94
ง9	การทดสอบ UCS	95
ง10	การบดอัดวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามพลังงานที่กำหนดไว้ใน Mold CBR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว	95
ง11	การบ่มวัสดุตัวอย่าง Unsoaked CBR	96
ง12	การทดสอบ Unsoaked CBR	96
ง13	ตัวอย่างหลังทดสอบ Unsoaked CBR และกลับด้านทดสอบ DCP	97
ง14	การทดสอบ DCP	97

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CBR	=	California Bearing Ratio
DCP	=	Dynamic Cone Penetrometer
DPI	=	DCP Penetration Index
ksc	=	kilogram per square centimeter
MDD	=	Maximum Dry Density
OMC	=	Optimum Moisture Content
S	=	Sample
UCS	=	Unconfined Compressive Strength
W/C	=	Water Cement Ratio

การศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมผสมซีเมนต์บดอัดแน่นใน  
ห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer

Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory Compacted  
Reclaimed Asphalt Pavement Stabilized with Cement

คำนำ

Dynamic Cone Penetrometer (DCP) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินค่าความแข็งแรง  
ชั้นโครงสร้างทาง สามารถใช้ทดสอบเพื่อหาค่า CBR ของวัสดุงานทางในสนามได้อย่างรวดเร็ว  
ค่า CBR จากการทดสอบจะช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินความแข็งแรงของวัสดุที่มีในชั้นโครงสร้าง  
ทางและสามารถประเมินได้ว่าจะออกแบบวัสดุชั้นทางเดิมเป็นโครงสร้างชั้นทางประเภทใด ทำให้  
สามารถออกแบบถนนได้อย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ ในส่วนของงานก่อสร้างการทดสอบ  
DCP ทำให้ผู้ควบคุมงานสามารถตรวจสอบค่า CBR ของชั้นทางในระหว่างก่อสร้างได้ทันทีและ  
สามารถเปรียบเทียบค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบในห้องทดลองว่าสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด  
ทำให้ผู้ควบคุมงานสามารถสั่งแก้ไขได้ทันที ทำให้ได้งานที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้ DCP ยังใช้  
ทดสอบ Soft Spot ตามแนวก่อสร้างถนนเพื่อหาค่า CBR ของชั้นทางที่ไม่ได้มาตรฐานเพื่อทำ  
การแก้ไขระหว่างก่อสร้าง

ธีระชาติ และ พรพรหม (2543) ได้กล่าวว่า เครื่อง DCP เป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ใน  
การประเมินค่า CBR ของชั้นทางถนน และชั้นทางท่าอากาศยาน มานานมากกว่า 20 ปี มีการ  
ใช้อย่างกว้างขวางทั้งใน แอฟริกาใต้ สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลียและประเทศ  
อื่นๆ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย สามารถตรวจวัดค่าดัชนีความแข็งแรง  
ในสนามได้อย่างรวดเร็ว

ในการศึกษานี้ใช้วัสดุผิวทางเดิมจากทางหลวงหมายเลข 2034 ตอน หน้าพระลาน - บ้าน  
ครัว จังหวัดสระบุรี โดยนำวัสดุผิวทางเดิมผสมกับมวลรวม แล้วนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้าน  
วิศวกรรมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ ทดสอบหาค่า Unsoaked CBR, DCP  
Penetration Index (DPI) และ UCS

## วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม
2. ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ของตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณปูนซีเมนต์ ระยะเวลาการบ่ม และปริมาณความชื้น
3. ศึกษาเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการจมของหัวตุ้มเหล็กทดสอบ (DCP Penetration Index, DPI) ด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) และผลการทดสอบ Unsoaked CBR ของตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณปูนซีเมนต์ ระยะเวลาการบ่ม และปริมาณความชื้น
4. ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS

## ขอบเขตการศึกษา

1. วัสดุผิวทางเดิมที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จากทางหลวงหมายเลข 2034 ตอน หน้าพระลาน - บ้านครัว จังหวัดสระบุรี โดยแบ่งผิวทางเดิมออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ประกอบด้วยผิวทางเดิมผสมกับหินเกล็ดอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ประกอบด้วยผิวทางเดิมผสมกับหินคลุกอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร
2. ทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิมดังนี้ การหาขนาดคละเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง (Gradation) ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และค่าดัชนีพลาสติก (Atterberg's Limits)

3. ทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุโครงสร้างทางเดิมดังต่อไปนี้ การบดอัด (Compaction Test) และค่าการแบกทาน (California Bearing Ratio Test) แบบแช่น้ำ
4. ทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ระยะเวลาการบ่ม และปริมาณความชื้น ด้วยวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้ Unconfined Compressive Strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR) และ Dynamic Cone Penetrometer (DCP)
5. ใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว ทดสอบ Unsoaked CBR
6. ใช้พลังงานบดอัด 277.50 ตัน/ลูกบาศก์เมตร การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Proctor) ใช้ค้อนน้ำหนัก 10 ปอนด์

## การตรวจเอกสาร

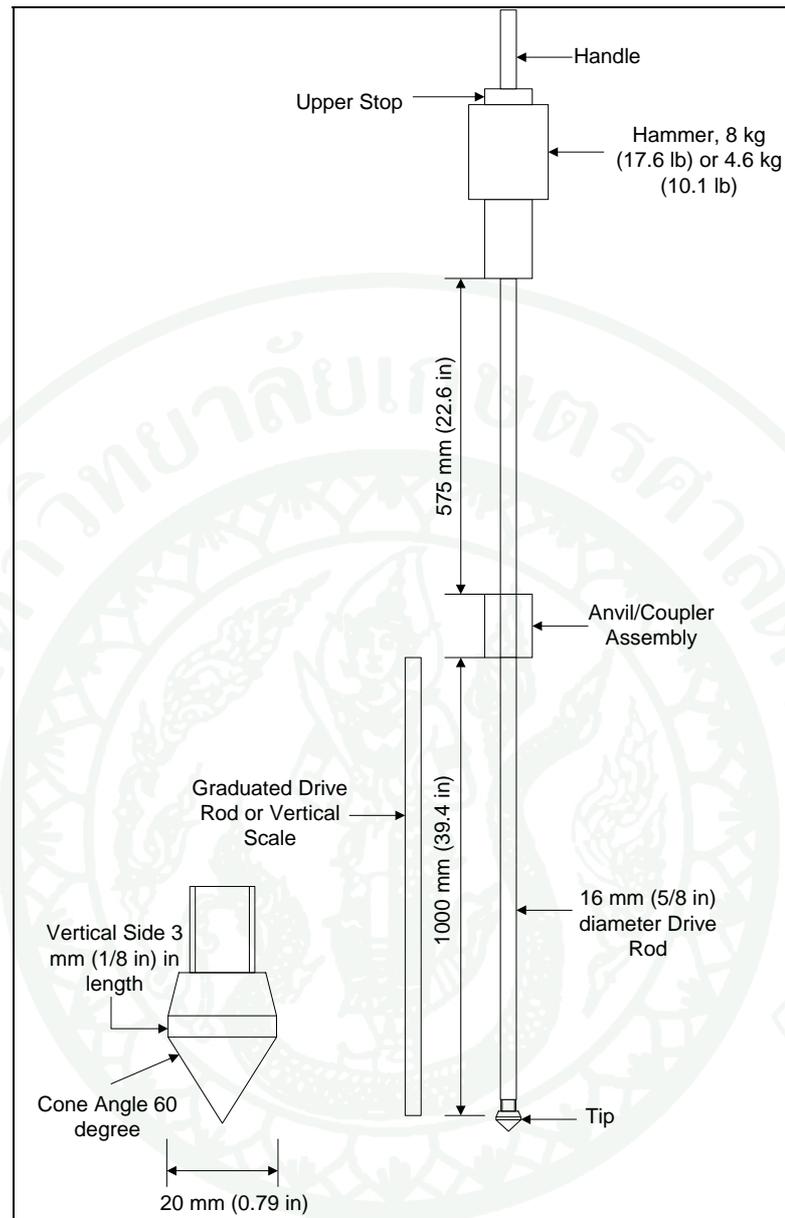
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 1. Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Dynamic Cone Penetrometer (DCP) ดังภาพที่ 1 เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับประเมินค่า CBR ในสนามแบบ Non-Destructive Test ที่สามารถใช้ทดสอบเพื่อหาค่า CBR ของดินในสนามได้อย่างรวดเร็ว ธีระชาติ และ พรพรม (2543) ได้กล่าวว่า การทดสอบ DCP จะต้องใช้ผู้ทดสอบอย่างน้อย 3 คน ร่วมกันทดสอบ โดยแต่ละคนมีหน้าที่ต่างกัน คนที่หนึ่งจะเป็นผู้จับเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้ง คนที่สองทำหน้าที่ยกตุ้มน้ำหนักขนาด 8 กก. ขึ้นจนถึงระดับที่กำหนดไว้และปล่อยให้ตกอย่างอิสระเพื่อกดหัวกรวยให้จมลงไป在地ดินและคนที่สามทำหน้าที่จับบันทึกข้อมูลระยะที่หัวกรวยจมลงไป在地ดิน วิธีการทดสอบ เริ่มต้นโดยการเลือกจุดที่จะทดสอบและจัดวางเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้งจากนั้นทำการยกตุ้มขึ้นจนได้ระยะ 575 มิลลิเมตรจากนั้นปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงมาอย่างอิสระกระแทกกับเหล็กยึดแกนซึ่งจะกดปลายกรวยให้จมลงไป在地ดินเล็กน้อยก่อน จากนั้นทำการทดสอบซ้ำเหมือนเดิมจนปลายกรวยจมลงไป在地ดินอย่างต่อเนื่องจนได้ระยะที่ต้องการ

Dynamic Cone Penetrometer (DCP) เป็นเครื่องมือทดสอบที่ออกแบบมาให้มีประสิทธิภาพและวิธีการใช้งานที่ง่าย การทดสอบสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่องจนถึงความลึก 800 มิลลิเมตร และสามารถต่อกันเหล็กเพิ่มความยาว เพื่อเพิ่มความลึกให้ทดสอบได้ลึกถึง 1200 มิลลิเมตร การทดสอบใช้เวลาน้อยสามารถเก็บข้อมูลในจุดที่ต้องการตรวจสอบได้ทันที โดยไม่ต้องเปิดหน้าดินให้เกิดความเสียหาย

การทดสอบ DCP เป็นการหาค่าอัตราการจมของหัวตุ้มเหล็ก โดยการใช้พลังงานในการทดสอบแต่ละครั้งเท่ากัน ค่าที่ได้จะเป็นอัตราการจมของหัวตุ้มเหล็กต่อครั้ง ดินที่มีความแข็งแรงมากก็จะมีแรงต้านทานที่หัวตุ้มเหล็กมาก ทำให้อัตราการจมของหัวตุ้มเหล็กต่ำ และในทางตรงกันข้ามดินที่มีความแข็งแรงน้อย แรงต้านทานที่หัวตุ้มเหล็กน้อย ทำให้อัตราการจมของหัวตุ้มเหล็กสูง ผลที่ได้จากการทดสอบนำไปเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลทดสอบ DCP กับ Unsoaked CBR



ภาพที่ 1 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

ที่มา: Sawangsuriya and Edil (2005)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI กับ CBR การทดสอบ DCP จะวัดค่าความต้านทานต่อการจมของหัวตุ้มเหล็ก (Piston) เรียกว่าค่า DCP Penetration Index (DPI) มีหน่วยเป็น mm/blows ค่า DPI ตลอดความลึกของการจม สามารถประมาณได้จากวิธี Arithmetic Average ดังแสดงในสมการที่ 1 Sawangsurinya and Edil (2005)

$$DPI_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N (DPI)_i}{N} \quad (1)$$

เมื่อ  $N$  = จำนวน DPI ทั้งหมดที่บันทึกตลอดความลึกที่ทดสอบ

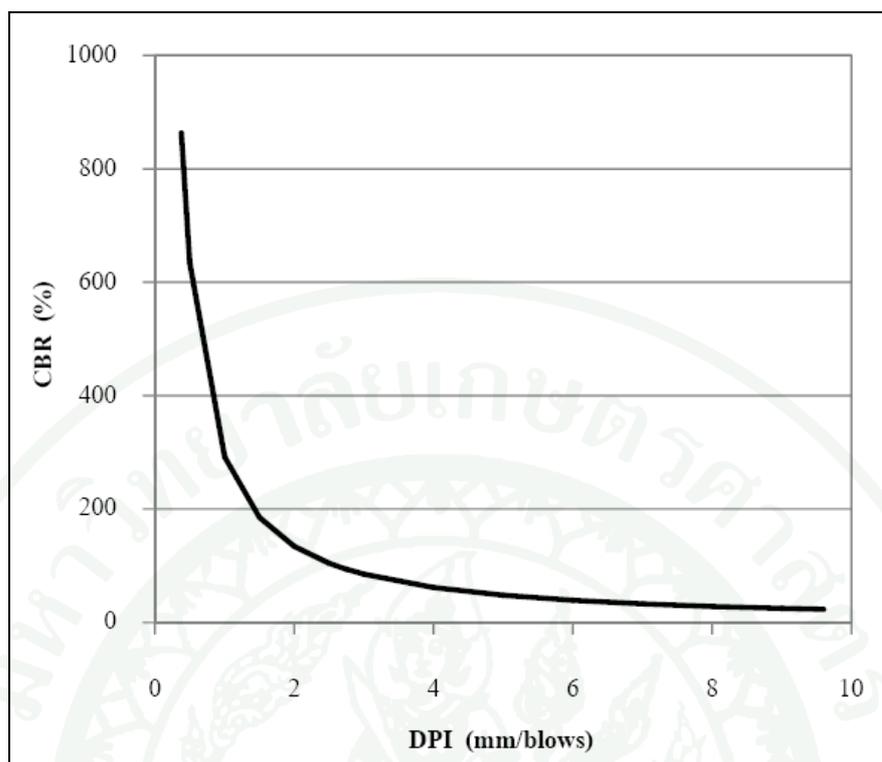
Sawangsurinya and Edil (2005) ได้กล่าวว่า มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาวิจัยพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI กับค่า CBR ของวัสดุชั้นทางทั้ง Granular และ Cohesive Materials ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\log(CBR) = \alpha + [\beta \log(DPI)] \quad (2)$$

โดยที่ CBR มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ และ DPI มีหน่วยเป็น mm/blows ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha$  และ  $\beta$  มีค่าเท่ากับ 2.46 และ -1.12 ตามลำดับ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ไปแทนในสมการที่ 2 จะได้ดังแสดงในสมการที่ 3 และภาพที่ 2

$$CBR (\%) = 292DPI^{-1.12} \quad (3)$$

ความสัมพันธ์นี้ได้รับการยอมรับจากหลายองค์กรและนักวิจัย สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่า Field CBR ในสภาพที่แท้จริงของชั้นโครงสร้างทาง

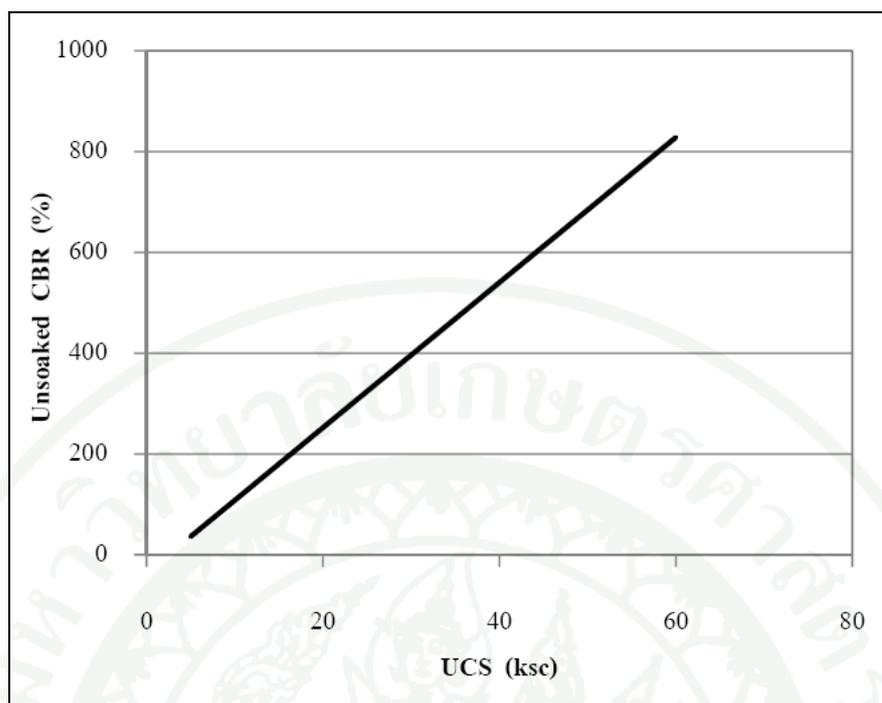


ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับ DPI

ที่มา: Sawangsurriya and Edil (2005)

ธีระชาติ และ ทรงพล (2534) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (UCS) กับ Unsoaked CBR ของดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ในช่วงอายุการบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์ต่างๆ โดยที่ UCS มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ดังแสดงในสมการที่ 4 และภาพที่ 3

$$\text{Unsoaked CBR (\%)} = 14.41\text{UCS} - 36.31 \quad (4)$$



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS

ที่มา: ชีระชาติ และ ทรงพล (2534)

## 2. วัสดุโครงสร้างทางเดิม

วัสดุโครงสร้างทางเดิม คือวัสดุที่ได้จากการขุดหรือ ขุดไสจากชั้นทางเดิมแล้วนำมาทำให้ ร่วนในกรณีที่วัสดุชั้นทางเดิมหลังจากขุดหรือขุดไส และทำให้ร่วนแล้วมีขนาดคละ หรือคุณสมบัติ อื่นๆ ไม่เป็นไปตามรูปแบบและข้อกำหนด ให้แก้ไขปรับปรุงหรือนำวัสดุผสมเพิ่มมาผสมเพื่อให้ได้ ตามรูปแบบและข้อกำหนด

2.1 วัสดุผสมเพิ่ม คือวัสดุที่นำมาผสมเพิ่มจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เข้ากัน ได้ดีกับ วัสดุชั้นทางเดิม หรือวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นที่นำมาใช้ เพื่อให้ทำให้อุณหภูมิทางด้านวิศวกรรมของ ส่วนผสมมีความแข็งแรงเป็นไปตามข้อกำหนดในรูปแบบที่ผู้ออกแบบระบุไว้

2.1.1 ปูนซีเมนต์ คือปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ต้องเป็นปูนใหม่ บรรจุอยู่ในไซโลหรือเป็นแบบบรรจุถุงก็ได้ จะต้องจัดทำสถานที่เก็บให้เหมาะสมเพื่อป้องกัน ไม่ให้ปูนซีเมนต์ชื้นหรือเสื่อมคุณภาพ

2.1.2 น้ำที่จะนำมาใช้ผสมจะต้องสะอาดปราศจากสารไม่พึงประสงค์ต่างๆ เช่น เกลือ น้ำตาล น้ำมัน กรด ด่าง และอินทรีย์วัตถุ หรือสารเคมีที่อาจกระทบต่อคุณภาพของวัสดุที่ผสม

## 3. วัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในการทำหน้าที่ยรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างทาง ซึ่งมวลรวมเป็นวัสดุเนื้อหยาบและความแข็งแรง ใช้สำหรับผสมมีลักษณะก้อนเล็กๆ เช่น หินคลุก กรวด ทราย กากถลุง และหินฝุ่น เป็นต้น

3.1 หินคลุก (Crushed Rock) เป็นวัสดุหินโม่มวลรวมมีเนื้อแข็ง เหนียว สะอาด ไม่ผุ ปราศจากวัสดุอื่นเจือปน มีขนาดคละกันดี เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรง (Gradation) ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตรงตาม ตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ขนาดผลของวัสดุหินคลุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล		
	B	C	D
50.0 (2")	100	-	-
25.0 (1")	75-95	100	100
9.50 (3/8")	40-75	50-85	60-100
4.75 (เบอร์ 4)	30-60	35-65	50-85
2.00 (เบอร์ 10)	20-45	25-50	40-70
0.425 (เบอร์ 40)	15-30	15-30	25-45
0.075 (เบอร์ 200)	5-20	5-15	5-20

**ที่มา:** กรมทางหลวง (2532)

3.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) คือมวลรวมที่มีขนาดผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) และต้องคุณสมบัติดังนี้

3.2.1 ต้องเป็นหินฝุ่นหรือทราย สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ตะกอน หรืออินทรีย์วัตถุผสมปะปนอยู่ และจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ

3.2.2 ค่า Sand Equivalent เมื่อทำการทดสอบตามวิธีของ AASHTO T 176 มากกว่า ร้อยละ 50 โดยปกติถ้าไม่จำเป็นไม่ควรใช้ทราย ถ้าจะใช้ควรก็ต่อเมื่อมีความจำเป็น เช่น ต้องการปรับปรุงขนาดผลของมวลรวม และเพิ่มปริมาณ เป็นต้น

#### 4. ดินซีเมนต์ (Soil Cement)

##### 4.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมสำหรับวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์

คุณสมบัติทางด้านกายภาพที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยซีเมนต์ คือ ส่วนคละของดิน พื้นที่ผิวของวัสดุ และปริมาณของจุดสัมผัส วัสดุประเภทที่มีการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินดี (Well-Graded) โดยทั่วไปแล้วจะมีความต้องการปริมาณซีเมนต์ที่น้อยกว่าวัสดุประเภทที่มีการกระจายตัวขนาดเดียว (Uniform-Graded) ความต้องการซีเมนต์ของวัสดุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของวัสดุและปริมาณของจุดสัมผัส หมายความว่า ปริมาณความต้องการซีเมนต์ในดินเม็ดละเอียดจะมีปริมาณสูงกว่าดินเม็ดหยาบ

