



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาประเมิน ความแข็งแรงของหินผสม Portland Cement บดอัดแน่น
ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer

Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory
Compacted Weathered Rock Stabilized with Portland Cement

นามผู้วิจัย เรืออากาศโท ฤกษ์ คันทนมภู

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์พัฒน์ สอนวงษ์, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ โชติกไกร, วศ.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จุฑา สุนิตย์สกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์อัคคพัฒน์ สว่างสุริย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาประเมิน ความแข็งแรงของหินผุผสม Portland Cement บดอัดแน่นใน
ห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer

Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory
Compacted Weathered Rock Stabilized with Portland Cement

โดย

เรืออากาศโท นภกรรจ์ กันธชมพู

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฉกรรจ์ คันทขมภู, เรืออากาศโท 2553: การศึกษาประเมินความแข็งแรงของหิน
ผสม Portland Cement บดอัดแน่นในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone
Penetrometer ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์พิพัฒน์ สอนวงษ์, วศ.ม. 173 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DCP
Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compressive Strength (UCS) และคุณสมบัติด้าน
กายภาพของวัสดุหินผุทั้ง 2 แหล่งโดยปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ต
แลนด์ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของมวลรวมแห้ง ทำการผสมโดยใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุ
ตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด และใช้ปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่น
สูงสุด พลังงานในการบดอัด 277.50 ตัน/ลูกบาศก์เมตร ในการทดสอบ CBR ใช้ก้อนเหล็กกลม
ตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว ทำการทดสอบที่อายุการบ่มอายุ 2 และ 3 วัน ผลการศึกษานี้
จะเป็นการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS สามารถใช้เป็น
แนวทางในการพัฒนามาตรฐานข้อกำหนด เพื่อใช้ในงานตรวจสอบวิเคราะห์สำหรับการควบคุม
งานก่อสร้างชั้นทาง

$$\text{Unsoaked CBR} = 259.3\text{DPI}^{-0.86}$$

$$\text{Unsoaked CBR} = 12.02\text{UCS}$$

$$\text{UCS (ksc)} = 21.57\text{DPI}^{-0.86}$$

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chagan Kantachompoo, Flying Officer 2010: Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory Compacted Weathered Rock Stabilized with Portland Cement. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Piphat Sornwong, M.Eng. 173 pages.

The purpose of this research was to determine the relationships between Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetrometer Penetration Index (DPI) and Unconfined Compressive Strength (UCS), and to determine the physical properties of the weathered rock 2 place . 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/m³. A piston having a cross-sectional area of 1 in² was used in the CBR test. Specimens were cured for 2 and 3 days. Results from these studies were used to develop the relationships among unsoaked CBR, DPI and UCS, and to develop guideline and specification highway construction control.

$$\text{Unsoaked CBR} = 259.3\text{DPI}^{-0.86}$$

$$\text{Unsoaked CBR} = 12.02\text{UCS}$$

$$\text{UCS (ksc)} = 21.57\text{DPI}^{-0.86}$$

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์พิพัฒน์ สอนวงษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทาง ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ โชติกไกร อาจารย์ ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล และอาจารย์ ดร.อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทาง ตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณบัญชา เจริญชัยกรณ์ ข้าราชการห้องปฏิบัติการปฐพีและฐานราก สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบ

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาว และกรมช่างโยธาทหารอากาศ อันเป็นที่รักของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้งานวิจัย ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

เรืออากาศโท ฉกรรจ์ คันธมภู

ตุลาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการศึกษา	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	43
ผลการทดลองและวิจารณ์	50
วิจารณ์	87
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
สรุป	89
ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DCP และ UCS	97
ภาคผนวก ข ภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ ระยะการจมน้ำต่าง ๆ วัสดุหินผุทั้งสองชนิด ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	114
ภาคผนวก ค ภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะ การจมน้ำต่าง ๆ วัสดุหินผุทั้งสองชนิด ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	127
ภาคผนวก ง การคำนวณการปรับเทียบขนาดท่อนเหล็กกลมตันหุ้มค CBR และพลังงานที่ใช้บดทับ	170

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดกะของวัสดุรองพื้นทาง	18
2	เปรียบเทียบรายละเอียด Standard Proctor และ Modified Proctor	27
3	พลังงานที่ใช้บดทับ Mold Dia. 4 นิ้ว	37
4	พลังงานที่ใช้บดทับ Mold Dia. 6 นิ้ว	37
5	ขนาดกะวัสดุหินผุทั้งสองชนิด	50
6	ผลทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2	52
7	ผลการทดสอบการบดทับ (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน	53
8	ผลการทดสอบ Liquid Limit ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2	54
9	ผลการทดสอบหาค่า CBR แบบแช่น้ำ	55
10	ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 0.1 นิ้ว วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	57
11	ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 0.2 นิ้ว วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	58
12	ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	59
13	ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 1 นิ้ว วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	60
14	ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 2 นิ้ว วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	61
15	ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	62
16	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	64
17	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
18	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)	68
19	ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)	68
20	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	71
21	ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	73
ตารางผนวกที่		
ก1	ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR กับ DPI วัสดุหินผุแหล่งที่ 1ปรับปรุง คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	98
ก2	ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR กับ DPI วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุง คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	99
ก3	ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 1ปรับปรุง คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	100
ก4	ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุง คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	101
ก5	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 6 “ eq 0.1”วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	102
ก6	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 6 “ eq 0.2”วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	103
ก7	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 6 “ eq Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก8	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 8 “ eq 0.1” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	105
ก9	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 8 “ eq 0.2” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	106
ก10	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 8 “ eq Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	107
ก11	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 10 “ eq 0.1” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	108
ก12	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 10 “ eq 0.2” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	109
ก13	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 10 “ eq Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	110
ก14	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 12 “ eq 0.1” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	111
ก15	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 12 “ eq 0.2” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	112
ก16	ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 12 “ eq Max ” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	113