ในการศึกษานี้จะทำการรวบรวมข้อมูลทางวิศวกรรมด้านกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยซีเมนต์ จากการศึกษาบทความทางวิชาการต่างๆ พบว่า คุณสมบัติของวัสดุงานทางก่อนที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติ มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม อาทิเช่น ปริมาณมวลรวมละเอียด, ปริมาณมวลรวมหยาบ, ค่าความแข็งแรงของวัสดุ, ค่าขีดจำกัด (Atterberg's Limits) ค่าการแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR) และความหนาแน่น (Density) โดยคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่กล่าวมาข้างต้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน

##### 4.2 แนวความคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลง

แนวความคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของดินซีเมนต์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในส่วนประกอบและโครงสร้างของดินซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งแบ่งให้เห็นเป็น 3 ขั้นตอน คือ

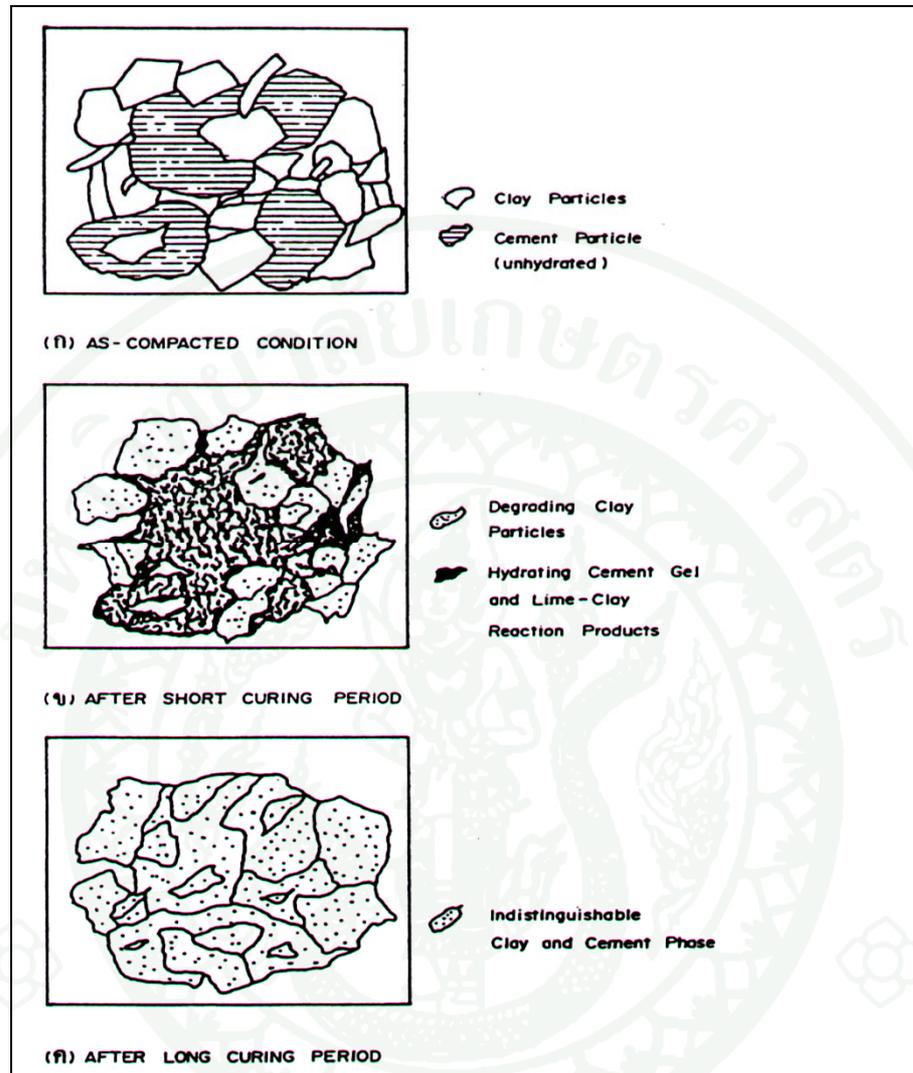
1. ภายใต้การบดอัด ขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่ซีเมนต์ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ และจะเข้าไปผสมกับอนุภาคของดินตามภาพที่ 4 (ก)
2. ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของซีเมนต์จะเริ่มมีปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำขึ้นทำให้

เกิดเป็นวุ้นซีเมนต์ แทรกซึมตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และ (Released Lime) เริ่มทำปฏิกิริยากับ ดินที่มี (Active Soil Silica) และ (Active Soil alumina) ที่ละลายปนอยู่ในน้ำจะเป็นผลให้เกิด การแยกตัวของ (Soil Silica) และ (Soil Alumina) ในดิน และผลของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะ แผ่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังแสดงในภาพที่ 4 (ข)

3. ภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของซีเมนต์จะเกิดกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมี กับน้ำอย่างสมบูรณ์อันมีผลทำให้ปริมาณวุ้นซีเมนต์ และขอบเขตการแทรกซึมของวุ้นซีเมนต์แผ่ กระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินซีเมนต์ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 4 (ค)

ทั้ง 3 ขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าขั้นตอน 1 ในภาพที่ 4 (ก) อาจจะไม่เป็นจริง ตามธรรมชาติเพราะดินในธรรมชาติมักจะมี ความชื้นอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นขั้นตอนที่ 1 และ 2 จะเกิดพร้อมกันไปเพราะว่าซีเมนต์เมื่อผสมกับความชื้นในดินหรืออากาศจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ น้ำอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งลบล้างปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1

หลังจากซีเมนต์ผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นผลให้เกิด (Calcium Silicate hydrated) ในรูปของวุ้นขึ้นในส่วนผสมของซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้น จึงสามารถที่จะเข้าใจได้ว่า ภายใต้สภาวะของการบดอัดอนุภาคซีเมนต์มิได้ผสมกับดินแต่เพียงอย่างเดียวแต่จะเกิดกระบวนการ ปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ ตามข้อ 1 - 3 ด้วย



ภาพที่ 4 โครงสร้างของดินซีเมนต์

ที่มา: ธีระชาติ และ มีฤกษ์ (2543)

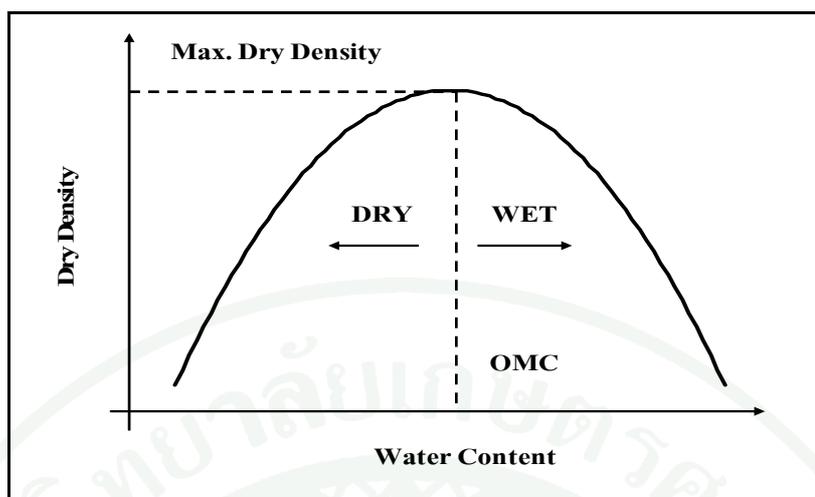
## 5. ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบ

### 5.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

ดินประกอบด้วยเม็ดดินขนาดต่างๆ ระหว่างเม็ดดินเหล่านี้มีรูพรุน (Void) ในรูพรุนมีน้ำและอากาศแทรกอยู่ การทำให้ดินแข็งแรงขึ้นโดยทำให้รูพรุนเหล่านี้ลดลงทางกลศาสตร์ เรียกว่า การบดทับ การบดทับที่ดี บางครั้งสามารถทำให้รูพรุนที่มีอากาศอยู่ (Air Void) เกือบหมดไปได้เมื่อทำได้เช่นนี้แล้ว ภายหลังจากความชื้นในจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักความหนาแน่นแห้งของดินที่ถูกบดอัดในห้องทดลองที่สำคัญๆ ดังนี้

1. ปริมาณน้ำในดิน (Water Content) หรือ (Moisture Content)
2. ธรรมชาติของดินคือ ขนาดของเม็ดดิน ส่วนกละ (Gradation) และคุณสมบัติด้านกายภาพ เช่น ความถ่วงจำเพาะ ลักษณะของเม็ดดิน เป็นต้น
3. พลังงานที่ใช้บดอัดเป็นการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Proctor) ใช้ค้อนน้ำหนัก 10 ปอนด์

ในการทำการบดอัดในห้องทดลอง ซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดอัดในสนาม เข้ามาผึ่งให้แห้งแล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาณที่พอเหมาะ แล้วเริ่มทำการบดอัดในแบบ (Mold) โดยวิธีการที่จะกล่าวรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาความหนาแน่น ในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆ อย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดแต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นแห้งกับความชื้นจะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า ความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า (Optimum Water Content) ซึ่งจะได้ นำเอาค่าที่ได้นี้ไปใช้ในการทดลองหาค่าการแบกทาน โดยใช้เปอร์เซ็นต์น้ำที่ความชื้น  $\pm 1\%$ , ความชื้น  $\pm 2\%$  และความชื้น  $\pm 3\%$  แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้นที่เหมาะสม (Moisture Content)



ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำ

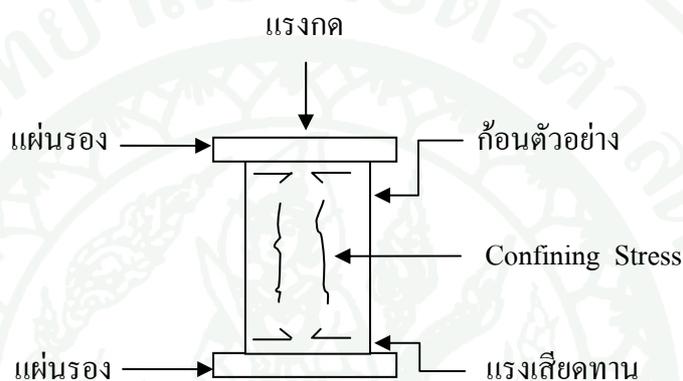
### 5.2 การทดสอบการแบกทาน (California Bearing Ratio)

การทดสอบการแบกทาน (California Bearing Ratio) เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเฉือนของดินที่บดอัดจนแน่นดีแล้ว ส่วนมากจะทดสอบที่ปริมาณความชื้นสูงสุด โดยใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับหน่วยแรงกด (Unit Load) มาตรฐานที่ได้จากการกด (Penetration) ค่าที่ได้เรียกว่า เปอร์เซ็นต์การแบกทาน นำค่าที่ได้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับค่าการแบกทาน จากค่าการแบกทาน ของดินแต่ละชนิดยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินอย่างคร่าวๆ ว่าเหมาะสมที่จะใช้กับงานก่อสร้างถนนในชั้นดินถม ชั้นรองพื้นทาง (Sub base) หรือชั้นพื้นทาง (Base)

### 5.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด(Unconfined Compressive Strength)

ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) คือค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแท่งตัวอย่างดินรูปทรงกระบอกหรือรูป (Prismatic) จะรับได้ ถ้าในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อความเครียด (Strain) ในแนวตั้งเกินร้อยละ 20 ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ที่ความเครียดร้อยละ 20 นั้นเป็นค่า Unconfined Compressive Strength (UCS)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะเป็นค่าบ่งบอกถึงคุณสมบัติความสามารถต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่าง ขณะที่กดก้อนตัวอย่างก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้างทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าวจะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างเรียกว่า Confining Stress ดังภาพที่ 6 โดยค่า Confining Stress จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองมีค่ามาก Standard Methods for Testing Aggregate and Concrete (2543)



ภาพที่ 6 แรงต้านทานต่อการแตกตัวด้านข้าง (Confining Stress)

ที่มา: Standard Methods for Testing Aggregate and Concrete (2000)

ก้อนตัวอย่างที่มีความชื้นจะส่งผลทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่แห้ง เพราะการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ เนื่องมาจากการดูดซึมน้ำจะส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมลดลง

ความเครียดในแนวตั้งสำหรับแรงกดใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5)$$

เมื่อ  $E$  = ความเครียดในแนวตั้ง สำหรับแรงกดใดๆ

$\Delta L$  = ระยะยวบตัวของตัวอย่างที่ถูกกดอ่านได้จาก Dial Gauge

$L_0$  = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (6)$$

โดย  $\sigma_c$  = ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ  
 $P$  = แรงกด  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้นๆ

#### 5.4 การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) ซีระชาติ และ พรพรหม (2543) ได้กล่าวว่า จะต้องใช้ผู้ทดสอบอย่างน้อย 3 คน ร่วมกันทดสอบ โดยแต่ละคนมีหน้าที่ต่างกัน คนที่หนึ่งจะเป็นผู้จับเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้ง คนที่สองทำหน้าที่ยกตุ้มน้ำหนักขนาด 8 กก. ขึ้นจนถึงระดับที่กำหนดไว้และปล่อยให้ตกอย่างอิสระเพื่อกดหัวกรวยให้จมลงไปดินและคนที่สามทำหน้าที่จดบันทึกข้อมูลระยะที่หัวกรวยจมลงไปดิน วิธีการทดสอบเริ่มต้นโดยการเลือกจุดที่จะทดสอบและจัดวางเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้งจากนั้นทำการ ยกตุ้ม น้ำหนักขึ้นจนได้ ระยะ 575 มิลลิเมตรจากนั้นปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงมาอย่างอิสระกระแทกกับเหล็กยึดแกนซึ่งจะกดปลายกรวยให้จมลงไปดินเล็กน้อยก่อน จากนั้นทำการทดสอบซ้ำเหมือนเดิมจนปลายกรวยจมลงไปดินอย่างต่อเนื่องจนได้ระยะที่ต้องการ ระหว่างทำการทดสอบให้จดบันทึกจำนวนที่ลูกตุ้มน้ำหนักตกกระทบและความลึกที่จม จำนวนการจดบันทึกไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความแน่นของดินที่ทดสอบ ภายหลังจากทดสอบแล้วเสร็จก็ทำการถอนเครื่องมือจากดิน โดยใช้ตุ้มน้ำหนักกระแทกที่ด้ามจับหลายๆครั้งเพื่อให้แกนเหล็กขยับขึ้นมาจากปลายกรวยโผล่พื้นดิน

การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) ประสิทธิภาพ ๒๕๓๖ ได้เสนอข้อควรระวังในการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ควรตรวจดูว่าสภาพผิวและที่ปลายของ Cone อยู่ในสภาพที่เรียบร้อยตามมาตรฐาน และท่อนล่างคือ Rod ก็ตรงไม่โค้งงอ
2. รอยต่อระหว่างท่อนล่าง (Rod & Cone) กับท่อนบน (Handle) ชัน (Screw) คิดกันแน่นทุกครั้งก่อนเริ่มลงมือทดลองและถ้าระหว่างการทดลองเกิดหลวม จะทำให้อายุของเครื่องมือสั้นลง
3. ต้องจับเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้งเสมอ โดยใช้ลูกน้ำวัด ตลอดการทดลองและถ้าระหว่างการทดลองเกิดเอียงขึ้นมาต้องพยายามแก้ไขให้อยู่ในแนวตั้ง เพราะถ้าเอียงข้อมูลที่ได้จะไม่ถูกต้อง
4. ก่อนเริ่มทำการตอก ถ้าบริเวณผิวบนสุดของชั้นวัสดุมีลักษณะเปื่อยยุ่ย เช่น หลังฝนตกใหม่ๆ (ในดินที่มี PI สูง) หรือเป็นฝุ่น (ในดิน Non Plastic) ให้ทำการเคาะเบาๆ ด้วยตุ้มน้ำหนักของเครื่องมือลงไปประมาณ 1-2 เซนติเมตรหรือให้ตัว Cone จมลงไปแล้วจึงเริ่มต้นอ่านค่าที่ระยะ นั้นเป็นศูนย์ เป็นจุดเริ่มต้นการจรม เนื่องจากผิวบนสุดที่มีสภาพดังกล่าวจะมีค่า CBR ต่ำกว่าค่าที่แท้จริง
5. การยกตุ้มน้ำหนัก 8 กิโลกรัม เพื่อทำการตอกทุกครั้งต้องยกให้แตะถึงฐานล่างของ Handle และแตะเพียงเบาๆ เท่านั้นแล้วจึงปล่อยให้หล่นลงมาด้วยน้ำหนักของตัวเอง อย่ายกต่ำไปโดยไม่ถึงฐานล่างของ Handle หรือยกแรงไปจนกระแทกฐานล่างของ handle ซึ่งจะทำให้เครื่องมือทั้งชุดขยับขึ้นจากตำแหน่งเดิม ซึ่งจะทำให้เกิดข้อมูลผิดพลาดได้
6. การกำหนดตำแหน่งอ้างอิง โดยด้านบนกำหนดที่ฐาน (Anvil) รองรับตุ้มเหล็ก ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ด้านล่างกำหนดที่ด้านบน Mold CBR ใช้แผ่นเหล็กตรงหรือเหล็กฉากวางบน Mold CBR

7. การอ่านระยะจมน้ำทุกครั้ง ไม้วัดควรอยู่ในแนวตั้งทุกครั้งเพื่อป้องกันการผิดพลาดจากการอ่านแต่ละครั้ง ข้อควรระวังก่อนทำการอ่านระยะจมน้ำทุกครั้งจะต้องตรวจสอบด้านบน Mold CBR ว่าได้ระดับหรือไม่ เพราะบางครั้งหลังจากตอกเสร็จเศษตัวอย่างจะโผล่โนนขึ้นมา จะต้องใช้เหล็กปาดออกให้ได้ระดับก่อนทำการอ่านระยะจมน้ำ

8. ถ้าตอก 20 ครั้งแล้วไม่สามารถวัดค่าที่จมได้ ถือว่าเกินความสามารถของเครื่องมือที่จะวัดถ้าฝืนตอก ก้าน Rod อาจจะไม่งอหรือส่วนอื่นๆ ของเครื่องมือจะชำรุดไปด้วย



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์

1.1 อุปกรณ์ทดสอบหาขนาดคละของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้า (Sieve Analysis) ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 204/2516

1.2 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าพลาสติกของวัสดุตัวอย่าง (Atterberg's Limits) ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 102/2515 และ ทล.-ท. 102/2515

1.3 อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 101/2515

1.4 อุปกรณ์ทดสอบการบดอัด (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 108/2517

1.5 อุปกรณ์ทดสอบการแบกทาน (California Bearing Ratio) ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 109/2517

1.6 อุปกรณ์ทดสอบ (Dynamic Cone Penetrometer, DCP)

1.7 ตลับเมตร

## 2. วัสดุ

### 2.1 ผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement)

วัสดุผิวทางเดิมที่นำมาใช้ในการศึกษาจากทางหลวงหมายเลข 2034 ตอน หน้าพระลาน - บ้านครัว จังหวัดสระบุรี

### 2.2 วัสดุมวลรวม (Aggregate)

2.2.1 หินเกล็ด (Granular Rock) หินเกล็ดที่นำมาใช้ในการศึกษาจากห้องปฏิบัติการปฐพีและฐานราก สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

2.2.2 หินคลุก (Crushed Rock) หินคลุกที่นำมาใช้ในการศึกษาจากห้องปฏิบัติการปฐพีและฐานราก สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15

## วิธีการ

### 1. เตรียมตัวอย่าง

นำวัสดุผิวทางเดิมจากทางหลวงหมายเลข 2034 ตอน หน้าพระลาน - บ้านครัว จังหวัดสระบุรี มาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน จะได้วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ประกอบด้วยวัสดุผิวทางเดิมผสมกับหินเกล็ดอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ประกอบด้วยวัสดุผิวทางเดิมผสมกับหินคลุกอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

## 2. วิธีการทดสอบวัสดุ

2.1 ทดสอบหาขนาดคละ (Sieve Analysis) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 และ 2 โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง เพื่อหาขนาดคละของมวลรวม (Gradation) แล้วเปรียบเทียบกับมวลรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง หรือค้ำบนตะแกรงตามขนาดต่างๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{R}{T} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ P = เปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก

R = มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

T = มวลของตัวอย่างทั้งหมด

2.2 ทดสอบหาค่าพลาสติกของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 และ 2 เพื่อหาค่าจํานวนน้ำต่ำสุดในวัสดุตัวอย่าง เมื่อวัสดุตัวอย่างนั้นยังคงอยู่ในสภาพพลาสติก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Liquid Limit (LL)} = \frac{\text{มวลของน้ำในดิน (gm)}}{\text{มวลของดินอบแห้ง (gm)}} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ Liquid Limit (LL) = ปริมาณของน้ำที่มีอยู่พอดีในดินซึ่งทำให้ดินเปลี่ยนจากภาวะ Plastic เป็นภาวะ Liquid

$$\text{Plastic Limit (PL)} = \frac{\text{มวลของน้ำ (gm)}}{\text{มวลของดินแห้ง (gm)}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{Plastic Index (PI)} = \text{LL} - \text{PL} \quad (10)$$

เมื่อ Plastic Limit (LL) = อัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำต่อมวลของดินแห้ง

Plastic Index (PI) = ค่าจำนวนน้ำต่ำสุดในดิน เมื่อดินนั้นยังคงอยู่ในสภาพ Plastic

2.3 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 และ 2 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$G_s = \frac{G_t \cdot M_s}{M_s - M_1 - M_2} \quad (11)$$

เมื่อ  $G_s$  = ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

$G_t$  = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ  $t$  (องศาเซลเซียส) (เปิดตารางที่ 1 ตามมาตรฐานการทดสอบ ทล.-ท. 101/2515)

$M_s$  = มวลของดินแห้ง (gm)

$M_1$  = มวลของขวด + มวลของน้ำ + มวลของดิน (gm)

$M_2$  = มวลของขวด + มวลของน้ำ (gm)

$t$  = อุณหภูมิของของผสมในขวด Pycnometer ขณะซึ่งหามวลมีหน่วยเป็น (องศาเซลเซียส)

2.4 ทดสอบการบดอัด (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นสูงสุดของวัสดุตัวอย่างกับปริมาณน้ำที่ใช้บดอัด สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ปริมาณน้ำในวัสดุรวมเป็นร้อยละ

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100 \quad (12)$$

- เมื่อ  $W$  = ปริมาณน้ำในมวลรวมเป็นร้อยละคิดเทียบกับน้ำหนักของ  
มวลรวมอบแห้ง
- $M_1$  = น้ำหนักของมวลรวมเปียก (gm)
- $M_2$  = น้ำหนักของมวลรวมอบแห้ง (gm)

ค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\sigma_t = \frac{A}{V} \quad (13)$$

- เมื่อ  $\sigma_t$  = ความแน่นเปียก (gm/cm<sup>3</sup>)
- $A$  = น้ำหนักของมวลรวมเปียกที่บดทับในแบบ (gm)
- $V$  = ปริมาตรของมวลรวมเปียกที่บดทับในแบบ (cm<sup>3</sup>)

ค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (14)$$

- เมื่อ  $\rho_d$  = ความแน่นแห้ง (gm/cm<sup>3</sup>)
- $\rho_t$  = ความแน่นเปียก (gm/cm<sup>3</sup>)
- $\omega$  = ปริมาณน้ำในมวลรวมเป็นร้อยละ

2.5 ทดสอบหาค่าการแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR) เพื่อเปรียบเทียบกับ Bearing Value ของวัสดุตัวอย่างกับวัสดุหินมาตรฐาน เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีนั้น โดยใช้ก้อนบดทับในแบบที่ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) เพื่อนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างของถนนและใช้ควบคุมงานการบดทับให้ได้ความแน่นและความชื้นตามความต้องการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ค่าการแบกทาน (CBR) มีหน่วยเป็นร้อยละ

$$\text{CBR (\%)} = \frac{X}{Y} \times 100 \quad (15)$$

เมื่อ X = ค่าแรงกดที่อ่านได้ต่อหน่วยพื้นที่ของท่อนกด  
(สำหรับ Penetration ที่ 2.54 มิลลิเมตร หรือ 0.1 นิ้ว  
และที่เพิ่มขึ้นอีกทุกๆ 2.54 มิลลิเมตร)

Y = ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Load)  
กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่าการขยายตัว (Swell) มีหน่วยเป็นร้อยละ

$$\text{Swell (\%)} = \frac{S}{H} \times 100 \quad (16)$$

เมื่อ S = ผลต่างระหว่างการอ่าน Reading ครั้งแรกและครั้งสุดท้าย  
ของ Dial Gauge ที่วัด Swell (mm)

H = ความสูงเริ่มต้น (Initial Height) ของก้อนตัวอย่างแห้งน้ำ  
(mm)

2.6 ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) คือ ค่าแรงอัด (Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งก้อนตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกการทดสอบจะให้แรงกดในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว ถ้าค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อความเครียด (Strain) ในแนวตั้งเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ความเครียด 20 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นค่า Unconfined Compressive Strength อัตราการเพิ่มแรงอัดในระหว่างการทดสอบจะควบคุม โดย ความเครียดหรือควบคุมโดยความเค้น (Stress) สามารถคำนวณได้ดังนี้

ความเครียดในแนวตั้ง สำหรับแรงกดใดๆ

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (17)$$

เมื่อ  $E$  = ความเครียดในแนวตั้ง สำหรับแรงกดใดๆ

$\Delta L$  = ระยะยวบตัวของแท่งตัวอย่างที่แรงกดใดๆ ที่อ่านค่าจาก Dial Gauge

$L_0$  = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (18)$$

เมื่อ  $\sigma_c$  = ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ

$P$  = แรงกด

$A$  = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้นๆ

### 3. พลังงานที่ใช้บดอัด

พลังงานที่ใช้บดอัดเป็นตัวแปรสำคัญมากในการทดสอบ การบดอัดดินในห้องทดสอบ จะต้องคำนึงถึง ขนาดแบบทดสอบ น้ำหนักก้อนที่ใช้ ระยะตกกระทบของก้อน จำนวนชั้นดินที่บดอัดและความหนาของชั้นดินในการบดอัดแต่ละชั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = \frac{B \times N \times H \times W}{V} \quad (19)$$

เมื่อ  $E$  = พลังงานที่ใช้ในการบดอัด ( $t \cdot m/m^3$ )

$B$  = จำนวนชั้น

$N$  = จำนวนครั้งที่ตอกในแต่ละชั้น

$W$  = น้ำหนักของก้อนตอก (ton)

$H$  = ระยะตกกระทบของก้อน (m)

$V$  = ปริมาตรของดินในแบบทดสอบ ( $m^3$ )

#### 4. การเปรียบเทียบขนาดท่อนเหล็กกลมตันหัวกด CBR

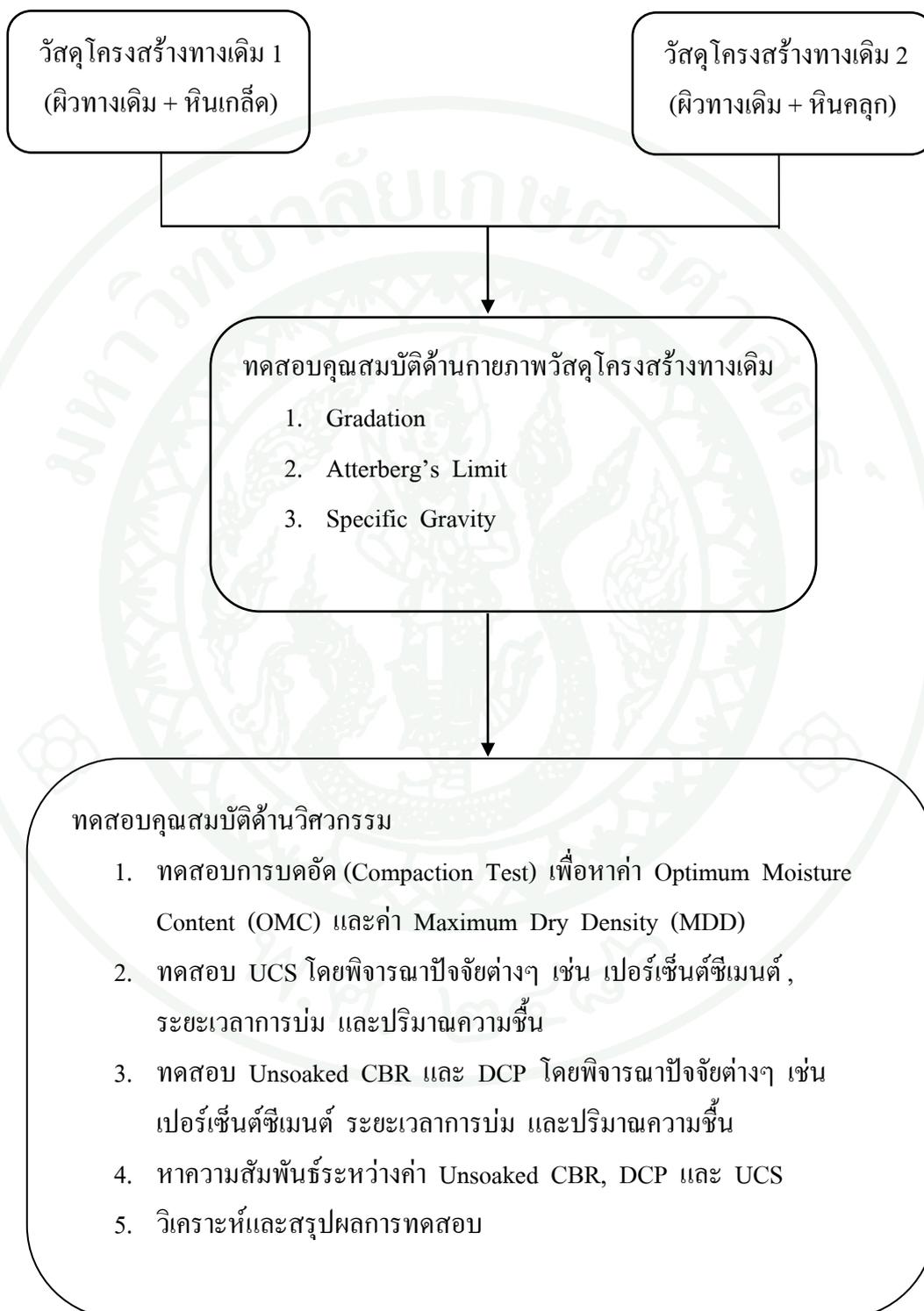
การศึกษานี้ใช้ท่อนเหล็กกลมตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว จึงทำการเปรียบเทียบขนาดท่อนเหล็กกลมตันหัวกด CBR ให้มีค่าเทียบเท่ากับขนาดหัวกดตามมาตรฐาน (ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{Y}{D1''} = \frac{X}{D3''} \quad (20)$$

$$\text{จะได้} \quad Y = \frac{X}{D3''} \times D1'' \quad (21)$$

- เมื่อ
- Y = ระยะปรับแก้ที่นำมาใช้อ้างอิงสำหรับอ่านค่าแรงกด
  - X = ระยะการจมใดๆ ของท่อนเหล็กกลมตัน
  - D1'' = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 1 ตารางนิ้ว
  - D3'' = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 3 ตารางนิ้ว

### แผนงานการวิจัย



### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม
2. ทราบถึงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนต่างๆ ในแต่ละช่วงอายุการบ่ม
3. พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ เพื่อแนวทางในการตรวจสอบวิเคราะห์งานโครงสร้างชั้นทาง
4. สามารถหาค่า Unsoaked CBR และ UCS ในสนามได้อย่างรวดเร็วจากกราฟความสัมพันธ์โดยไม่ต้องเก็บตัวอย่างในสนามมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

### แหล่งทุนสนับสนุน

ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบ

## ผลและวิจารณ์

### ผล

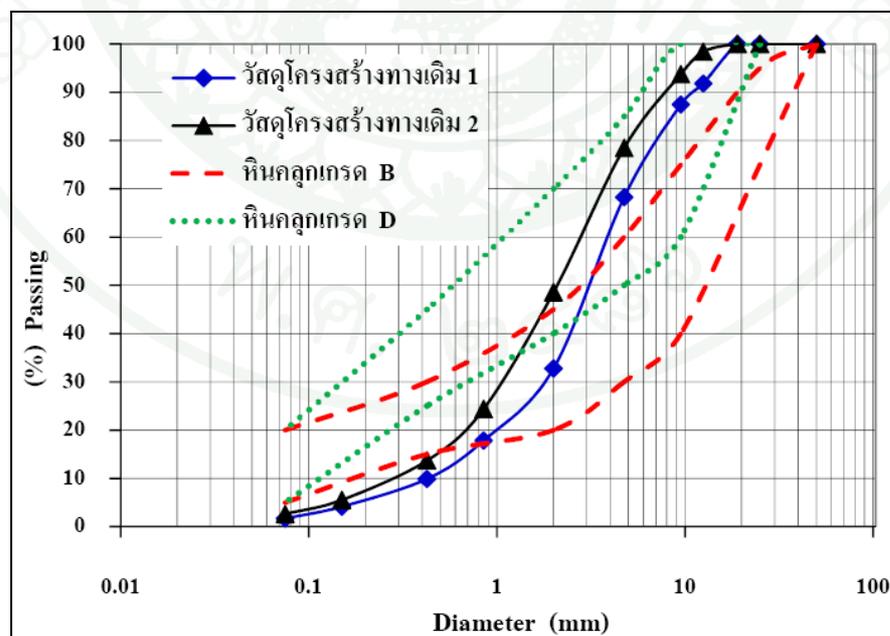
#### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

ในการศึกษานี้ได้นำวัสดุผิวทางเดิมมาจากทางหลวงหมายเลข 2034 ตอน หน้าพระลาน-บ้านครัว จังหวัดสระบุรี มาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ประกอบด้วยวัสดุผิวทางเดิมผสมกับหินเกล็ดอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ประกอบด้วยวัสดุผิวทางเดิมผสมกับหินคลุกอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ผลทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 และ 2 มีดังต่อไปนี้

1.1 ผลทดสอบการหาขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 วัสดุมีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย สัดส่วนขนาดคละไม่สม่ำเสมอ มีสีเทา ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 ดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 7

ตารางที่ 2 ขนาดผลวัสดุโครงสร้างทางเดิม

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1	วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2
เบอร์ 2" (50 มม.)	100.0	100.0
เบอร์ 1" (25 มม.)	100.0	100.0
เบอร์ 3/4" (19 มม.)	100.0	100.0
เบอร์ 1/2" (12.5 มม.)	91.8	98.4
เบอร์ 3/8" (9.5 มม.)	87.5	93.8
เบอร์ 4" (4.75 มม.)	68.3	78.4
เบอร์ 10" (2 มม.)	32.8	48.5
เบอร์ 20" (0.85 มม.)	17.8	24.4
เบอร์ 40" (0.425 มม.)	9.9	13.7
เบอร์ 100" (0.15 มม.)	4.1	5.5
เบอร์ 200" (0.075 มม.)	1.7	2.6



ภาพที่ 7 ขนาดผลวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1.2 ผลทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.78 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะวัสดุโครงสร้างทางเดิม

รายการ	วัสดุโครงสร้างทางเดิม			
	1		2	
Determination No.	1	2	1	2
Pycnometer + water + soil M <sub>1</sub> (gm.)	724.8	727.3	694.7	685.7
Temperature (=C)	47	53	51	46
Pycnometer + water M <sub>2</sub> (gm.)	67.2	669.6	636.9	627.1
Dish + Dry Soil (gm.)	341.4	328.4	268.5	313.1
Dish (gm.)	252.1	238.8	177.3	221.4
Dry Soil M <sub>s</sub> (gm.)	89.3	89.6	91.2	91.7
Gt (เปิดตาราง ทล.-ท.101/2515)	0.9894	0.9867	0.9876	0.9898
G <sub>s</sub>	2.79	2.77	2.69	2.74
Average G <sub>s</sub>	2.78		2.72	

1.3 ผลการทดสอบ (Atterberg's Limits) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 เมื่อทำการทดสอบหาค่า (Plastic Limit) ปริมาณน้ำต่ำสุดในดินที่ทำให้ดินนั้นอยู่ในสภาพ Plastic ตามมาตรฐาน (ทล.-ท.103/2515) ผลปรากฏว่าไม่สามารถคลึงเป็นเส้นให้แตกตัวที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3.2 มิลลิเมตรได้ ดังนั้นวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 มีค่าดัชนีพลาสติกเป็น NP (Non-Plastic)

1.4 ผลการจำแนกประเภทดินวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จะอยู่ในกลุ่ม SP และจำแนกตามระบบ AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-3 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จะอยู่ในกลุ่ม SP และจำแนกตามระบบ AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-3

## 2. ผลทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

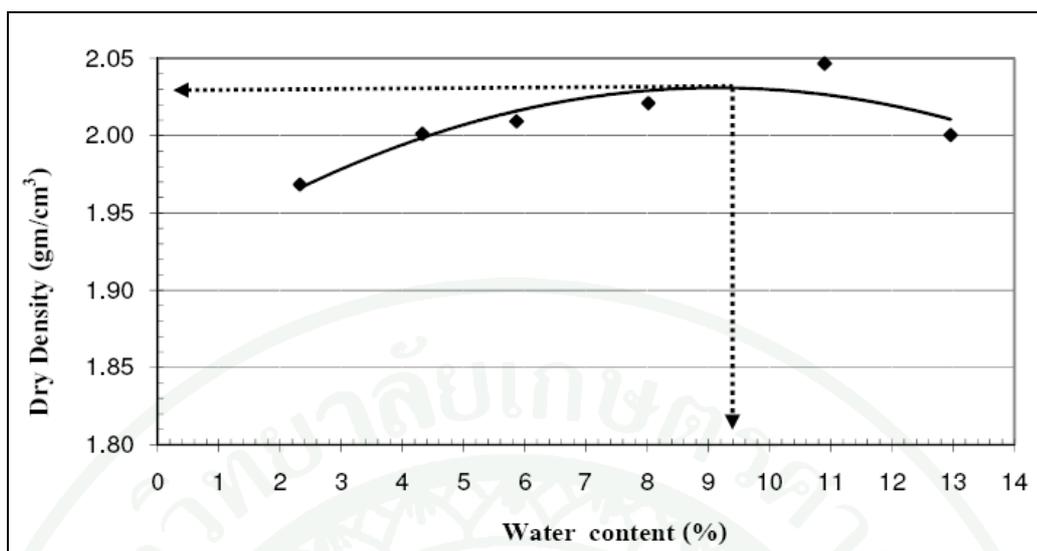
ผลทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 และ 2 มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

2.1 ผลทดสอบการบดอัด (Compaction Test) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุมีความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) เท่ากับ 9.4 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) เท่ากับ 2.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 8

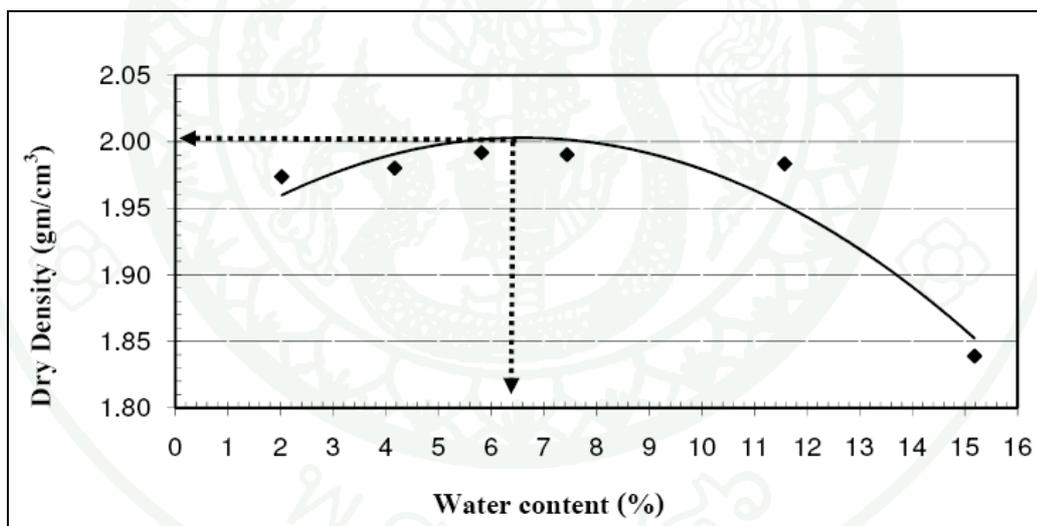
2.2 ผลทดสอบการบดอัด (Compaction Test) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุมีความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) เท่ากับ 6.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) เท่ากับ 2.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 9

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการบดอัด (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน

รายการทดสอบ	วัสดุโครงสร้างทางเดิม	
	1	2
Optimum Moisture Content (%)	9.4	6.5
Maximum Dry Density (gm/cm <sup>3</sup> )	2.03	2.00



ภาพที่ 8 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1



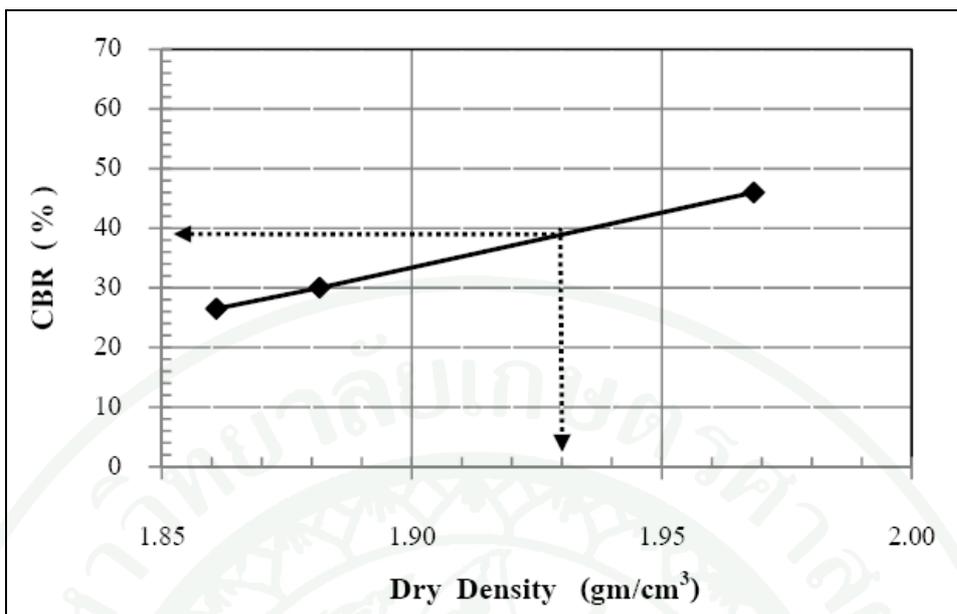
ภาพที่ 9 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2