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงโครงสร้างของดินปูนซีเมนต์	15
2	ขั้นตอนการทดสอบ CBR	20
3	เครื่องทดสอบหาขนาดคละของวัสดุ	23
4	การทำ Liquid Limit	25
5	การทำ Plastic Limit	25
6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (V_u) และเปอร์เซ็นต์ความชื้น	26
7	เครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer	28
8	การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer	29
9	Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Illinois Department of Transportation	32
10	ความสัมพันธ์ระหว่าง DPI กับ Unsoaked CBR ของดิน 5 ชนิด	33
11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DPI และ Unsoaked CBR	34
12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับ DPI ของ Granular base materials	35
13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณน้ำ	39
14	แรงต้านทานต่อการแตกตัวด้านข้าง (Confining Stress)	40
15	ขนาดคละวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2	51
16	ผลการทดสอบการบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินผุทั้งสองแหล่ง	54
17	ผลการทดสอบ Liquid Limit ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2	55
18	ผลการทดสอบ CBR ที่ 0.1 และ 0.2 นิ้ว Penetration วัสดุหินผุแหล่งที่ 1	56
19	ผลการทดสอบ CBR ที่ 0.1 และ 0.2 นิ้ว Penetration วัสดุหินผุแหล่งที่ 2	56
20	ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR Max และ DPI วัสดุหินผุของทั้งสองแหล่ง ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	63
21	ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR Max และ DPI วัสดุหินผุรวมทั้งสองแหล่ง ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) และอายุการบ่มของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC) และ (1.25*OMC)	66
23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 1ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำ(1.0*OMC) และ (1.25*OMC)	67
24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) และอายุการบ่มวัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC) และ (1.25*OMC)	69
25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC) และ (1.25*OMC)	70
26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	72
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	74
28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุง คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	75
29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	76
30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	77
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	78
32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุ ทั้งสองแหล่งรวมข้อมูลปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	80
34	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า UCS และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	81
35	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR eq 0.1” และ DPI (0-25mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุง คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	82
36	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR eq 0.2” และ DPI (0-25mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	83
37	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR Max และ DPI (0-25mm) ในการเปลี่ยน ขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	83
38	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR eq 0.1” และ DPI (0-50mm) ในการ เปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	84
39	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR eq 0.2” และ DPI (0-50mm) ในการเปลี่ยน ขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	84
40	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR Max และ DPI (0-50mm) ในการเปลี่ยน ขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	85
41	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR eq.0.1” และ DPI (0-75mm) ในการเปลี่ยน ขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR eq.0.2” และ DPI (0-75mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	86
43	ความสัมพัทธ์ค่า Unsoaked CBR Max และ DPI (0-75mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	86
ภาพผนวกที่		
ข1	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	115
ข2	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	117
ข3	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	119
ข4	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	121
ข5	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	123

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	125
ค1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	128
ค2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	130
ค3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	132
ค4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	134
ค5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	136
ค6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	138
ค7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	140

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค8	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	142
ค9	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR กับ DPI ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	144
ค10	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 6” ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	146
ค11	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 6” ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	148
ค12	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 6” ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	150
ค13	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 8” ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	152
ค14	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 8” ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	154
ค15	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 8” ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	156

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 10” ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	158
ค17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 10” ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	160
ค18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 10” ที่ระยะการจม 0 – 75 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	162
ค19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 12” ที่ระยะการจม 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	164
ค20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 12” ที่ระยะการจม 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	166
ค21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 12” ที่ระยะการจม 0 – 75mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	168

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

การศึกษาประเมิน ความแข็งแรงของหินผุผสม Portland Cement บดทับแน่น ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer

Strength Assessment by Dynamic Cone Penetrometer for Laboratory Compacted Weathered Rock Stabilized with Portland Cement

คำนำ

เนื่องจากการก่อสร้างในสภาพหน้างานนั้นอาจเกิดข้อจำกัดในการหาวัสดุที่ได้มาตรฐาน และมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด กรมทางหลวงจึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยใช้ Portland Cement

อีกทั้งสิ่งสำคัญในการก่อสร้างทางนั้นนอกจากวัสดุที่มีคุณภาพและวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติให้ได้มาตรฐานแล้ว การควบคุมงานก่อสร้างเพื่อให้ได้ความแข็งแรงตามมาตรฐานกำหนด สามารถทำได้โดยการตรวจสอบคุณภาพงานในระหว่างการก่อสร้าง อาทิเช่น การบดทับ ความหนาแน่นของชั้นทางในพื้นที่ก่อสร้าง สภาพการบดทับวัสดุชั้นทางจะมีความสัมพันธ์โดยตรงและความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำชั้นทาง

ในการศึกษาการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ ได้เปรียบเทียบค่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติ ของวัสดุดินปรับปรุงคุณสมบัติปริมาณความชื้นแต่ละพลังงานในการบดทับ ปริมาณ Portland Cement ระยะเวลาในการบ่ม เพื่อทำการทดสอบ Unconfined Compression Test (UCS), California Bearing Ratio (CBR) และ Dynamic Cone Penetrometer Index (DPI) และศึกษาผลกระทบจากขนาดของ Mold ที่ ใช้ทดสอบ เพื่อใช้ในการพัฒนา ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับการนำไปใช้ในการก่อสร้างต่อไป

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของหินผุในท้องที่จังหวัดลพบุรี และ จังหวัดสุพรรณบุรีที่ใช้ในการก่อสร้างงานทาง
2. ศึกษาปริมาณ Portland Cement Type 1 และปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติความแข็งแรง ของหินผุในจังหวัดลพบุรี และ จังหวัดสุพรรณบุรีผสมปูนซีเมนต์
3. ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการจมของการทดสอบ Dynamic Cone Penetration (DCP) และ ผลทดสอบ Unsoaked CBR ของของหินผุทั้งสองตัวอย่างที่ศึกษา
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Dynamic Cone Penetration Index (DPI) และ Unsoaked CBR, Dynamic Cone Penetration Index (DPI) และ Unconfined Compression Test (UCS) รวมทั้ง Unsoaked CBR และ Unconfined Compression Test (UCS) อีกด้วย

ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของหินผุที่นำมาจากสองจังหวัดคือจังหวัดลพบุรี และ จังหวัดสุพรรณบุรีที่นำมาใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางและทดสอบการบด ทับแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาค่า Optimum Moisture Content (OMC) และ Maximum Dry Density (MDD) ทดสอบตามมาตรฐานกรม ทางหลวง (2530) ที่ ทล. - ท.108 /2517
2. ศึกษาความสามารถการรับแรงอัดของหินผุที่ปรับปรุงคุณภาพ
3. ศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Dynamic Cone Penetration Index (DPI) และค่า Unsoaked CBR และ Unconfined Compression Test (UCS) ของหินผุสองชนิด ที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์ และไม่มีการปรับปรุง

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ลักษณะและคุณสมบัติต่างๆของหินผุ

1.1 หินตะกอน (Sedimentary rock) คือ หินที่เกิดจากการตกตะกอนของเม็ดแร่ที่ได้จากการผุพังของหินชนิดใดก็ได้ที่ผิวโลก และถูกพัดพาไปโดย น้ำ ลม หรือธารน้ำแข็ง แล้วจับตัวกันแข็งเป็นหิน หรือ เกิดจากการตกตะกอนทางเคมีของสารละลายจากในน้ำ ในลำธาร ทะเล หรือ มหาสมุทร เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือการระเหยของน้ำ ที่อุณหภูมิปกติบนผิวโลก ลักษณะเด่นของหินตะกอน คือ การเกิดเป็นชั้น อาจมีซากดึกดำบรรพ์ หรือแสดงลักษณะ โครงสร้างของการตกตะกอนตามลำดับอายุ การเกิดของหินตะกอนมีการเกิดได้หลายวิธีดังนี้

1.1.1 การผุพัง (Weathering) หมายถึง การที่หินผุพังและถูกทำลายลง ด้วยกรรมวิธีต่างๆเช่น จากลมฟ้าอากาศ น้ำ น้ำแข็ง และรวมทั้งการกระทำของต้นไม้ แบคทีเรีย ตลอดจนการแตกตัวทางกลศาสตร์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นต้น ทำให้ตะกอนของหินขนาดต่างๆ มีลักษณะกลมมน ตะกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดต่างกัน เป็นก้อนหินใหญ่ ขนาดเล็ก กรวด ทราย และโคลน

1.1.2 การกร่อน (Erosion) หมายถึง กระบวนการที่ทำให้สารเปลือกโลกหลุด ละลายไป หรือกร่อนไป (โดยมีการเคลื่อนที่ที่กระจัดกระจายไปจากที่เดิม) โดยมีต้นเหตุคือตัวการธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ ลมฟ้าอากาศ กระแสน้ำ ธารน้ำแข็ง การครูดไถล ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วง

1.1.3 การพัดพา (Transportation) หมายถึง การเคลื่อนที่ของมวลหิน ดิน ทราย โดยกระแสน้ำ กระแสลม หรือธารน้ำแข็ง ภายใต้แรงดึงดูดของโลก อนุภาคขนาดเล็กจะถูกพัดพาให้เคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

1.1.4 การทับถม (Deposit) เกิดขึ้นเมื่อตัวกลางซึ่งทำให้เกิดการพัดพาเช่น กระแสน้ำ กระแสลม หรือธารน้ำแข็ง อ่อนกำลังลงและยุติลง ตะกอนที่ถูกพัดพาจะสะสมตัวทับถมกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ความกดดัน ปฏิกิริยาเคมี และเกิดการตกผลึก หินตะกอนที่อยู่ชั้น

ล่างจะมีความหนาแน่นสูงและมีเนื้อละเอียดกว่าชั้นบนเนื่องจากแรงกดดันซึ่งเกิดขึ้นจากน้ำหนักตัวทับถมกันเป็นชั้นๆ (หมายเหตุ: การทับถมบางครั้งเกิดจากการระเหยของสารละลาย ส่วนที่เป็นน้ำระเหยไปในอากาศทิ้งสารที่เหลือให้ตกผลึกไว้เช่นเดียวและการทำนาเกลือ)

1.1.5 การกลับคืนเป็นหิน (Lithification) เมื่อเศษตะกอนทับถมกันจะเกิดโพรงขึ้นประมาณ 20 – 40% ของเนื้อตะกอน น้ำพาสารละลายเข้ามาแทนที่อากาศในโพรง เมื่อเกิดการทับถมกันจนมีน้ำหนักมากขึ้น เนื้อตะกอนจะถูกทำให้เรียงชิดติดกันทำให้โพรงจะมีขนาดเล็กลง จนน้ำที่เคยมีอยู่ถูกขับไล่ออกไป สารที่ตกค้างอยู่ทำหน้าที่เป็นปูนซีเมนต์เชื่อมตะกอนเข้าด้วยกันกลับเป็นหินอีกครั้ง