2.3 ผลการทดสอบหาค่า California Bearing Ratio (CBR) แบบแช่น้ำ วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ค่า CBR at 0.1 นิ้ว Penetration เท่ากับ 38.5 เปอร์เซ็นต์ ค่า CBR at 0.2 นิ้ว Penetration เท่ากับ 53.0 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบหาค่า CBR ดังแสดงในตารางที่ 5 ภาพที่ 10 และ 11

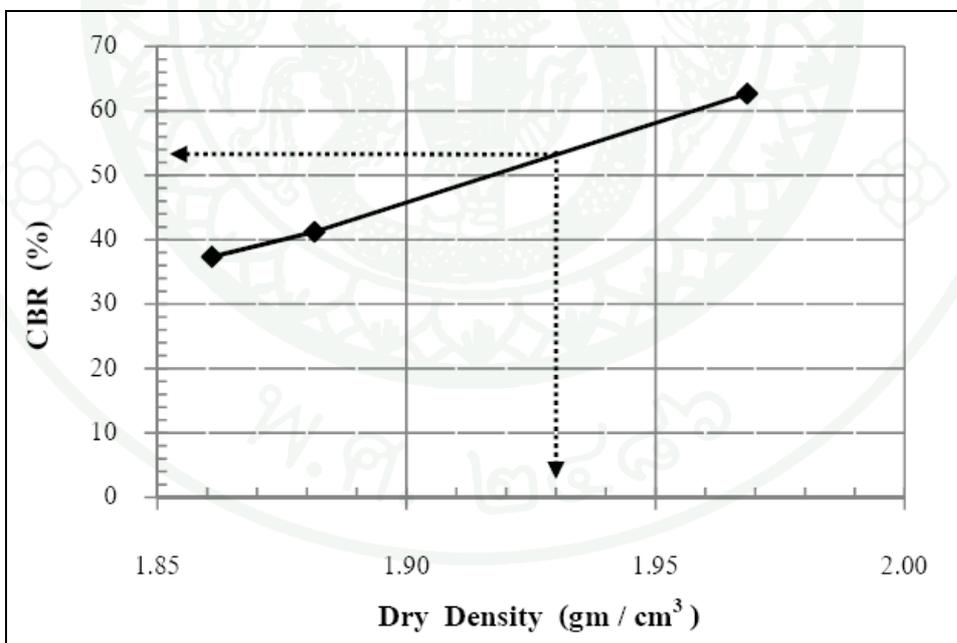
2.4 ผลการทดสอบหาค่า California Bearing Ratio (CBR) แบบแช่น้ำ วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ค่า CBR at 0.1 นิ้ว Penetration เท่ากับ 13.8 เปอร์เซ็นต์ ค่า CBR at 0.2 นิ้ว Penetration เท่ากับ 16.0 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบหาค่า CBR ดังแสดงในตารางที่ 5 ภาพที่ 12 และ 13

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบหาค่า CBR แบบแช่น้ำ

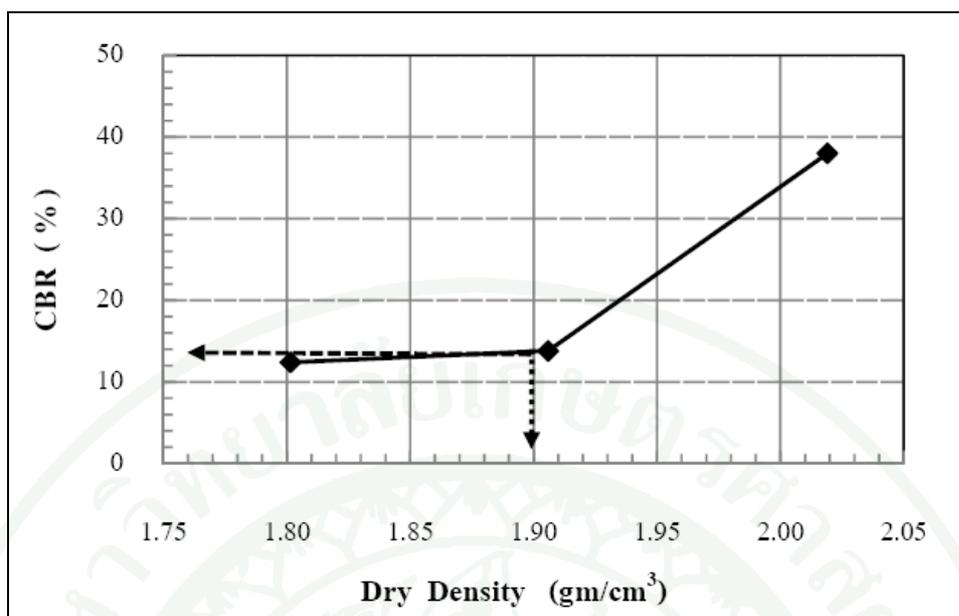
รายการทดสอบ	วัสดุโครงสร้างทางเดิม	
	1	2
Optimum Moisture Content (%)	9.4	6.5
Maximum Dry Density (gm/cm <sup>3</sup> )	2.03	2.00
Dry Density 95%	1.93	1.90
CBR at 0.1 in. Penetration (%)	38.5	13.8
CBR at 0.2 in. Penetration (%)	53.0	16.0



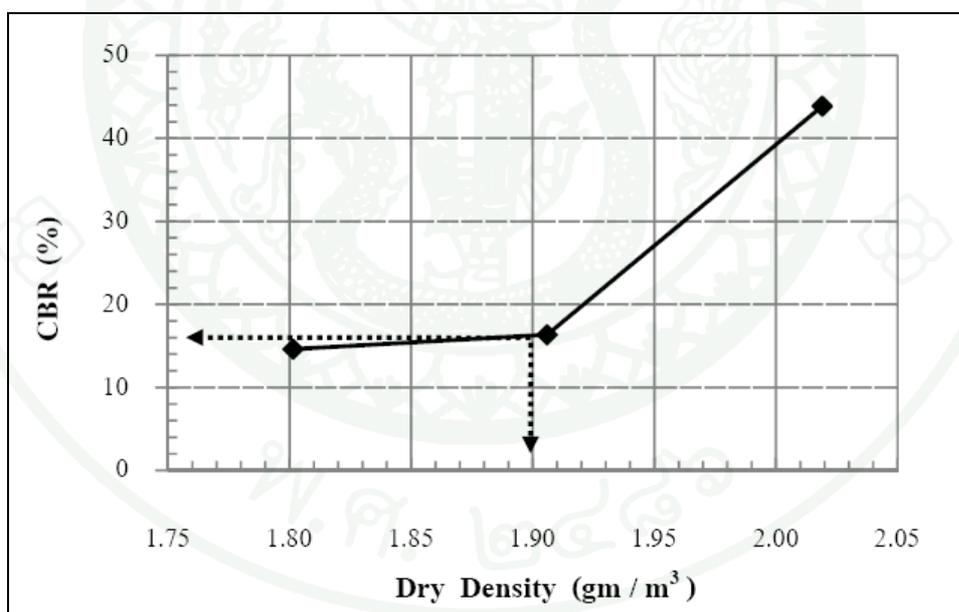
ภาพที่ 10 ผลการทดสอบ CBR at 0.1 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบ CBR at 0.2 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบ CBR at 0.1 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2



ภาพที่ 13 ผลการทดสอบ CBR at 0.2 นิ้ว Penetration วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2

### 3. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined Compressive Strength (UCS) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ เห็นได้ชัดเจนว่า ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาอายุการบ่ม และการปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด ( $1.0*OMC$ ) จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด ( $1.25*OMC$ ) ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7 กับภาพที่ 14, 15, 16 และ 17

ตารางที่ 6 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ ( $1.0*OMC$ )

Age (days)	UCS (ksc)									
	Cement Added									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	2.3	4.8	14.8	14.9	16.9	17.6	33.3	35.3	45.1	47.6
3	10.5	8.9	17.6	15.7	17.1	24.5	35.9	41.4	52.1	53.2
4	12.3	13.2	18.6	17.7	22.8	26.4	39.3	41.9	49.4	52.0
7	12.8	13.4	26.5	24.3	39.6	37.8	48.7	48.5	53.0	53.8
14	14.1	15.2	24.9	27.8	43.4	36.7	54.7	46.9	56.6	52.9
28	17.0	13.8	26.0	28.3	42.8	43.2	55.2	56.5	59.0	59.9

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1

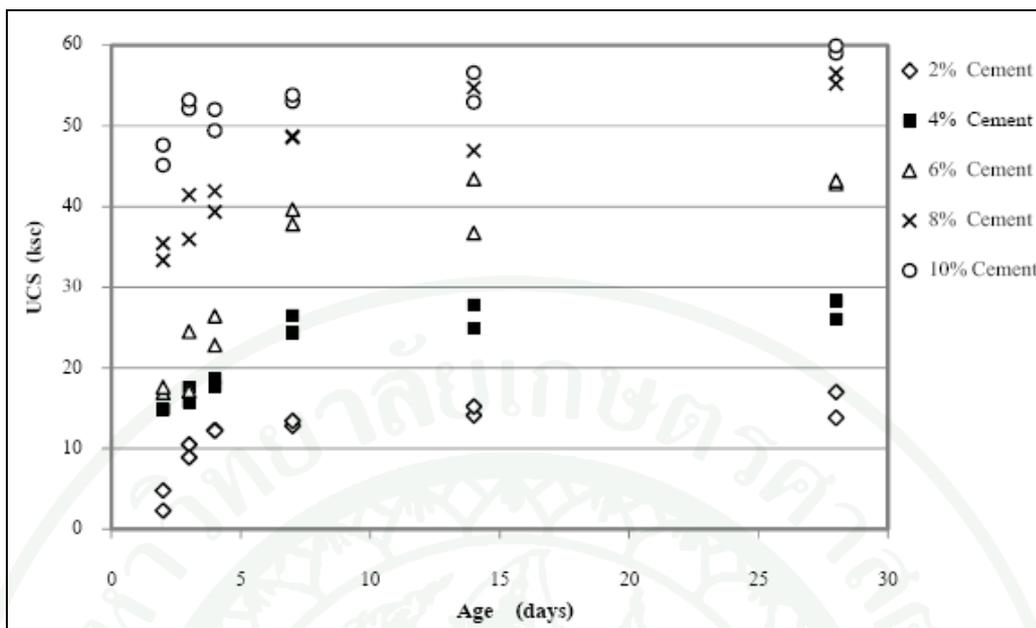
S2 ตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 7 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

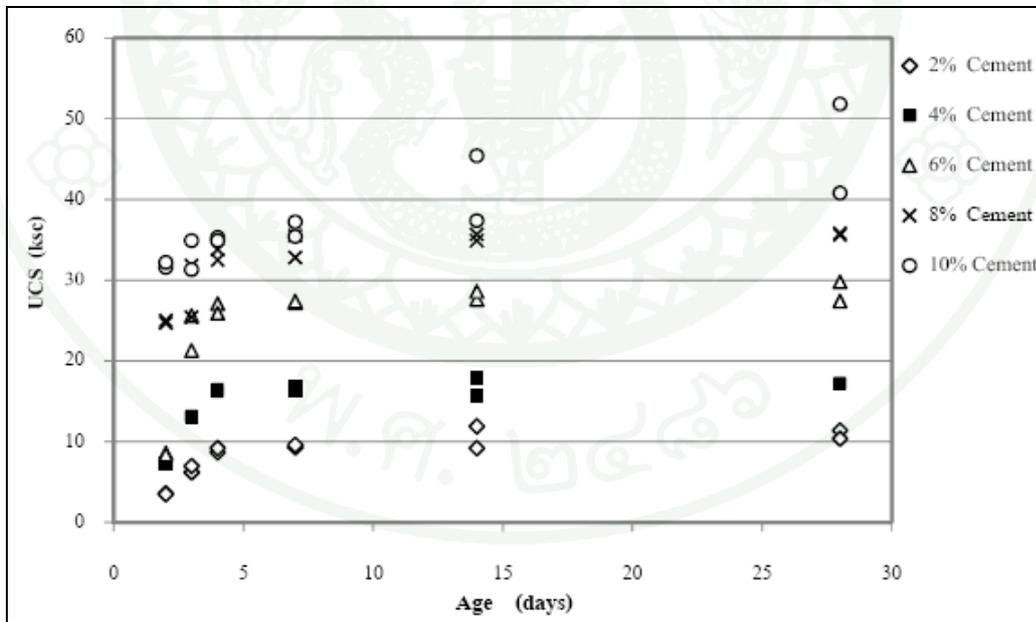
Age (days)	UCS (ksc)									
	Cement Added									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	3.6	3.5	7.2	7.3	8.6	8.4	24.7	25.0	31.6	32.2
3	6.2	7.0	13.0	13.2	25.6	21.3	25.4	31.8	31.3	34.9
4	8.7	9.2	16.2	16.5	27.1	25.9	33.8	32.5	35.3	34.9
7	9.3	9.6	16.3	16.8	27.2	27.4	32.8	35.5	35.4	37.2
14	11.9	9.2	15.7	17.9	27.6	28.6	34.9	35.7	37.4	45.4
28	11.4	10.4	17.2	17.2	29.8	27.4	35.8	35.6	51.8	11.3

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1

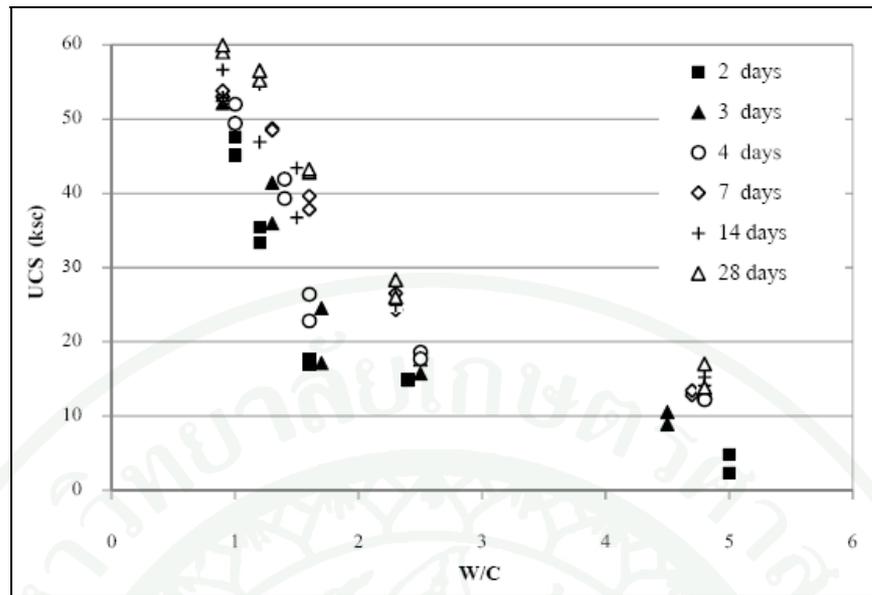
S2 ตัวอย่างที่ 2



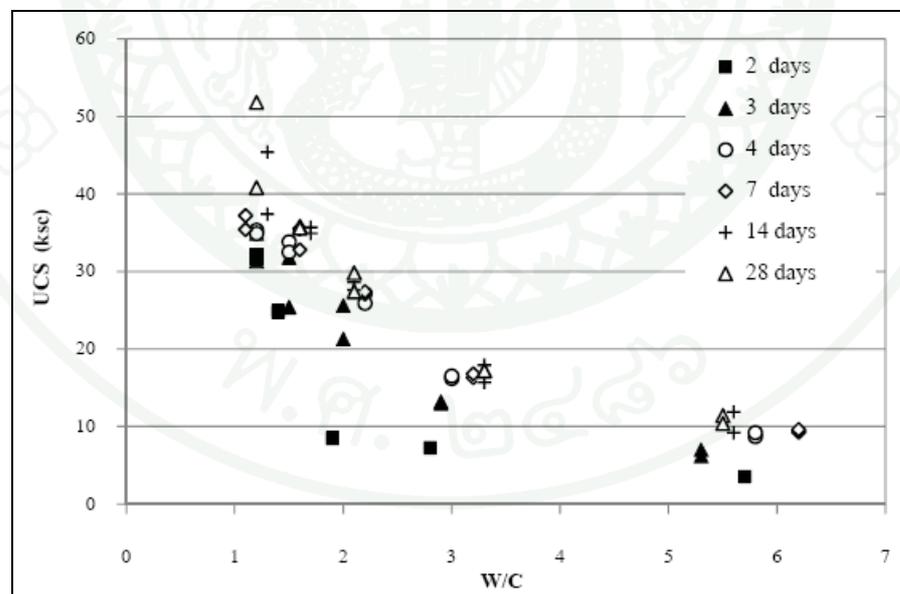
ภาพที่ 14 ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)



ภาพที่ 15 ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

3.2 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined Compressive Strength (UCS) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาอายุการบ่ม และการใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด ( $1.0*OMC$ ) จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด ( $1.25*OMC$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโครงสร้าง 1 ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9 กับภาพที่ 18, 19, 20 และ 21

**ตารางที่ 8** ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ ( $1.0*OMC$ )

Age (days)	UCS (ksc)									
	Cement Added									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	3.9	3.3	13.3	10.2	14.3	14.2	17.6	23.5	27.8	28.7
3	4.0	4.4	14.6	14.0	14.8	15.1	20.7	22.8	28.8	28.3
4	6.6	6.9	15.9	16.3	18.8	19.0	28.8	28.1	31.7	30.4
7	7.0	6.9	16.7	16.6	19.4	20.2	29.5	30.2	35.3	33.3
14	7.3	7.2	18.0	18.4	21.3	21.1	28.5	31.8	34.9	35.6
28	10.6	9.6	25.2	22.9	29.3	28.2	34.5	32.9	37.8	38.4

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1

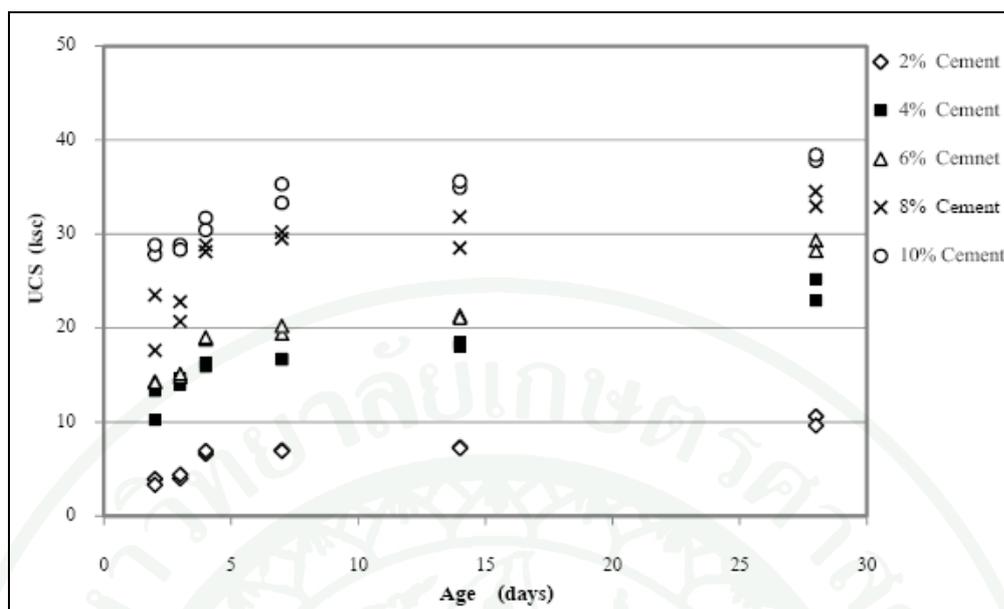
S2 ตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 9 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

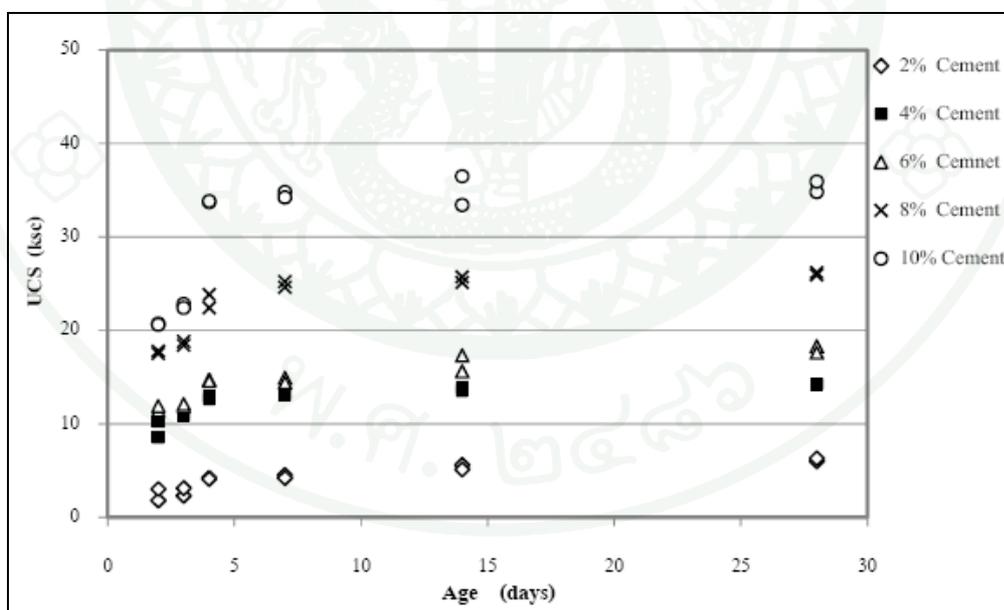
Age (days)	UCS (ksc)									
	Cement Added									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	1.8	3.0	10.2	8.5	11.4	11.9	17.5	17.8	20.7	20.6
3	2.3	3.1	10.8	11.0	11.9	12.1	18.8	18.4	22.8	22.4
4	4.2	4.1	12.6	13.0	14.7	14.6	23.8	22.4	33.7	33.8
7	4.5	4.2	13.1	13.3	14.9	14.4	24.6	25.2	34.8	34.2
14	5.6	5.1	13.5	13.9	17.3	15.6	25.1	25.7	33.4	36.5
28	6.0	6.3	14.2	14.3	18.3	17.6	25.9	26.2	34.8	35.9