1.2 หินอัคนี (Igneous rock) คือหินที่เกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกของหินหนืด (Magma) เมื่อหินหนืดเหล่านี้เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ผิวโลก หินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกของหินหนืดใต้ผิวโลกอย่างช้า ๆ เรียกว่า หินอัคนีบาดาล (Intrusive Rocks หรือ Plutonic Rocks) หินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกของหินหลอมเหลว (Lava) บนผิวโลกหรือใกล้ผิวโลก เรียกว่า หินอัคนีภูเขาไฟ (Extrusive Rocks หรือ Volcanic Rocks) หินอัคนีที่เกิดจากการทับถมของเศษหินที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟ เมื่อมีการเชื่อมประสานด้วยแร่ จะได้หินที่เรียกว่า หินอัคนีตะกอนภูเขาไฟ (Pyroclastic Rocks)

ดร.คชินท์ สายอินทวงศ์ ได้กล่าวไว้ว่า หินผุเป็นวัตถุหินชนิดหนึ่งที่พบในแหล่งที่มีหินภูเขาไฟ หินแกรนิต เฟลสปาร์ หรือในแหล่งดินขาว ซึ่งจากแหล่งที่พบจะมีวัตถุหินอยู่ 4 ลักษณะ

- ดินขาว ได้แก่ วัตถุหินที่มีลักษณะเป็นผงดินสีขาว
- หินผุ ได้แก่ วัตถุหินที่มีลักษณะเป็นหินสีขาว มีความแข็งน้อย
- หินสด ได้แก่ วัตถุหินที่มีลักษณะเป็นหินสีขาวที่มีความแข็งมากกว่าหินผุ
- หินแข็งชนิดต่างๆ เช่น หินเขียวหนุมาน ทราย และ เฟลสปาร์

ลักษณะของดินขาว หินผุ และหินสด ที่รวมกันอยู่นี้ ในภาษาญี่ปุ่นเรียกว่า โทเซกิ (Tosiki) ซึ่งตรงและคำว่า ไชนาสโตน (China Stone) หินพอตเตอรี (Pottery Stone) หรือ หินพอร์สเลน (Porcelain Stone) หรือ คอร์นิชสโตน (Cornish Stone) หินผุนี้เกิดจากสายน้ำร้อนที่ดันตัวผ่านหินต้นกำเนิด (Mother Rock) จนหินต้นกำเนิดนั้น กลายสภาพเป็น ไชนาสโตน ควอร์ต (China

Stone Quartz) ซึ่งโดยปกติ โครงสร้างทางแร่ของหินมุ จะประกอบด้วยควอร์ต และ ไมกา (White Mica ; $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$) เป็นหลัก ควอร์ตจะทนไฟสูง ไม่มีความเหนียว และไม่มีความสามารถในการหลอม ส่วนไมกาจะมีสมบัติคล้ายดินขาว คือมีความเหนียว ทำให้สภาพการไหลตัวดีขึ้น และมีความสามารถในการหลอมตัวเหมือนหินฟันม้า จึงใช้ทำเนื้อเซรามิกส์ฟอร์สเลนได้ โดยไม่ต้องผสมวัตถุดิบตัวอื่น

1.3 การเกิดหินมุ มี 3 ลักษณะคือ

1.3.1 เกิดจากหินต้นกำเนิดที่เป็นหินหนืดที่แทรกดันตัวผ่านหินท้องที่ (Country Rock หรือ Wall Rock) ขึ้นสู่ผิวโลก แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในด้วยตนเองจนกลายเป็นหินมุ จะสังเกตเห็นว่า หินท้องที่จะมีลักษณะแตกต่างหรือเป็นคนละประเภทและหินต้นกำเนิด

1.3.2 เกิดจากหินหนืด (หินที่เกิดจากการหลอมเหลวจากความร้อนและความดันสูงใต้ผิวโลก) ที่ถูกดันตัวและเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยการพัดพาของน้ำร้อน จนกลายเป็นหินต้นกำเนิดที่เป็นหินมุ (หินท้องที่มักเป็นหินภูเขาไฟ หรือหินจี๊ถ้าภูเขาไฟ) การเกิดประเภทนี้ หินท้องที่และหินต้นกำเนิดจะเป็นหินประเภทเดียวกัน และมักจะจับตัวกันเป็นพื้นที่กว้าง

1.3.3 เกิดจากหินภูเขาไฟที่ประกอบไปด้วยหินภูเขาไฟที่มีส่วนประกอบเป็นชนิดบะซอลต์ไปจนถึงชนิดไรโอไลต์ พบว่าช่วงแรกของการเกิดภูเขาไฟจะให้หินบะซอลต์ หินบะซอลต์ แอนดีไซต์ และหินแอนดีไซต์และต่อมาเป็นการระเบิดของภูเขาไฟชนิดไรโอไลต์ เกิดการระเบิดอย่างรุนแรง ทำให้เกิดการสะสมของชั้นตะกอนภูเขาไฟ เป็นชั้นหนาและเกิดการแผ่กระจายตามพื้นที่และมีชั้นหินภูเขาไฟเกิดเป็นชั้นหนาวางตัวอยู่ล่างและอยู่บนชั้นตะกอนภูเขาไฟ ส่วนชั้นบนสุดจะเป็นชั้นของหินไรโอไลต์ ซึ่งเกิดจากลาวาไหลปกคลุมชั้นหินทั้งหมด และหลังจากนั้นเกิดการไหลของหินบะซอลต์ปกคลุมพื้นที่ราบรอบเทือกเขา

2. ประวัติและความเป็นมาของ Soil Cement

2.1 Soil Cement

เป็นวัสดุที่ได้จากการนำเอา ดินมาผสมและปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนหนึ่งโดยมีน้ำเป็นตัวช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยา ระหว่าง ดิน และ ปูนซีเมนต์ แล้วจึงใช้พลังงานจำนวนหนึ่งในการบดทับ (Compact) เพื่อให้วัสดุผสมนี้อัดตัวกันแน่นและให้มีความแข็งแรง (Strength) ที่ต้องการ แนวความคิดในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้ดีขึ้น โดยการใช้สารผสมเพิ่มได้เกิดขึ้นมาเป็นเวลา 5,000 ปีมาแล้ว ซึ่งได้มีการผสมดินและปูนขาวหรือสาร Pozzolans วิธีการนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมให้ดีขึ้น Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson, M.R. (1979)

2.2 วิวัฒนาการของดินปูนซีเมนต์ในต่างประเทศ

การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยปูนซีเมนต์เริ่มต้นในการสร้างถนนในเมือง Sarasota รัฐ Florida ในปี 1915 อาจจะกล่าวได้ว่าเป็นการเริ่มต้นครั้งแรกในโลกเกี่ยวกับถนนดินปูนซีเมนต์ จากหลักฐานพบว่าถนน Oak ได้ถูกสร้างขึ้นจากการขุดเอาดิน Shell จากอ่าวมาผสมและทรายและปูนซีเมนต์ ต่อจากนั้นก็นำเอาส่วนผสมที่ได้ไปเกลี่ยบดและอัดด้วยรถบดไอน้ำที่มีน้ำหนัก 10 ตัน แทนการทำถนนคอนกรีตเนื่องจากเครื่องผสมคอนกรีตขัดข้อง Davidson, (1961)

ในช่วงศตวรรษที่ 1920 หน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้องและถนนในรัฐต่างๆ ของประเทศสหรัฐอเมริกา อันประกอบด้วยรัฐ Iowa, South Dakota, Ohio, California และ Texas ได้มีการทดสอบดินผสมและปูนซีเมนต์ทำถนน แต่เนื่องจากในขณะนั้นยังขาดความรู้และความเข้าใจทางวิทยาศาสตร์ทำให้ไม่สามารถทำนายและอธิบายผลได้ ยังได้อ้างรายงานของ Mills (1935, 1936)

ในช่วงศตวรรษที่ 1933 และ 1934 South California State Department โดย Dr C.H. Moorefield ได้ทำการทดลองนำดินปูนซีเมนต์มาสร้างถนนหลายสายแล้วได้พบว่า ดินผสมปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถผสมเข้ากันได้และนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทางของถนนที่มีราคาถูกจากการค้นพบดังกล่าวได้ส่งเสริมให้เกิดการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับดินปูนซีเมนต์กันอย่างกว้างขวางมากขึ้น Mills (1935)

ในช่วงศตวรรษที่ 1935 Portland Cement Association โดย F.T. Sheet ได้นำเทคโนโลยี (ซึ่งใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1929) มาปรับปรุงใช้และการบดทับดินผสมปูนซีเมนต์ โดยการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความแน่น ผลการทดลองทำให้สามารถหาปริมาณของดินปูนซีเมนต์และน้ำที่ใช้ผสมในการบดทับได้ (Catton, 1938)

ในช่วงศตวรรษที่ 1935 South California State Highway Department, Bureau of Public Road และ Portland Cement Association ได้ร่วมกันสร้างถนนโดยใช้ดินปูนซีเมนต์เป็นระยะทาง 1.5 ไมล์ บริเวณใกล้เมือง Johnsonville ซึ่งเป็นโครงการแรกในทางวงการวิศวกรรม ที่นำดินปูนซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุอย่างกว้างขวางและจากผลสำเร็จของโครงการนี้ทำให้มีการทดลองเพิ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1936 ในรัฐ South Carolina, Illinois, Michigan, Michigan, Missouri และ Wisconsin โดย Portland Cement Association เป็นผู้ทดลองสร้างและในช่วงเวลานี้ได้มีการใช้ดินปูนซีเมนต์ในการก่อสร้างถนนและพื้นสนามบินอย่างกว้างขวาง (Mill, 1935; Catton, 1938; Davison, 1961)

ในช่วงศตวรรษที่ 1935 Development Department of Portland Cement Association ได้ศึกษาค้นคว้าทำให้สามารถพัฒนาผลของส่วนผสมที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์และดินหลายชนิด และจากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ มีวิธีการทดสอบที่ได้มีการพัฒนาขึ้นคือ Moisture-Density, Wet-Dry Test และ Freeze – Thaw Test สำหรับดินปูนซีเมนต์และวิธีการเหล่านี้ต่อมาได้ถูกนำมาเป็นมาตรฐานการทดสอบของ American Association of State Highway Officials (AASHO) ในปี 1945 (Portland Cement Association, 1956)