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1

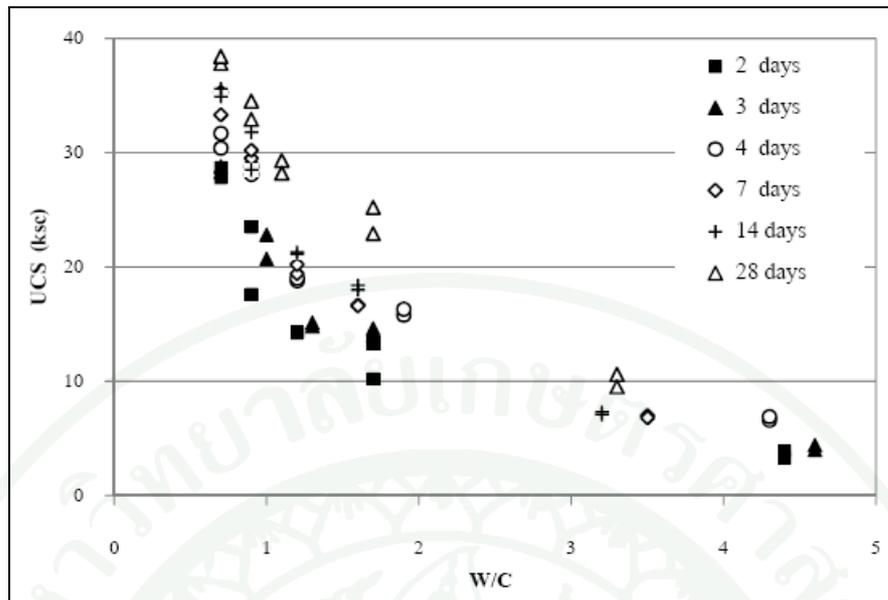
S2 ตัวอย่างที่ 2



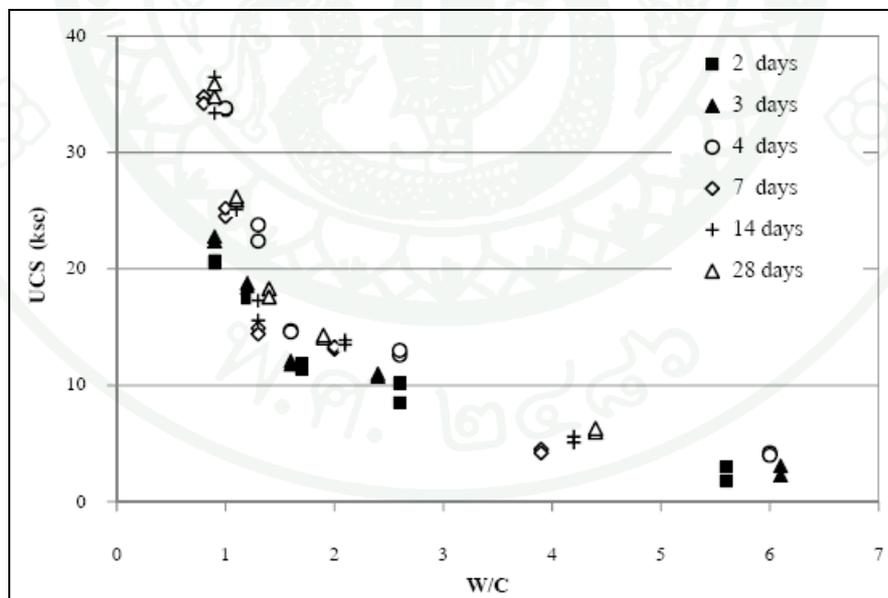
ภาพที่ 18 ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)



ภาพที่ 19 ค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

3.3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง ค่า DPI จะมีค่าต่ำ และค่า Unsoaked CBR ต่ำ ค่า DPI จะมีค่าสูง กล่าวคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางตรงกันข้าม หรือมีสัดส่วนแปรผกผันกัน ดังแสดงในตารางที่ 10 และภาพที่ 22

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement (%)	Age (days)	Unsoaked CBR (%)	DPI (mm/blows)	UCS (ksc)	
					S1	S2
1	2	2	73.3	2.0	2.3	4.8
2	4	2	180.0	1.2	14.8	14.9
3	6	2	363.3	1.0	16.9	17.6
4	8	2	533.3	0.6	33.3	35.4
5	10	2	850.0	0.4	45.1	47.6
6	2	3	116.7	1.3	10.5	8.9
7	4	3	254.7	1.2	17.6	15.7
8	6	3	393.3	0.9	17.1	24.5
9	8	3	770.0	0.4	35.9	41.4
10	10	3	766.7	0.4	52.1	53.2
11	2	4	200.0	1.2	12.3	12.2
12	4	4	383.3	1.0	18.6	17.7
13	6	4	420.0	0.8	22.8	26.4
14	8	4	636.7	0.6	39.3	41.9
15	10	4	660.0	0.5	49.4	52.0
16	2	2	74.7	2.0	3.5	3.6
17	4	2	124.7	1.8	7.2	7.3
18	6	2	230.0	1.2	8.6	8.4

ตารางที่ 10 (ต่อ)

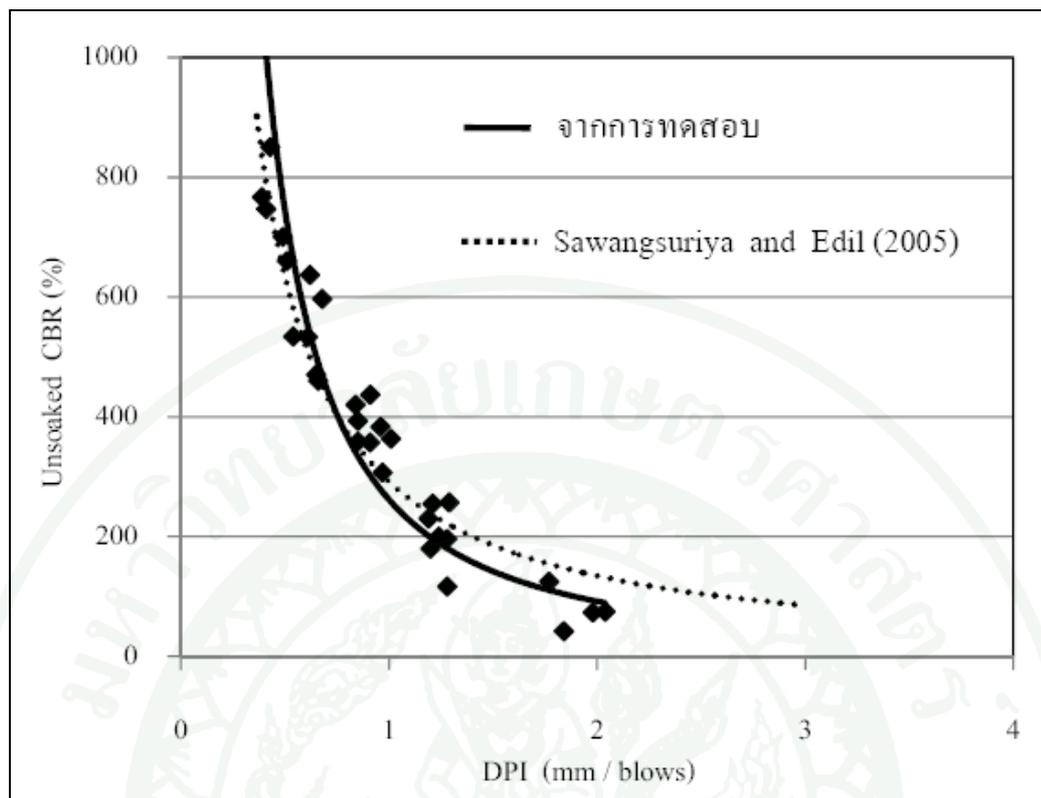
Items	Cement	Age	Unsoaked CBR	DPI	UCS (ksc)	
	(%)	(days)	(%)	(mm/blows)	S1	S2
19	8	2	356.7	0.9	24.7	25.0
20	10	2	533.3	0.5	31.6	32.2
21	2	3	42.3	1.8	6.2	7.0
22	4	3	196.0	1.3	13.0	13.2
23	6	3	306.7	1.0	25.6	21.3
24	8	3	436.7	0.9	25.4	31.8
25	10	3	470.0	0.7	31.3	34.9
26	2	4	256.7	1.3	8.7	9.2
27	4	4	358.7	0.9	16.2	15.6
28	6	4	460.0	0.7	27.1	25.9
29	8	4	700.0	0.5	33.8	32.5
30	10	4	596.7	0.7	35.3	34.9

หมายเหตุ Items 1-15 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)

Items 16-30 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

S1 ตัวอย่างที่ 1

S2 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง ค่า DPI จะมีค่าต่ำ กล่าวคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางตรงกันข้ามหรือมีสัดส่วนแปรผกผันกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าลักษณะของเส้นกราฟความสัมพันธ์จะต่ำกว่า แสดงว่าขนาดของเม็ดวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 มีขนาดใหญ่มีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย เกิดช่องว่างมากมีผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 11 และภาพที่ 23

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุง  
คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement	Age	Unsoaked CBR	DPI	UCS (ksc)	
	(%)	(days)	(%)	(mm/blows)	S1	S2
1	2	2	67.7	2.3	3.9	3.3
2	4	2	138.7	1.6	13.3	10.2
3	6	2	235.0	1.1	14.3	14.2
4	8	2	382.0	0.8	17.6	23.5
5	10	2	390.0	0.8	27.8	28.7
6	2	3	66.7	2.0	4.0	4.4
7	4	3	146.7	1.3	14.6	14.0
8	6	3	220.0	0.9	14.8	15.1
9	8	3	380.0	0.7	20.7	22.8
10	10	3	450.0	0.5	28.8	28.3
11	2	4	122.0	1.8	6.6	6.9
12	4	4	217.0	1.1	15.9	16.3
13	6	4	425.3	0.7	18.8	19.0
14	8	4	610.0	0.7	28.8	28.1
15	10	4	627.0	0.6	31.7	30.4
16	2	2	43.3	2.7	1.8	3.0
17	4	2	103.3	1.6	10.2	8.5
18	6	2	158.7	1.2	11.4	11.9
19	8	2	166.7	1.0	17.5	17.8
20	10	2	210.0	0.8	20.7	20.6
21	2	3	46.7	2.1	2.3	3.1
22	4	3	104.0	1.5	10.8	11.0
23	6	3	158.7	1.2	11.9	12.1
24	8	3	166.7	1.1	18.8	18.4

ตารางที่ 11 (ต่อ)

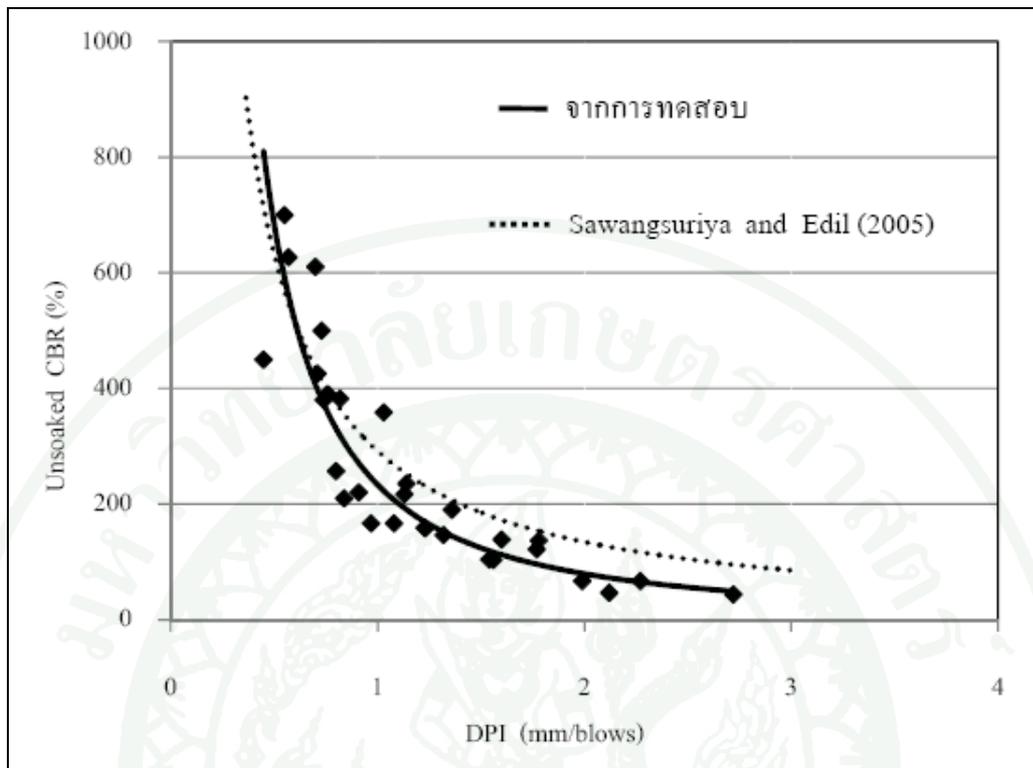
Items	Cement	Age	Unsoaked CBR	DPI	UCS (ksc)	
	(%)	(days)	(%)	(mm/blows)	S1	S2
25	10	3	256.7	0.8	22.8	22.4
26	2	4	136.7	1.8	4.2	4.1
27	4	4	190.0	1.4	12.6	13.0
28	6	4	358.7	1.0	14.7	14.6
29	8	4	500.0	0.7	23.8	22.4
30	10	4	700.0	0.6	33.7	33.8

หมายเหตุ Items 1-15 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)

Items 16-30 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

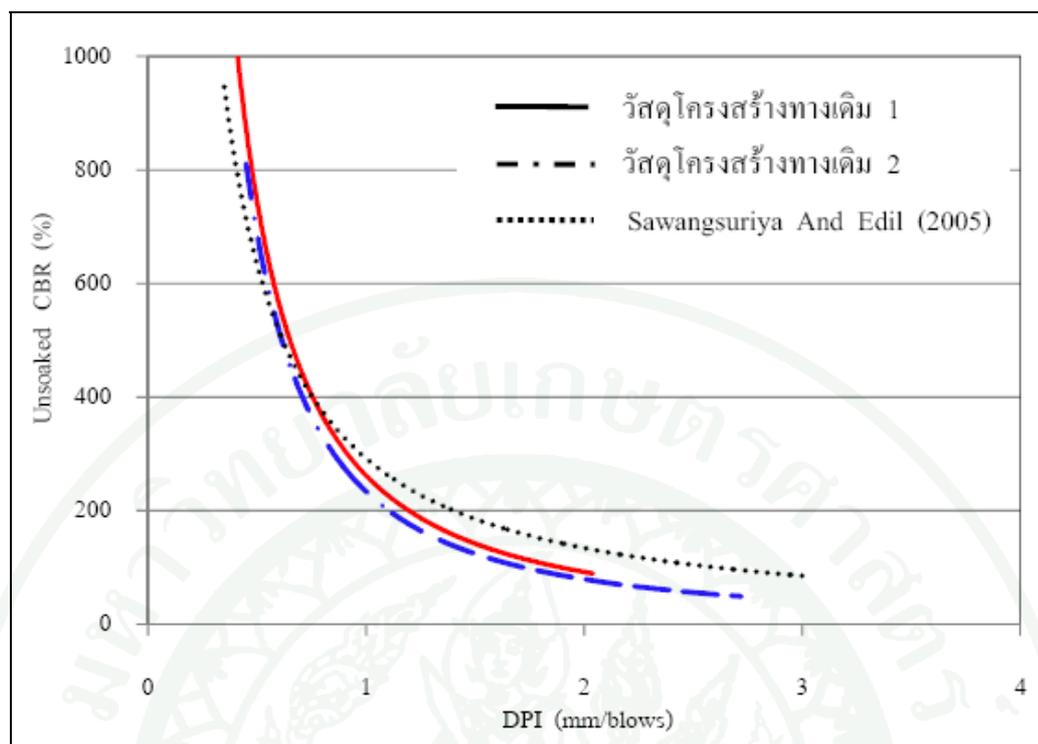
S1 ตัวอย่างที่ 1

S2 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อนำผลทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Sawangsurriya and Edil (2005) เห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ระยะอัตราการจมน้ำ DPI ช่วง 1-3 mm/blows ค่า CBR จะต่ำกว่างานวิจัยของ Sawangsurriya and Edil (2005) แสดงว่าขนาดเม็ดวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 และ 2 มีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย เม็ดวัสดุมีการชิดเรียงกันไม่สม่ำเสมอทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้ต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 24



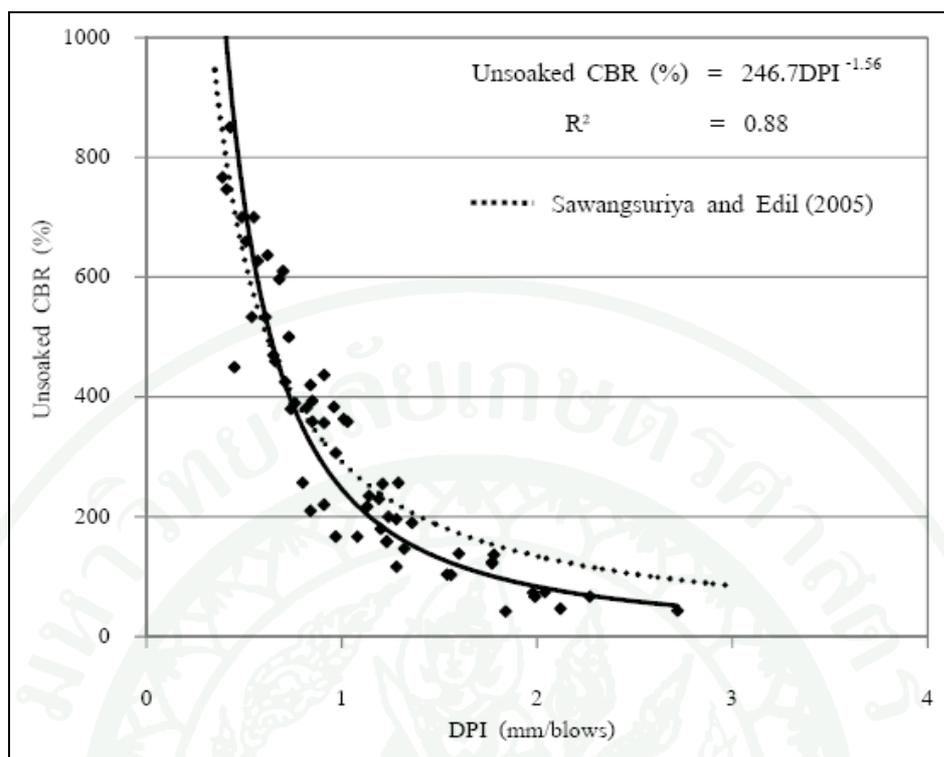
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนคือ แนวโน้มของความสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางตรงกันข้ามกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน ดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งได้สมการของความสัมพัทธ์ ดังแสดงในสมการที่ 22

$$\text{Unsoaked CBR} = 246.7\text{DPI}^{-1.56} \quad (22)$$

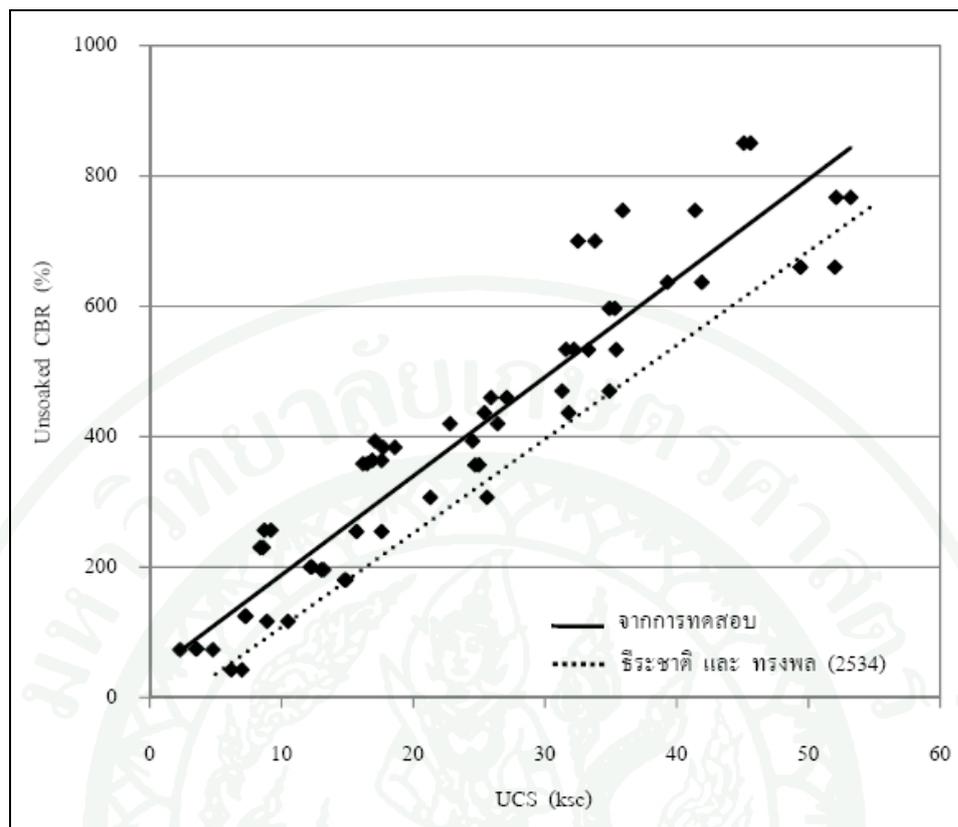
$$R^2 = 0.88$$

โดย      Unsoaked CBR      =      มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์  
             DPI                        =      มีหน่วยเป็น (mm/blows)