ในช่วงศตวรรษที่ 1940 ประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ถนนดินปูนซีเมนต์ได้ถูกนำมาใช้และการก่อสร้างสนามบินอย่างมากมาย ระหว่างปี ค.ศ. 1941 ถึง ค.ศ. 1944 พบว่ามีปริมาณการใช้มากถึง 22 ล้านตารางหลา แต่ในขณะที่เดียวกันการก่อสร้างถนนมีปริมาณน้อยลงภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติ การใช้ถนนดินปูนซีเมนต์กลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง นอกเหนือจากการก่อสร้างถนน, ที่จอดรถ, คลังเก็บสินค้า, โรงพ่นอ่างเก็บน้ำของอุทลอง ยิ่งกว่านั้นมีการใช้ถนนปูนซีเมนต์ ได้แผ่ขยายกว้างในสหรัฐ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในประเทศอังกฤษ ออฟริกาใต้ ตะวันออกกลาง อเมริกาใต้ และเยอรมันในเวลาต่อมา (Portland Cement Association, 1956)

ในช่วงศตวรรษที่ 1960 การใช้ดินปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างถนนของประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดา มีพื้นที่มากถึง 46 ล้านตารางหลา นอกจากนี้ยังมีการใช้ดินปูนซีเมนต์อย่างกว้างขวางในประเทศอังกฤษ, แอฟริกาใต้, ตะวันออกกลาง และเยอรมัน (Davison, 1961)

2.3 วิวัฒนาการของดินปูนซีเมนต์ในประเทศไทย

ประเทศไทย เริ่มมีแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 1 และฉบับที่ 2 ซึ่งได้กำหนดให้มีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน รัฐบาล ได้เร่งรัดการก่อสร้าง ทำให้งานกรรมทางหลวงได้เพิ่มขึ้นมาก ค่าก่อสร้างทางแพงมากและมีอุปสรรคเกี่ยวและวัสดุสร้างทาง

ตั้งแต่ ปี พ.ศ.2508 กรรมทางหลวง (อธิบดี อุทัย วุฒิกุล) มีความเห็นว่าควรดำเนินงานก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลน วัสดุหินโดยใช้วัสดุท้องถิ่นผสมซีเมนต์เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแทนหินคลุก จึงให้กองวิเคราะห์และวิจัย (ผอ.กองฯ นิพนธ์ ธรรมนันท์) ทำการศึกษาและ มีความเห็นว่าไม่ควรใช้ทรายผสมซีเมนต์ เพราะถนนมีการจราจรตลอดเวลากการใช้ทรายผสมซีเมนต์จำเป็นต้อง ปิดการจราจรอย่างน้อย 2-3 วัน จึงแนะนำให้ใช้ลูกรังที่มี P.I. ก่อนข้างต่ำ เพราะวัสดุลูกรังนี้ถ้าบดทับให้แน่นมันก็สามารถรับน้ำหนักการจราจรด้วยตัวของมันเองได้อยู่แล้ว ในปี พ.ศ. 2509 บริษัทปูนซีเมนต์ไทยได้เสนอทดลองทำ Cement Stabilized สาย เดชอุดม – บุญทริก ความยาว 5 กิโลเมตร โดยใช้ดินลูกรังบนพื้นทางเก่าผสมปูนซีเมนต์ โดยการใช้เครื่อง Road Stabilizer ทำการ Scarify วัสดุบนพื้นทางเดิมขึ้นมาแล้วเติม ปูนซีเมนต์ลงไปแล้วใช้เครื่อง Stabilizer ผสมให้เข้ากันในการออกแบบส่วนผสมดินซีเมนต์ ได้วางเกณฑ์กำหนดของค่ากำลังรับแรงอัด Unconfined Compressive Strength (UCS) เท่ากับ 250 psi. ที่อายุ 7 วัน และกำหนดความแน่น ในการบดทับไม่น้อยกว่า 95 % Modified Proctor ทางสาย ยโสธร – คำเขื่อนแก้ว เป็นสายแรกที่เริ่มทำดินซีเมนต์ได้ใช้ปูนขาวผสมเข้าไปด้วย 2 % เพื่อชดเชยการแข็งตัวของปูนซีเมนต์จากห้องทดลองใช้ปูนขาว 2 % ใช้ปูนซีเมนต์ 3 % 4 % และ 5 % ปรากฏว่าที่ปูนซีเมนต์ 3 % ก็ได้ Strength มากกว่า 250 psi. แต่เนื่องจากไม่แน่ใจประสิทธิภาพในการผสมในสนาม จึงควรคำนึงถึงประสิทธิภาพของคนและเครื่องจักรประมาณ 60 % ซึ่งต้องใช้ปูนซีเมนต์ถึง 6 % ต่อมา 4-6 เดือนหลังประสิทธิภาพของคนและเครื่องจักรอาจได้ถึง 85 – 90 % ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง แต่ในการผสมโดยใช้รถ Stabilizer จะไม่ลดปูนซีเมนต์ต่ำกว่า 3 % เพราะถ้าต่ำกว่านี้มักจะมีส่วนผสมที่ไม่สม่ำเสมอ สำหรับการผสมดินซีเมนต์ โดยใช้โรงงาน

ผสมอาจมีประสิทธิภาพถึง 90 – 95 % ปูนซีเมนต์ที่ใช้อาจลดลงได้ แต่ไม่น้อยกว่า 2 % ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ และคุณภาพของวัสดุและการทดลอง ในห้องทดลองและการตรวจสอบจากผลในสนาม

จากประสบการณ์ที่กรมทางหลวงได้ดำเนินการก่อสร้างและได้ทำการศึกษาวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับและถนนดินซีเมนต์มาโดยตลอด พอที่จะทำให้ กรมทางหลวงสามารถพัฒนาเกณฑ์กำหนดและมาตรฐานในการออกแบบ การก่อสร้าง และการควบคุมคุณภาพถนนดินซีเมนต์ ได้ดียิ่งขึ้น วิศวกรรมการ ของถนนดินซีเมนต์ในประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ช่วงต้น ช่วงกลางและช่วงปัจจุบัน

การก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ช่วงต้นในประเทศไทยเกิดขึ้นระหว่างปี พ.ศ. 2510 – พ.ศ.2515 ในช่วงต้นนี้กรมทางหลวงได้ดำเนินการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวมความยาวประมาณ 1400 กิโลเมตร โครงการก่อสร้างทุกโครงการก่อสร้างโดยผู้รับเหมา แต่เกิดปัญหาทางด้านเทคนิคขึ้นในการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ในช่วงนี้ กล่าวคือ ถนนดินซีเมนต์บางสายเกิดมีรอยแตกปรากฏบนผิวหน้าของผิวทาง ทำให้กรมทางหลวงไม่มั่นใจในพฤติกรรมของถนนดินซีเมนต์ และได้จัดตั้งคณะกรรมการขึ้นมาเพื่อศึกษาวิจัยและติดตามพฤติกรรมของถนนดินซีเมนต์ ช่วงกลางของถนนดินซีเมนต์จะอยู่ระหว่างปี พ.ศ. 2516 – พ.ศ. 2528 โดยในช่วงเวลาดังกล่าวนี้กรมทางหลวงได้ทำการศึกษา ถึงการออกแบบและพฤติกรรมของถนนดินซีเมนต์ที่มีอยู่ รวมทั้งได้ทำการก่อสร้างถนนทดลองขึ้นใหม่ เพื่อศึกษาพฤติกรรม โดยละเอียด จากผลการศึกษาดังกล่าว ทำให้กรมทางหลวงสามารถพัฒนาเกณฑ์กำหนด และมาตรฐานการออกแบบก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ได้

ช่วงปัจจุบันของถนนดินซีเมนต์เริ่มประมาณปี พ.ศ. 2529 โดยในช่วงเวลาดังกล่าวนี้ กรมทางหลวงได้ทำการก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ มากขึ้นในลักษณะของโครงการจ้างเหมา โดยในการก่อสร้างในช่วงปัจจุบันได้ยึดเอามาตรฐานการออกแบบและการควบคุมงานอันเป็นผลจากการศึกษาวิจัยในช่วงกลางมาใช้ประโยชน์ เพื่อป้องกันมิให้เกิดความเสียหายเหมือนอย่างที่เคยเกิดในช่วงต้น เป็นที่คาดหวังว่าภายหลังจาก ประสบการณ์เกี่ยวกับและดินซีเมนต์มานาน 20 ปี กรมทางหลวงสามารถจะก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ที่ปราศจากปัญหาเกี่ยวกับและรอยแตกบนผิวทาง ได้เป็นอย่างดี ปัจจุบันกรมทางหลวงได้วางแผนจะสร้าง ถนนดินซีเมนต์ให้รับปริมาณจราจรที่สูงขึ้นกว่าเดิมในภาคอื่นๆ ของประเทศต่อไป

3. ประเภทของ Soil Cement

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization (1959) ได้ให้คำจำกัดความของ Cement – Treated Soil ว่าเป็นการนำเอาดินและปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมมาผสมและน้ำให้เข้ากันแล้วบดทับให้มีความหนาแน่นสูงสุด และป้องกันไม่ให้อุณหภูมิความชื้นไปในระหว่างการบ่ม ได้จัดแบ่งดินผสมปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมและลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

3.1 Cement Modified Silty Clay Soil คือดินที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับปรับปรุงคุณภาพของดินในลักษณะนี้มีปริมาณน้อยมากประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของหน้าดินเดิมที่เป็นดินเหนียว ที่มีลักษณะเปื่อยแฉะและมีความอ่อนตัวมาก ให้มีความแข็งแรงพอให้ยานพาหนะผ่านได้โดยไม่ลื่นไถล

3.2 Cement Modified Granular Soil คือดินที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดคุณสมบัติทางด้าน Plasticity และการดูดซึมน้ำบน Cement Modified Crush Rock ซึ่งมักจะใช้เป็นพื้นทางของ Flexible และ Rigid Pavement ในหลายประเทศเช่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เป็นต้น ทั้งหมดนี้ได้ถูกจัดให้อยู่ใน Cement Modified Soil ไม่ว่าจะเป็ Clay Soil หรือ Granular Soil จะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ค่อนข้างต่ำ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เข้าไปนี้ไม่มีผลทำให้คุณสมบัติดินเดิมโดยทั่วไปจะเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้น Cement Modified Granular Soil จึงไม่กำหนดการรับแรงอัดของดินไว้เป็นที่แน่นอน แต่พิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปอันเป็นผลจากการผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณต่ำเป็นเกณฑ์ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป Cement Modified Granular Soil จะทำให้ดินมีค่ากำลังแบกทานเพิ่มขึ้น (CBR) ทำให้พื้นทางมีค่า Stiffness เพิ่มขึ้นมาก อันจะทำให้การแอ่นตัวแอ่นตัวของชั้นทาง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกค่าต่ำกว่า Granular Soil ที่ไม่ได้ Modified ด้วยปูนซีเมนต์มาก

3.3 Soil-Cement คือดินที่ผสมปูนซีเมนต์ ที่ได้รับการออกแบบส่วนผสมให้มีการรับแรงอัดหรือมีความแข็งแรงทนทานตามมาตรฐานอาทิเช่น Portland Cement Association (PCA), ASSHTO และ ASTM ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมลงในดินต้องสูงพอจนทำให้กำลังรับแรงอัด หรือแบกทานตามที่กำหนด ปริมาณปูนซีเมนต์สูงถึงร้อยละ 5-7 สำหรับดินที่ขนาดคละกัันดี และสูงกว่า