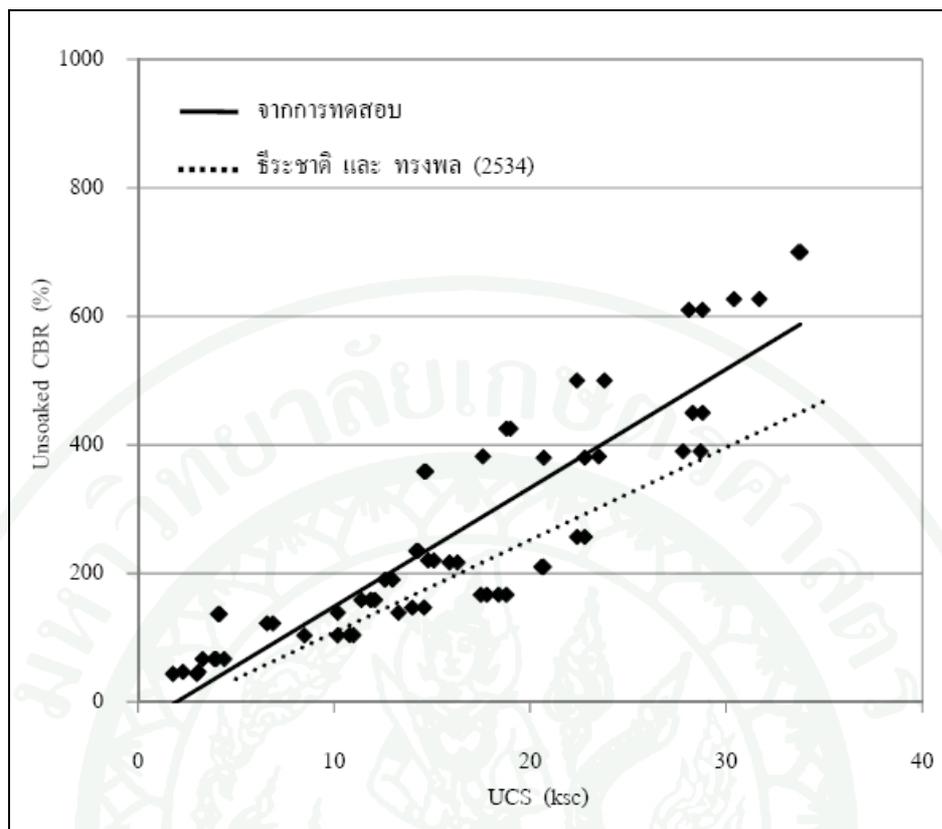
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม  
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.4 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุ  
โครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผล  
การทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง ค่า UCS จะมีค่าสูง กล่าวคือ  
แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันหรือมีสัดส่วนแปรผันตรงกัน  
ดังแสดงในภาพที่ 26



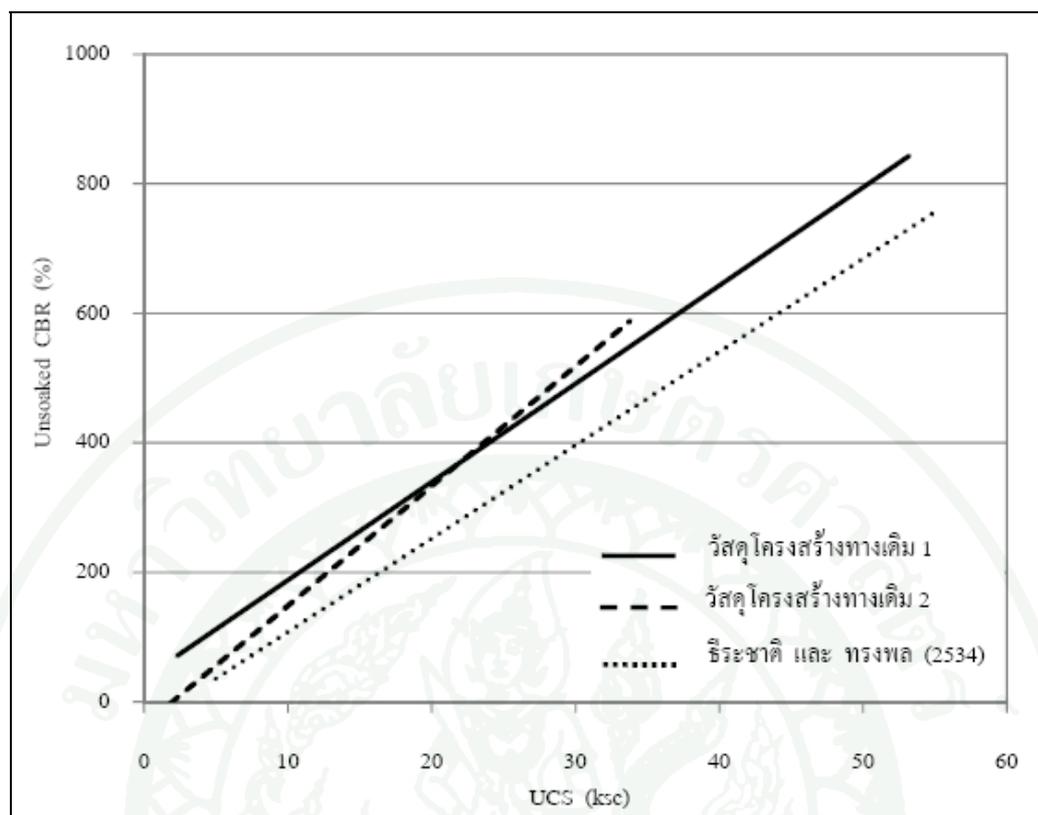
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.5 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง ค่า UCS จะมีค่าสูง กล่าวคือแนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันหรือมีสัดส่วนแปรผันตรงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าลักษณะของเส้นกราฟความสัมพันธ์จะต่ำกว่า แสดงว่าขนาดของเม็ดวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 มีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย เม็ดวัสดุมีการชิดเรียงกันไม่สม่ำเสมอทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้ต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อนำผลทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ธีระชาติ และทรงพล (2534) พบว่าลักษณะของเส้นกราฟจากการทดสอบมีแนวโน้มสูงกว่างานวิจัยของ ธีระชาติ และทรงพล (2534) ดังแสดงในภาพที่ 28



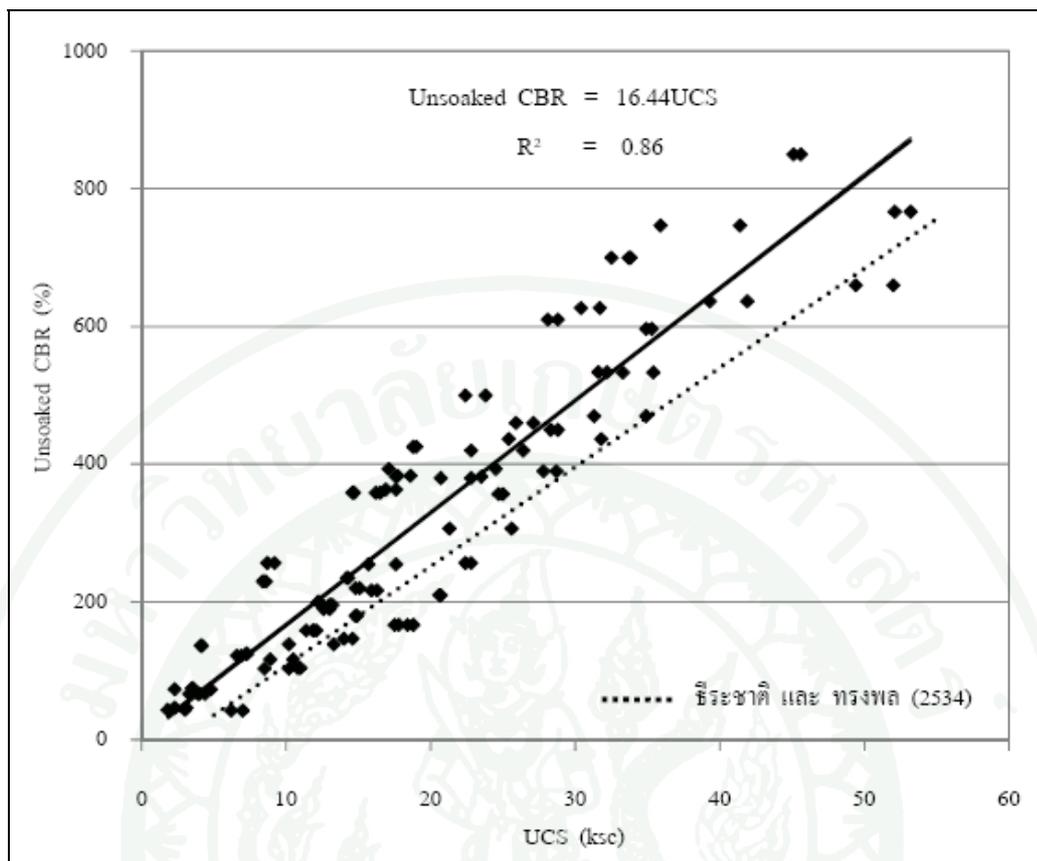
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 กับ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน ดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งจะได้สมการของความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 23

$$\text{Unsoaked CBR} = 16.44\text{UCS} \quad (23)$$

$$R^2 = 0.86$$

โดย      Unsoaked CBR = มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์  
           UCS            = มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)



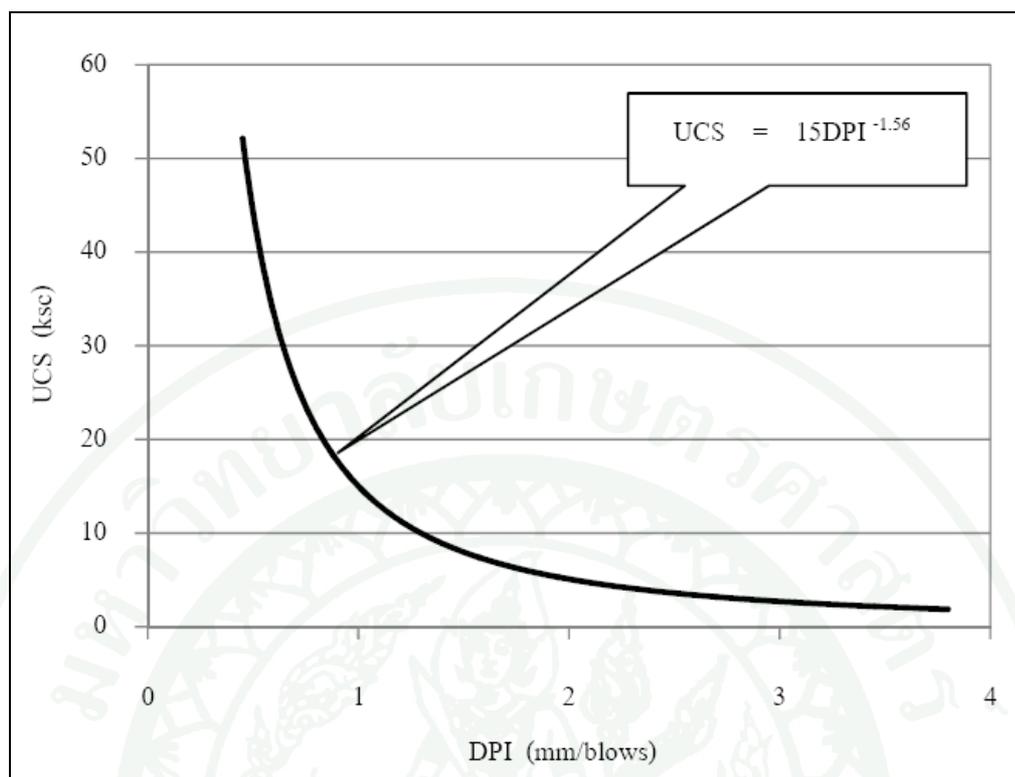
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิม  
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI กับ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อนำสมการที่ 22 กับ 23 มาหาความสัมพันธ์กันจะได้สมการที่ 24 และภาพที่ 30

$$\text{Unsoaked CBR} = 246.7\text{DPI}^{-1.56} \tag{22}$$

$$\text{Unsoaked CBR} = 16.44\text{UCS} \tag{23}$$

$$\text{UCS} = 15\text{DPI}^{-1.56} \tag{24}$$



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ DPI ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ซึ่งมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันทางสถิติศาสตร์ ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 22, 23 และ 24 สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่า Field CBR ในสภาพจริงของชั้นทางถนน และยังช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางเพื่องานตรวจสอบวิเคราะห์และควบคุมงานก่อสร้างชั้นทางได้อย่างรวดเร็ว

## วิจารณ์

### 1. การศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1.1 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 เมื่อวัสดุมีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย สัดส่วนขนาดละเอียดไม่สม่ำเสมอ มีสีเทา เมื่อวัสดุมีการขีดเรียงกันไม่สม่ำเสมอทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น

1.2 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 เมื่อวัสดุมีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย สัดส่วนขนาดละเอียดไม่สม่ำเสมอ มีสีเทา เมื่อวัสดุมีการขีดเรียงกันไม่สม่ำเสมอทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 เมื่อวัสดุจะมีลักษณะหยาบกว่า

### 2. การศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูงขึ้น จากผลการทดสอบค่า UCS กับ Unsoaked CBR พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดจะสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและระยะการบ่มการใช้ปริมาณน้ำที่  $(1.0 \cdot \text{OMC})$  ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่  $(1.25 \cdot \text{OMC})$  ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน

2.2 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูงขึ้น จากผลการทดสอบ UCS กับ Unsoaked CBR พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดจะสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและระยะการบ่มการใช้ปริมาณน้ำที่  $(1.0 \cdot \text{OMC})$  ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่  $(1.25 \cdot \text{OMC})$  ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน

2.3 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกต่างๆ สามารถวิจารณ์ผลการทดสอบได้ดังนี้ ที่ระดับความลึก 0–25 มม. พบว่าเส้นกราฟจากการทดสอบใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Sawangsuriya and Edil (2005) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.83 ต่ำที่สุด ที่ระดับความลึก 0–50 มม. พบว่าเส้นกราฟจากการทดสอบใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Sawangsuriya and Edil (2005) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.87 ที่ระดับความลึก 0–75 มม. พบว่าเส้นกราฟจากการทดสอบใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Sawangsuriya and Edil (2005) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.88 สูงที่สุด กราฟมีการกระจายตัวน้อยลง ซึ่งแสดงว่าที่ระดับความลึก 0–75 มม. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI มีความสัมพันธ์กันดีมาก ดินมีความแน่นมาก มีแรงดันดินด้านข้างสูง ดังนั้นดินจึงมีความแข็งแรงที่ดี กราฟมีการกระจายตัวน้อยลงส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) สูง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากผลการศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิมผสมซีเมนต์บดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer เพื่อให้ทราบค่าคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

#### 1. คุณสมบัติด้านกายภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1.1 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 เมื่ควัสดุมีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย สัดส่วนขนาดละเอียดไม่สม่ำเสมอ มีค่าดัชนีพลาสติกเป็น NP (Non-Plastic) ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.78 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จะอยู่ในกลุ่ม SP และจำแนกตามระบบ AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-3

1.2 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 เมื่ควัสดุมีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อย สัดส่วนขนาดละเอียดไม่สม่ำเสมอ มีค่าดัชนีพลาสติกเป็น NP (Non-Plastic) ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จะอยู่ในกลุ่ม SP และจำแนกตามระบบ AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-3

#### 2. คุณสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า UCS มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่  $(1.0 \cdot \text{OMC})$  ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่  $(1.25 \cdot \text{OMC})$

2.2 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า UCS มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ (1.0\*OMC) ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ (1.25\*OMC) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มเท่าๆ กัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่า

2.3 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ (1.0\*OMC) ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR จะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ (1.25\*OMC) ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR สูง ค่า DPI จะต่ำ

2.4 วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ (1.0\*OMC) ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR จะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ (1.25\*OMC) ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR สูง ค่า DPI จะต่ำ

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI กับ UCS วัสดุโครงสร้างทางเดิม ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวตรงกันข้าม คือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ UCS แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS กับ DPI แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวตรงกันข้าม คือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน

3.4 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระดับความลึก 0 – 75 มม. พบว่าเส้นกราฟจากการทดสอบใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Sawangsurinya and Edil (2005) และมีความสัมพันธ์กันดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับความลึก 0 – 25 มม. กับ 0 – 50 มม. ซึ่งแสดงว่าที่ระดับความลึก 0 – 75 มม. ดินมีความแน่นมากขึ้น มีแรงดันดินด้านข้างสูงขึ้น ดังนั้นดินจึงมีความแข็งแรงที่ดี กราฟมีการกระจายตัวน้อยลง ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) สูง

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI กับ UCS มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันทางสถิติศาสตร์สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่า Field CBR ในสภาพจริงของชั้นทางช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบวิเคราะห์และควบคุมงานก่อสร้างชั้นทาง

#### ข้อเสนอแนะ

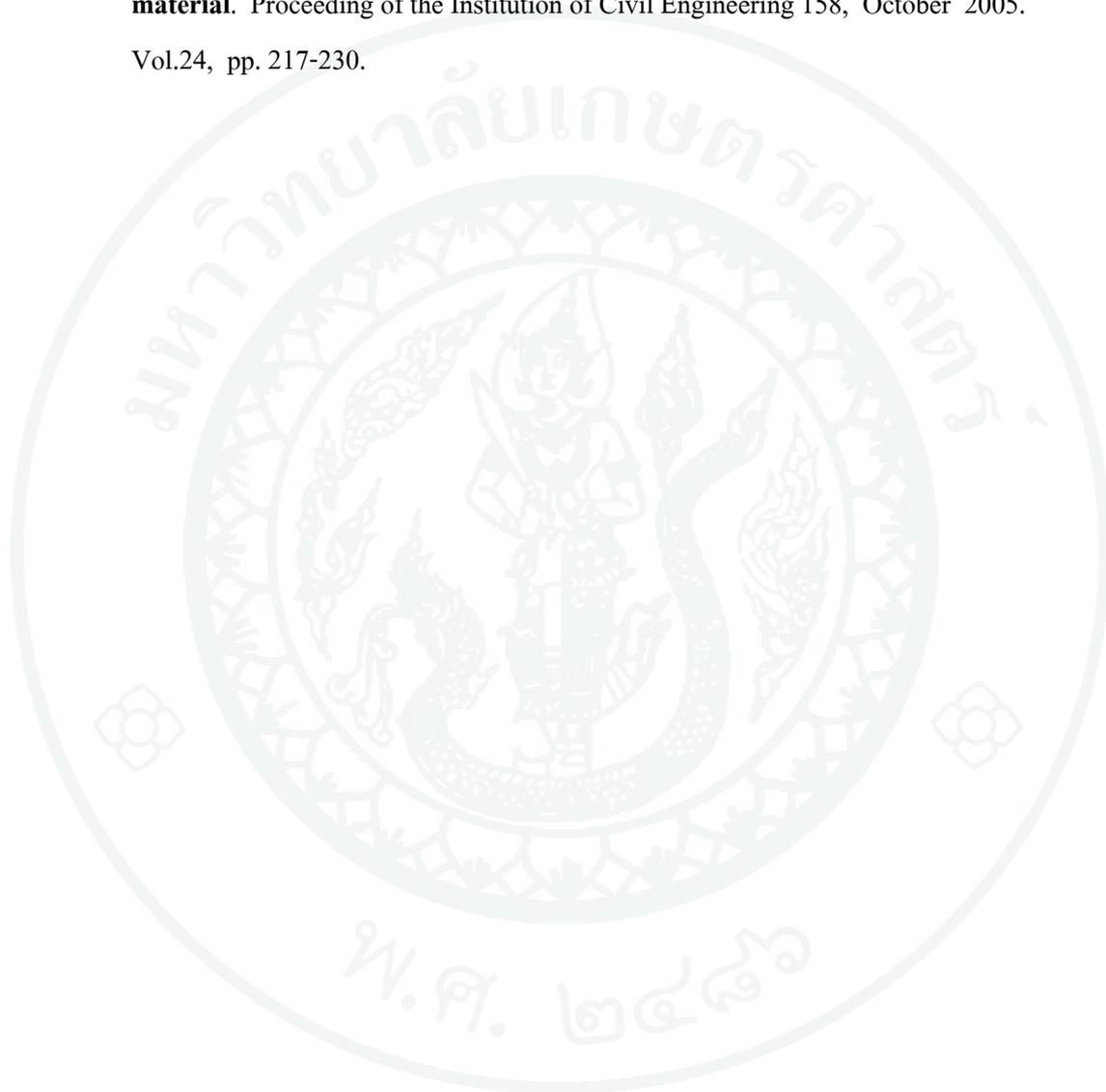
1. ควรศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ของวัสดุชนิดอื่นปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น ดินลูกรัง ดินเหนียว ทราย และหินผุ เป็นต้น เพื่อให้ทราบข้อมูลเพิ่มเติม
2. ควรศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสภาพหน้างานจริง เพื่อการเปรียบเทียบและทราบข้อมูลเพิ่มเติม

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

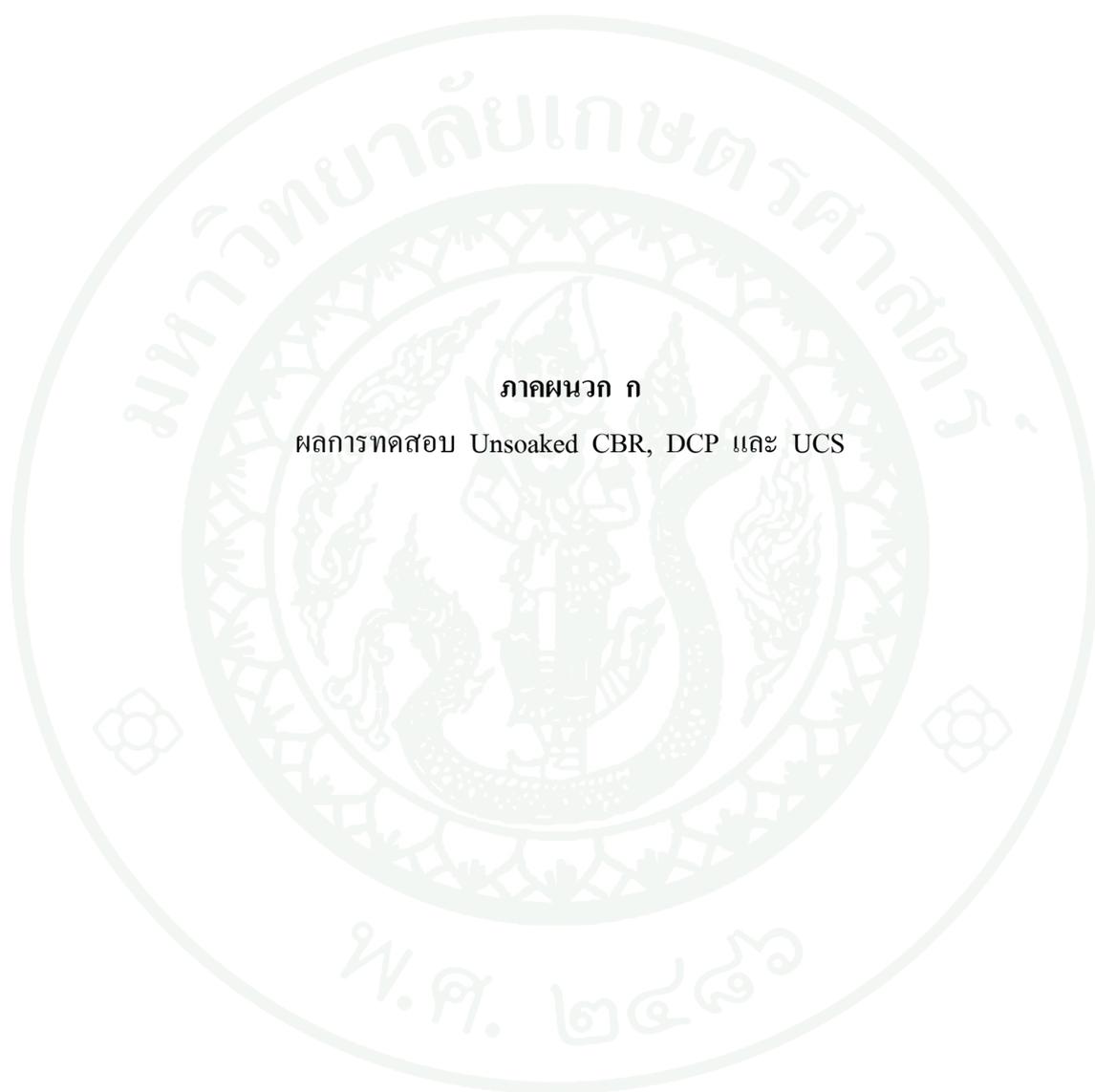
- กรมทางหลวง. 2532. **มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์**. มาตรฐานวัสดุงานทาง (ทล.ม.203). ศูนย์วิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.
- จิระพัฒน์ โชติไกร. 2549. **การออกแบบทาง**. พิมพ์ครั้งที่ 4 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และทรงพล บุญมาดี. 2534. **ความสัมพันธ์ระหว่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH กับ UNSOAKED CBR**. รายงานฉบับที่ วว. 125 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และมีฤกษ์ พัชร. 2543. **การศึกษากำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์**. รายงานฉบับที่ วพ. 177 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และอนันต์ ทวีวรรณสดี. 2543. **คุณสมบัติความเค้นความเครียดของวัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแนวตั้ง**. รายงานฉบับที่ วพ. 179 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.
- \_\_\_\_\_. และพรพรม จันทร์เจริญ. 2543. **การหาความสัมพันธ์ระหว่าง DCP กับ UNSOAKED CBR ของดินและวัสดุผสมรวมในห้องปฏิบัติการ**. รายงานฉบับที่ วพ. 180 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.
- ประสิทธิ์ ภู่อะทุม. 2536. **การประเมินสภาพทางโดย Dynamic Cone Penetration Instrument (DCP)**. รายงานฉบับที่ วพ. 132 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง. 2543. **Standard Methods for Testing Aggregate and Concrete.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร.

Sawangsurriya, A. and T. Edil. 2005. **Evaluating stiffness and strength of pavement material.** Proceeding of the Institution of Civil Engineering 158, October 2005. Vol.24, pp. 217-230.







ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DCP และ UCS

ตารางผนวกที่ ก1 ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR กับ DPI วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุง  
คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement (%)	Age (days)	Energy (t-m/m <sup>3</sup> )	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm <sup>3</sup> )	Unsoaked CBR (%)	DPI (mm/blows)	W/C
1	2	2	277.5	9.7	2.026	73.3	1.9	4.9
2	4	2	277.5	8.7	2.091	180.0	1.2	2.3
3	6	2	277.5	9.3	2.191	363.3	1.0	1.6
4	8	2	277.5	9.1	2.105	533.3	0.6	1.2
5	10	2	277.5	8.8	2.134	850.0	0.4	1.0
6	2	3	277.5	9.9	1.898	116.7	1.3	5.0
7	4	3	277.5	8.4	2.129	254.7	1.2	2.2
8	6	3	277.5	9.6	2.089	393.3	0.8	1.7
9	8	3	277.5	8.5	1.760	770.7	0.4	1.2
10	10	3	277.5	8.4	2.152	766.7	0.4	0.9
11	2	4	277.5	8.8	1.976	200.0	1.2	4.5
12	4	4	277.5	8.7	2.027	383.3	1.0	2.3
13	6	4	277.5	9.2	2.026	442.0	0.8	1.6
14	8	4	277.5	8.5	2.114	636.7	0.6	1.1
15	10	4	277.5	8.1	2.113	660.0	0.5	0.9
16	2	2	277.5	12.4	2.009	74.7	2.0	6.3
17	4	2	277.5	11.7	1.974	124.7	1.8	3.0
18	6	2	277.5	12.1	2.057	230.0	1.2	2.1
19	8	2	277.5	10.8	2.057	356.7	0.9	1.5
20	10	2	277.5	11.6	1.928	533.3	0.5	1.3
21	2	3	277.5	12.1	2.011	42.3	1.8	6.1
22	4	3	277.5	12.4	1.855	196.0	1.3	3.2
23	6	3	277.5	11.6	2.022	306.7	1.0	2.0
24	8	3	277.5	10.9	1.851	436.7	0.9	1.5

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Items	Cement (%)	Age (days)	Energy (t-m/m <sup>3</sup> )	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm <sup>3</sup> )	Unsoaked CBR (%)	DPI (mm/blows)	W/C
25	10	3	277.5	10.6	2.106	470.0	0.7	1.2
26	2	4	277.5	9.6	2.036	256.7	1.3	4.9
27	4	4	277.5	10.1	2.042	358.7	0.9	2.7
28	6	4	277.5	11.2	2.057	460.0	0.7	2.0
29	8	4	277.5	9.4	2.124	700.0	0.5	1.3
30	10	4	277.5	11.1	2.127	596.7	0.7	1.2

หมายเหตุ Items 1-15 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)

Items 16-30 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

ตารางผนวกที่ ก2 ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR กับ DPI วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุง  
คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement	Age	Energy	Water	Dry	Unsoaked	DPI	W/C
	(%)	(days)	(t-m/m <sup>3</sup> )	Content (%)	Density (gm/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	(mm/blows)	
1	2	2	277.5	5.5	2.048	66.7	2.3	3.8
2	4	2	277.5	6.4	2.033	138.7	1.6	1.9
3	6	2	277.5	6.9	2.072	235.0	1.1	1.3
4	8	2	277.5	6.7	2.126	382.0	0.8	0.9
5	10	2	277.5	6.6	2.162	390.0	0.8	0.7
6	2	3	277.5	6.5	2.015	66.7	2.0	4.4
7	4	3	277.5	6.6	2.084	146.7	1.3	2.0
8	6	3	277.5	6.4	2.088	220.0	0.9	1.2
9	8	3	277.5	6.7	2.130	380.0	0.7	0.9
10	10	3	277.5	6.2	2.158	450.0	0.5	0.7
11	2	4	277.5	6.5	2.037	122.0	1.8	4.4
12	4	4	277.5	6.3	2.094	217.0	1.1	1.9
13	6	4	277.5	6.7	2.136	425.3	0.7	1.3
14	8	4	277.5	6.4	2.162	610.0	0.7	0.9
15	10	4	277.5	6.3	2.174	627.0	0.6	0.7
16	2	2	277.5	8.4	2.070	43.3	2.7	4.3
17	4	2	277.5	9.2	2.022	103.3	1.6	2.6
18	6	2	277.5	8.4	2.087	158.7	1.2	1.5
19	8	2	277.5	8.6	2.083	166.7	1.0	1.2
20	10	2	277.5	8.5	2.121	210.0	0.8	0.9
21	2	3	277.5	8.6	2.076	46.7	2.1	4.4
22	4	3	277.5	8.4	2.046	104.0	1.5	2.4
23	6	3	277.5	8.7	2.071	158.7	1.2	1.5
24	8	3	277.5	8.5	2.093	166.7	1.1	1.1

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Items	Cement	Age	Energy	Water	Dry	Unsoaked	DPI	W/C
	(%)	(days)	(t-m/m <sup>3</sup> )	Content (%)	Density (gm/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	(mm/blows)	
25	10	3	277.5	8.0	2.067	256.7	0.8	0.9
26	2	4	277.5	9.0	2.106	136.7	1.8	4.6
27	4	4	277.5	8.4	2.167	190.0	1.4	2.2
28	6	4	277.5	8.4	2.151	358.7	1.0	1.5
29	8	4	277.5	8.5	2.153	500.0	0.7	1.1
30	10	4	277.5	8.5	2.147	700.0	0.6	0.9

หมายเหตุ Items 1-15 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)

Items 16-30 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

ตารางผนวกที่ ก3 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุง  
คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement (%)	Age (days)	Energy (t-m/m <sup>3</sup> )	Water		Dry Density		UCS		W/C
				Content (%)	S1	S2	S1	S2		
									(gm/cm <sup>3</sup> )	
1	2	2	277.5	9.8	2.086	2.284	2.3	4.8	5.0	
2	4	2	277.5	9.3	2.119	2.132	14.8	14.9	2.4	
3	6	2	277.5	8.8	2.172	2.137	16.9	17.6	1.6	
4	8	2	277.5	8.6	2.192	2.211	33.3	35.4	1.2	
5	10	2	277.5	8.8	2.187	2.188	45.1	47.6	1.0	
6	2	3	277.5	8.9	2.104	2.106	10.5	8.9	4.5	
7	4	3	277.5	9.5	2.112	2.095	17.6	15.7	2.5	
8	6	3	277.5	9.6	2.134	2.127	17.1	24.5	1.7	
9	8	3	277.5	9.6	2.157	2.160	35.9	41.4	1.3	
10	10	3	277.5	8.7	2.204	2.185	52.1	53.2	0.9	
11	2	4	277.5	9.4	2.096	2.098	12.3	12.2	4.8	
12	4	4	277.5	9.5	2.113	2.096	18.6	17.7	2.5	
13	6	4	277.5	9.2	2.142	2.135	22.8	26.4	1.6	
14	8	4	277.5	10.3	2.143	2.146	39.3	41.9	1.4	
15	10	4	277.5	9.1	2.195	2.176	49.4	52.0	1.0	
16	2	2	277.5	11.1	2.038	2.069	3.6	3.5	5.7	
17	4	2	277.5	10.8	2.090	2.102	7.2	7.3	2.8	
18	6	2	277.5	10.7	2.097	2.129	8.6	8.4	1.9	
19	8	2	277.5	10.6	2.152	2.171	24.7	25.0	1.4	
20	10	2	277.5	10.7	2.174	2.169	31.6	32.2	1.2	
21	2	3	277.5	10.4	2.124	2.079	6.2	7.0	5.3	
22	4	3	277.5	11.4	2.040	2.120	13.0	13.2	2.9	
23	6	3	277.5	11.9	2.005	2.067	25.6	21.3	2.0	

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Items	Cement (%)	Age (days)	Energy (t-m/m <sup>3</sup> )	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm <sup>3</sup> )		UCS (ksc)		W/C
					S1	S2	S1	S2	
24	8	3	277.5	11.1	2.020	2.116	25.4	31.8	1.5
25	10	3	277.5	11.3	1.988	2.100	31.3	34.9	1.2
26	2	4	277.5	11.5	2.105	2.061	8.7	9.2	5.8
27	4	4	277.5	11.4	2.040	2.120	16.2	16.5	3.0
28	6	4	277.5	12.2	1.999	2.061	27.1	25.9	2.2
29	8	4	277.5	11.1	2.020	2.116	33.8	32.5	1.5
30	10	4	277.5	11.3	1.988	2.100	35.3	34.9	1.2

หมายเหตุ Items 1-15 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)

Items 16-30 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

S1 ตัวอย่างที่ 1

S2 ตัวอย่างที่ 2

ตารางผนวกที่ ก4 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุง  
คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement (%)	Age (days)	Energy (t-m/m <sup>3</sup> )	Water		Dry Density		UCS		W/C
				Content (%)	S1	S2	S1	S2		
									(gm/cm <sup>3</sup> )	
1	2	2	277.5	6.8	2.029	2.012	3.9	6.8	4.4	
2	4	2	277.5	5.7	2.173	2.163	13.3	10.2	1.7	
3	6	2	277.5	6.5	2.099	2.094	14.3	14.2	1.2	
4	8	2	277.5	6.2	2.163	2.177	17.6	23.5	0.9	
5	10	2	277.5	6.6	2.233	2.234	27.8	28.7	0.7	
6	2	3	277.5	6.8	2.004	2.012	4.0	4.4	4.6	
7	4	3	277.5	5.7	2.042	2.052	14.6	14.0	1.7	
8	6	3	277.5	6.6	2.065	2.089	14.8	15.1	1.3	
9	8	3	277.5	6.8	2.131	2.119	20.7	22.8	1.0	
10	10	3	277.5	6.8	2.152	2.135	28.8	28.3	0.7	
11	2	4	277.5	6.3	2.013	2.022	6.6	6.9	4.3	
12	4	4	277.5	6.3	2.032	2.043	15.9	16.3	1.9	
13	6	4	277.5	6.5	2.068	2.092	18.8	19.0	1.2	
14	8	4	277.5	6.8	2.130	2.119	28.8	28.1	1.0	
15	10	4	277.5	6.8	2.152	2.135	31.7	30.4	0.7	
16	2	2	277.5	8.3	2.011	2.069	1.8	3.0	5.6	
17	4	2	277.5	8.9	2.134	2.157	10.2	8.5	2.6	
18	6	2	277.5	8.8	2.133	2.152	11.4	11.9	1.7	
19	8	2	277.5	8.2	2.164	2.131	17.5	17.8	1.2	
20	10	2	277.5	8.6	2.159	2.144	20.7	20.6	0.9	
21	2	3	277.5	9.2	1.941	1.926	2.3	3.1	6.1	
22	4	3	277.5	8.1	2.162	2.175	10.8	11.0	2.4	
23	6	3	277.5	8.2	2.147	2.171	11.9	12.1	1.6	

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Items	Cement (%)	Age (days)	Energy (t-m/m <sup>3</sup> )	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm <sup>3</sup> )		UCS (ksc)		W/C
					S1	S2	S1	S2	
24	8	3	277.5	8.5	2.163	2.177	18.8	18.4	1.2
25	10	3	277.5	8.3	2.189	2.172	22.8	22.4	0.9
26	2	4	277.5	9.0	1.943	1.928	4.2	4.1	6.0
27	4	4	277.5	8.9	2.144	2.157	12.6	13.0	2.6
28	6	4	277.5	8.6	2.138	2.162	14.7	14.6	1.6
29	8	4	277.5	9.4	2.145	2.158	23.8	22.4	1.3
30	10	4	277.5	9.0	2.175	2.158	33.7	33.8	1.0

หมายเหตุ Items 1-15 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0\*OMC)

Items 16-30 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25\*OMC)

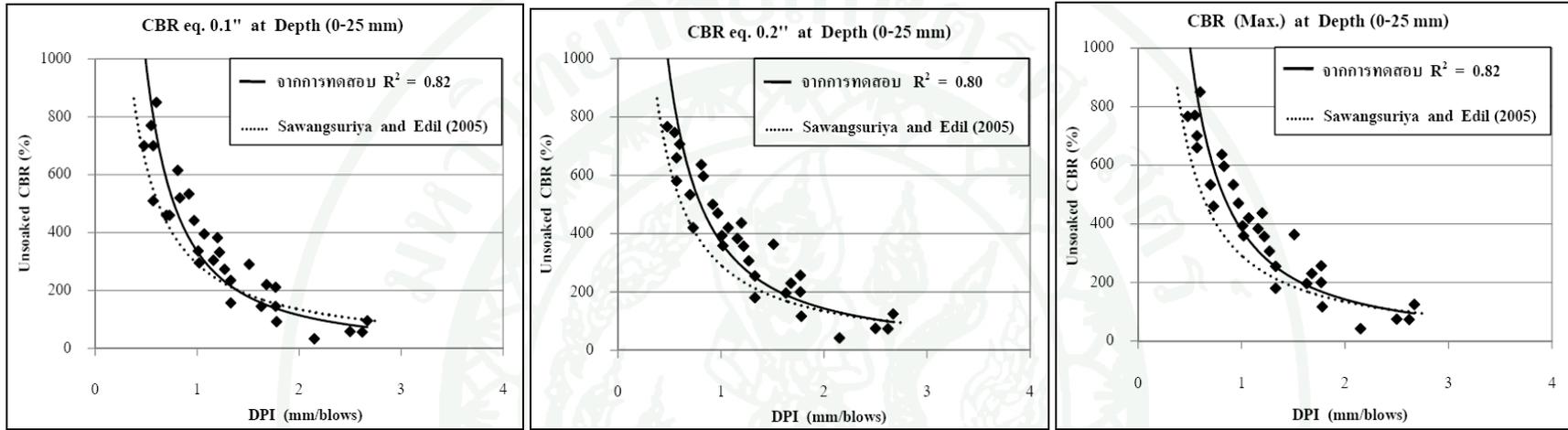
S1 ตัวอย่างที่ 1

S2 ตัวอย่างที่ 2

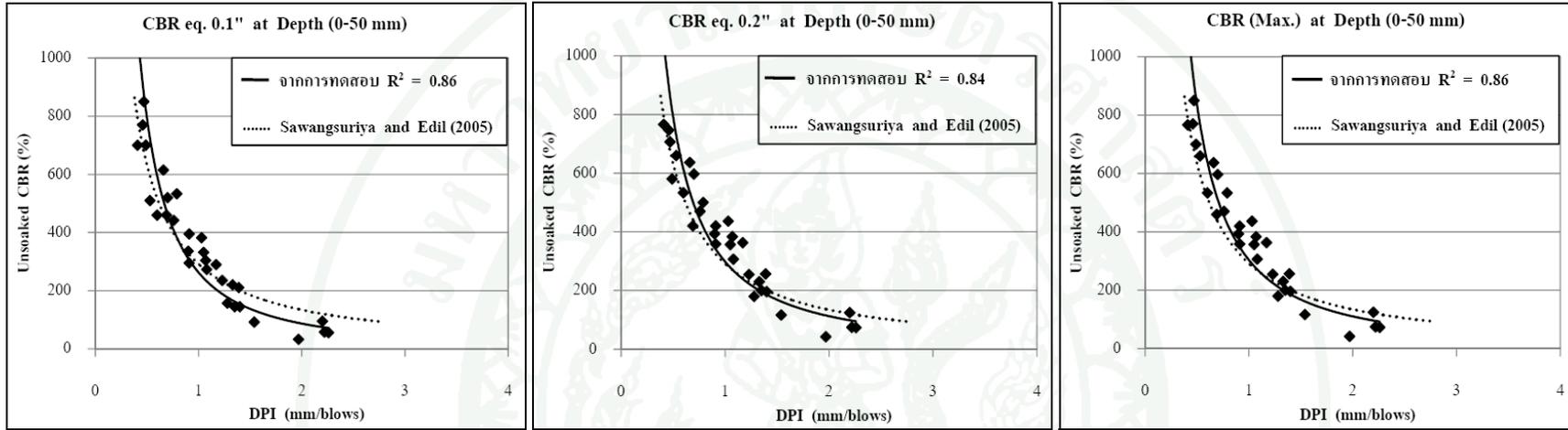


**ภาคผนวก ข**

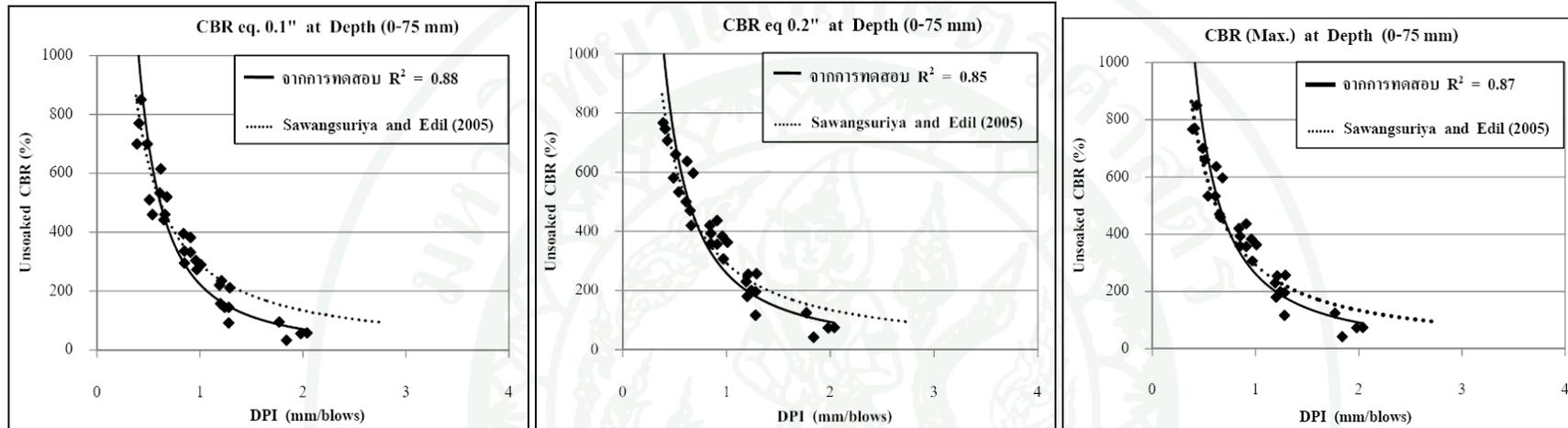
ภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมต่างๆ วัสดุโครงสร้างทาง  
เดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



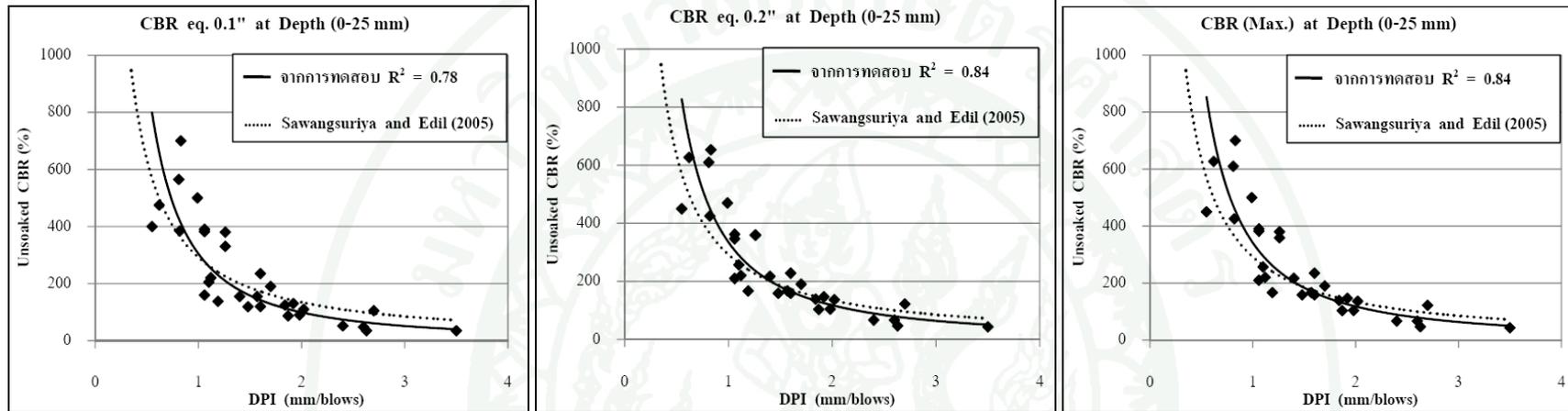
ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน 0-25 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



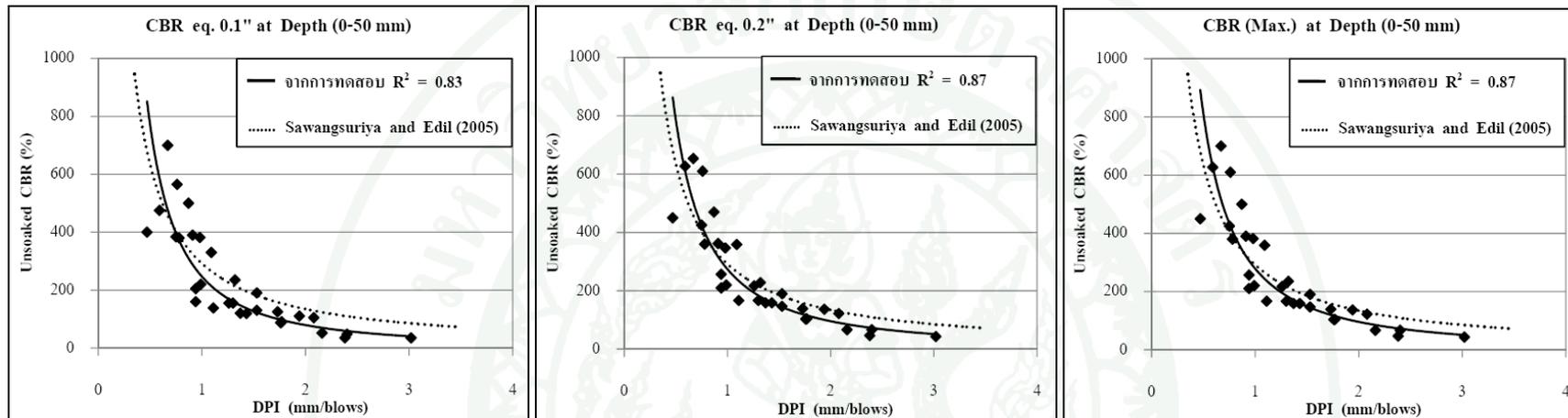
ภาพผนวกที่ ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน 0 – 50 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



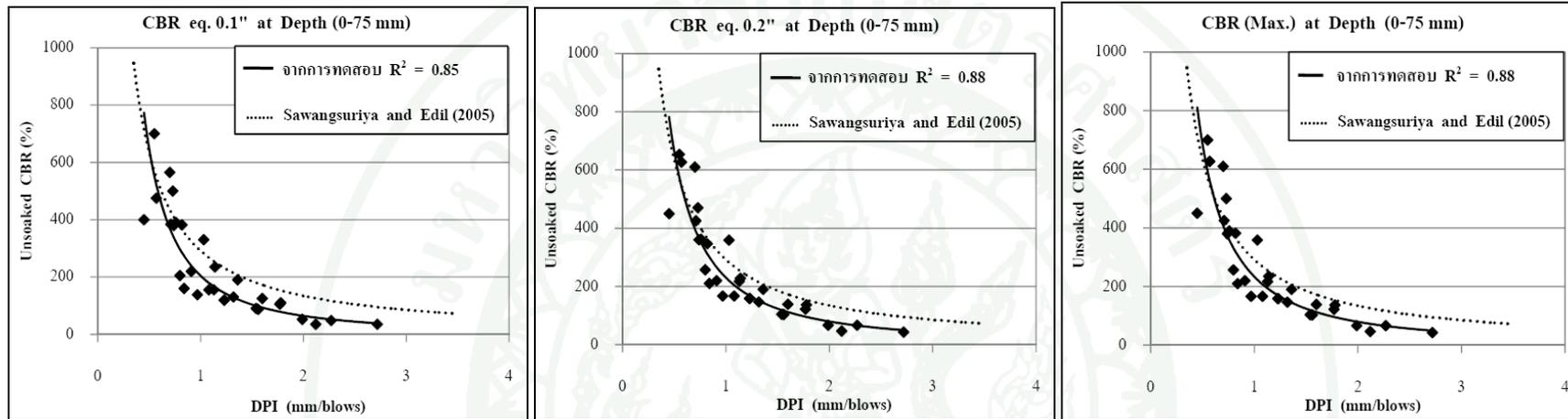
ภาพผนวกที่ ๓ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 75 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



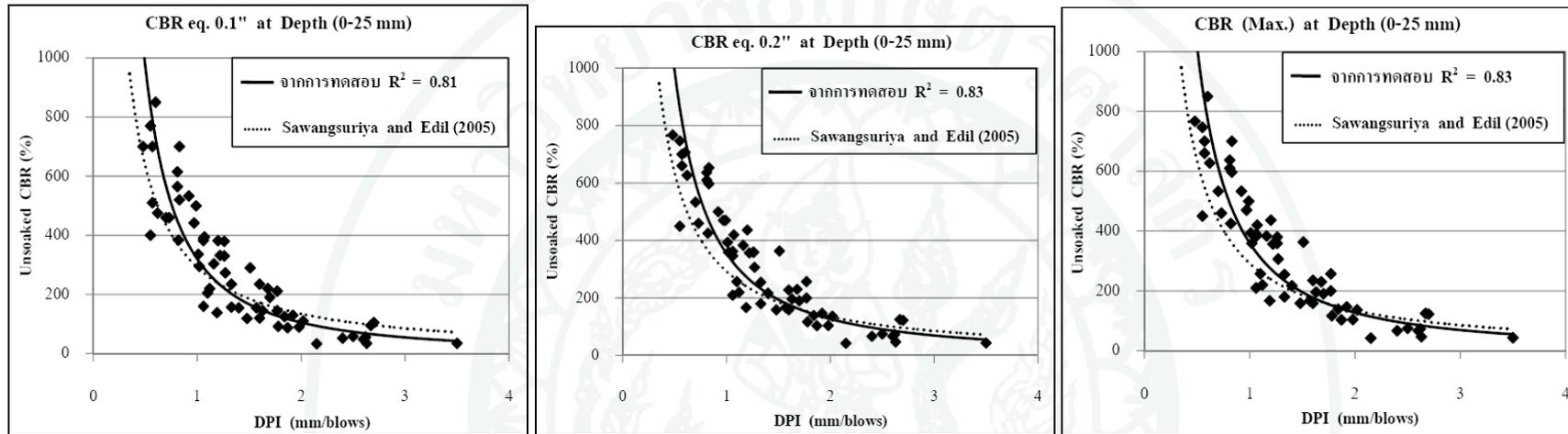
ภาพผนวกที่ ข4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน 0 – 25 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



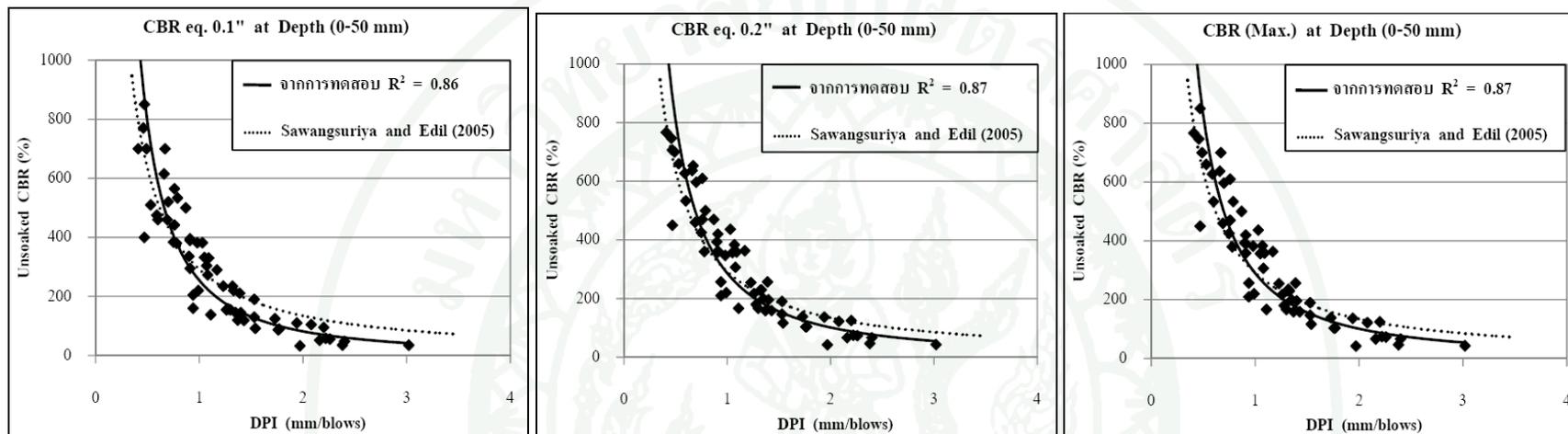
ภาพผนวกที่ ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



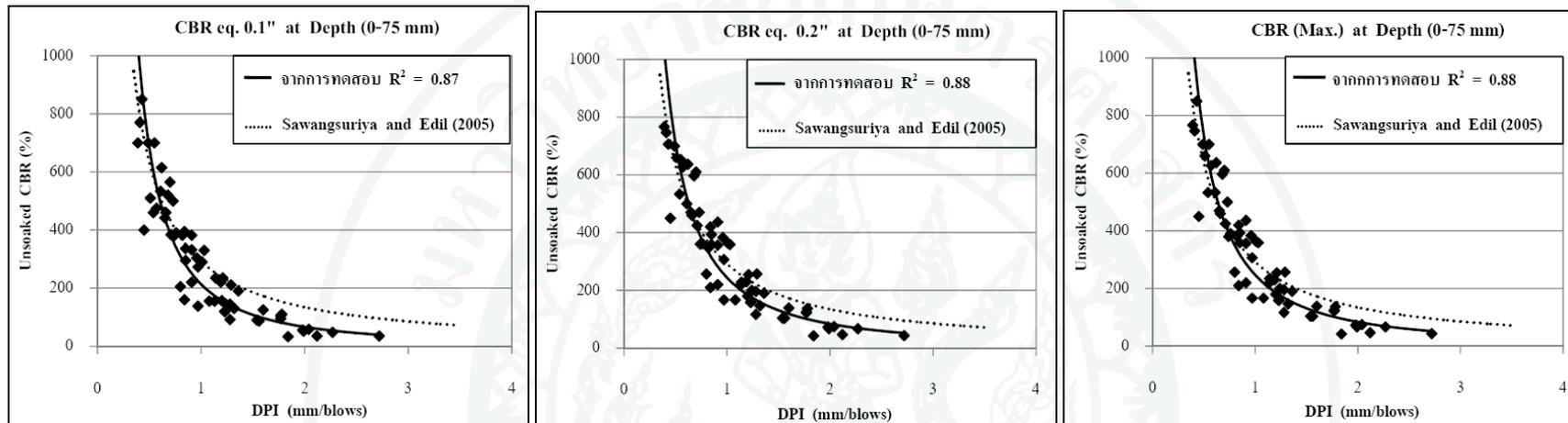
ภาพผนวกที่ ข6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิม 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพผนวกที่ ๗ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-25 มม. วัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพผนวกที่ ข8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน 0 – 50 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพผนวกที่ ๑๑ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 75 mm วัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาคผนวก ก  
การคำนวณการเปรียบเทียบขนาดท่อเหล็กกลมตันหุ้มค CBR และพลังงานที่ใช้บดอัด

## 1. การคำนวณการปรับเทียบขนาดท่อนเหล็กกลมตันหัวกด CBR

การศึกษานี้ใช้ท่อนเหล็กกลมตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว จึงทำการปรับเทียบขนาดท่อนเหล็กกลมตันหัวกด CBR ให้มีค่าเทียบเท่ากับขนาดหัวกดมาตรฐาน (ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Y = \frac{X}{D_3''} \times D_1''$$

เมื่อ Y = ระยะปรับแก้ที่นำมาใช้อ้างอิงสำหรับอ่านค่าแรงกด

X = ระยะการจมใดๆ ของท่อนเหล็กกลมตัน

$D_1''$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 1 ตารางนิ้ว

$D_3''$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 3 ตารางนิ้ว

โดยที่ X = เทียบเท่ากับระยะการจมที่ 0.1 นิ้ว

$D_1''$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 1 ตารางนิ้ว มีค่าเท่ากับ 1.13 นิ้ว

$D_3''$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 3 ตารางนิ้ว มีค่าเท่ากับ 1.95 นิ้ว

จะได้

$$Y = \frac{0.1}{1.95} \times 1.13$$

$$Y = 0.058 \text{ นิ้ว}$$

ดังนั้น ท่อนเหล็กกลมตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว ที่ระยะการจมน้ำ 0.058 นิ้ว มีค่าเทียบเท่ากับท่อนเหล็กกลมตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว ที่ระยะการจมน้ำ 0.1 นิ้ว

## 2. การคำนวณพลังงานที่ใช้บดอัด

พลังงานที่ใช้บดอัดเป็นตัวแปรสำคัญมากในการทดสอบ การบดอัดในงานวิจัยนี้ใช้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Proctor) การบดอัดวัสดุตัวอย่างในห้องทดสอบจะต้องคำนึงถึงขนาดแบบทดสอบ น้ำหนักค้อนที่ใช้ ระยะยกของค้อน จำนวนชั้นดินที่บดอัดและความหนาของชั้นดินในการบดอัดแต่ละชั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = \frac{B \times N \times H \times W}{V} \quad (\text{t-m/m}^3)$$

เมื่อ E	=	พลังงานที่ใช้ในการบดอัด (t-m/m <sup>3</sup> )
B	=	จำนวนชั้น
N	=	จำนวนครั้งที่ตอกในแต่ละชั้น
W	=	น้ำหนักค้อนตอก (ton)
H	=	ระยะยกค้อน (m)
V	=	ปริมาตรของตัวอย่างในแบบทดสอบ (m <sup>3</sup> )

แบบทดสอบ (Mold CBR) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว

โดยที่ B	=	จำนวนชั้น 7 ชั้น
N	=	จำนวนครั้งที่ตอก 62 ครั้ง
W	=	น้ำหนักค้อน 4.53 x 10 <sup>-3</sup> ton
H	=	ระยะยกค้อน 0.46 m
V	=	ปริมาตรของตัวอย่างในแบบทดสอบ 3.26 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>

$$\text{จะได้} \quad E = \frac{7 \times 62 \times 0.46 \times 0.00453}{0.00326}$$

$$E = 277.5 \text{ t-m/m}^3$$

แบบทดสอบ (Mold UCS) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

โดยที่ B = จำนวนชั้น 5 ชั้น

N = จำนวนครั้งที่ตอก 25 ครั้ง

W = น้ำหนักก้อน  $4.53 \times 10^{-3}$  ton

H = ระยะยกก้อน 0.46 m

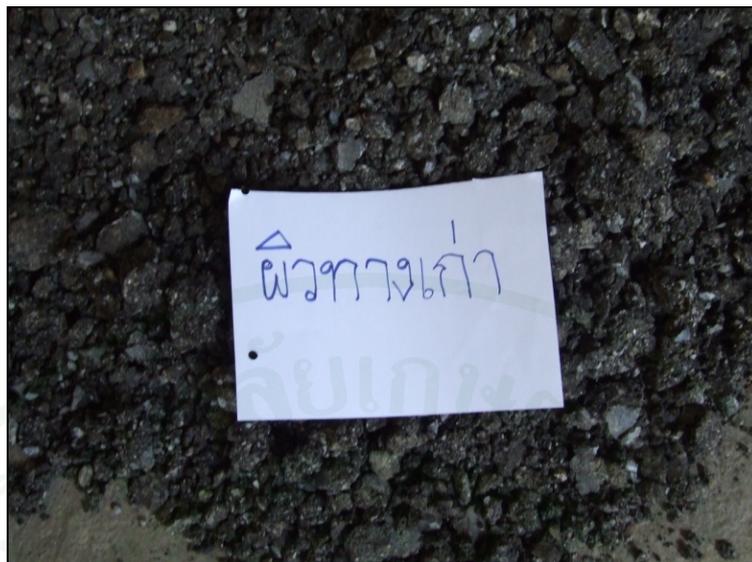
V = ปริมาตรของตัวอย่างในแบบทดสอบ  $9.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

$$\text{จะได้} \quad E = \frac{5 \times 25 \times 0.46 \times 0.00453}{0.00094}$$

$$E = 277.5 \text{ t-m/m}^3$$

ดังนั้น พลังงานที่ใช้บดอัดมีค่าเท่ากับ  $277.5 \text{ t-m/m}^3$





ภาพผนวกที่ ง1 วัสดุผิวทางเดิมที่ใช้วิจัย



ภาพผนวกที่ ง2 การเตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิม



ภาพผนวกที่ 33 การชั่งน้ำวัสดุโครงสร้างทางเดิมก่อนทดสอบการบดอัด (Compaction Test)



ภาพผนวกที่ 34 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)



ภาพผนวกที่ 5 การทดสอบ CBR แบบแช่น้ำ



ภาพผนวกที่ 6 การผสมวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพผนวกที่ ๗ การบดอัดวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามพลังงานที่กำหนดไว้ใน Mold UCS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว



ภาพผนวกที่ ๘ การบ่มวัสดุตัวอย่าง UCS



ภาพผนวกที่ ๑ การทดสอบ UCS



ภาพผนวกที่ ๑๐ การบดอัดวัสดุโครงสร้างทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามพลังงานที่กำหนดไว้ใน Mold CBR ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว



ภาพผนวกที่ 11 การบ่มวัสดุตัวอย่าง Unsoaked CBR



ภาพผนวกที่ 12 การทดสอบ Unsoaked CBR



ภาพผนวกที่ 13 ตัวอย่างหลังทดสอบ Unsoaked CBR และกลับด้านทดสอบ DCP



ภาพผนวกที่ 14 การทดสอบ DCP

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อสกุล นายอาวุธ โพธิ์อุดม  
เกิดวันที่ 27 กันยายน 2524  
สถานที่เกิด จังหวัดขอนแก่น  
ประวัติการศึกษา วศ.บ.โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