นั่นถ้าดินมีขนาดละเอียดหรือดินมี Plasticity Index (PI) สูงในกรณีดินเดิมมีค่า PI สูงการทำ Soil-Cement อาจจะต้องผสมปูนขาวลงไปเพื่อลดค่า PI ของดินเดิมลง

3.4 Plastic Soil Cement เป็นดินผสมปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณน้ำมากพอ ที่จะทำให้ส่วนผสมมีสภาพเหลวพอที่จะนำไปใช้งานอัดปูลงบนพื้นที่มีความลาดเอียง เช่น การอัดท่อคลองชลประทาน การอัดผิวหน้าคันทาง Plastic Soil Cement จะต้อง Workability สูงพอที่นำมาใช้งานต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.5 Cement Treated Soil Slurry เป็นปูนซีเมนต์ที่ผสมและวัสดุประเภททราย และน้ำ โดยมีปริมาณของน้ำที่สูงมาก อาจจะมีส่วนผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของส่วนผสมให้มี Workability สูง วัสดุประเภทนี้โดยทั่วไปใช้เป็น Grouting Material ในงานซ่อมแซมถนน

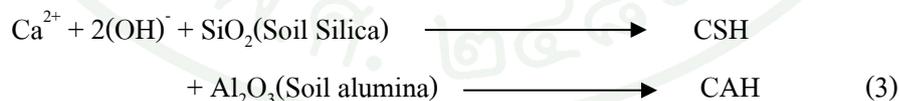
4. กลไกของการปรับปรุงคุณสมบัติของดินผสมปูนซีเมนต์

กลไก (Mechanism) ที่เกิดขึ้นภายหลังการใช้น้ำปูนซีเมนต์ผสมและดินจะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ถูกศึกษา และบันทึกโดยนักวิจัย

Davidson (1961) ได้บันทึกไว้ว่า คุณสมบัติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายหลังการผสมดินปูนซีเมนต์และดินเหนียวขึ้น จะทำให้ค่า Plasticity ลดลง โดยเหตุผลที่นำมาจากการแยกตัวของ Calciumion ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กลไก (Mechanism) ที่เกิดขึ้นถ้าไม่มาจากการ Cation Exchange หรือไม่ก็มาจากการจับกลุ่มเพิ่มขึ้นของ Cation ในดินเหนียว จากกระบวนการทั้งสองทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า ที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณอนุภาคดินเหนียว ประจุไฟฟ้าจะมีการดึงดูดเข้าหากัน เป็นเหตุให้อนุภาคดินเหนียวมีการรวมตัวกันและตกตะกอนเป็นวัสดุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และขนาดอนุภาคดินเหนียวขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ดินเหนียวมีคุณภาพสมบัติคล้ายดินตะกอนที่มีค่า Plasticity ต่ำหรือมีค่าการยึดเหนี่ยวต่ำ การเชื่อมประสานในการบดทับ Cement Treated Soil ปฏิกิริยาไฮเดรชันของส่วนประกอบของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นในเวลาที่แตกต่างกัน โดยผลของปฏิกิริยาทำให้เม็ดดินเกิดการยึดเกาะกันเป็นก้อน การยึดเกาะที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากการพัฒนาของแรงยึดเกาะทางเคมีที่มีอยู่ในธรรมชาติของดิน หรือการยึดเกาะระหว่างผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน

Lambe *et al.* (1959) ได้ศึกษา Improvement of Soil Cement With Alkali Metal Compound และอธิบายผลไว้ว่าปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากผลึกของ Tricalcium Silicate (C_3S), Dicalcium Silicate (C_2S), Tricalcium Aluminate (C_3A), Tetracalcium Aluminate Ferrite (C_4AF) เมื่อปูนซีเมนต์ผสมเข้าและดินและน้ำ ในการทำดินปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ได้สารประกอบ Calcium Silicate Hydrate, Calcium Aluminate Hydrate และ Hydrated Lime ที่แยกตัวออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสารประกอบสองตัวแรกมีคุณสมบัติเชื่อมประสานที่ได้จากปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ และนอกจากนี้ Hydrated Lime ได้เข้าทำปฏิกิริยา Silica และ Alumina ที่ได้จากรีดดินเหนียว ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเชื่อมต่อประสานเพิ่มเติมปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาปูนซีเมนต์และน้ำในดินปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ pH ซึ่งเชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของ pH เนื่องจากการแตกตัวของ $Ca(OH)_2$ หรือ Hydrated Lime การเพิ่มขึ้นของ pH จะทำให้เกิดการแตกตัวของแร่ประกอบ Silica และ Alumina จากดินเหนียวเข้าทำปฏิกิริยา Calcium ions ก่อให้เกิดวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น

Moh (1965) ได้ศึกษาเรื่อง ปฏิกิริยาของแร่ประกอบดินเหนียว (Clay Minerals) และปูนซีเมนต์และสารเคมีผสมเพิ่มจำพวกโซเดียม วัตถุประสงค์ของการศึกษาจะมุ่งเน้นศึกษาเพื่อหาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและการใช้ปูนซีเมนต์หรือปูนขาวเป็นวัสดุส่วนผสม และรวมถึงผลกระทบของสารจำพวกโซเดียมด้วย ซึ่งในการศึกษาคั้งนี้จะมุ่งศึกษาเฉพาะดินและปูนซีเมนต์เท่านั้น สำหรับดินปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยา ที่เกิดขึ้นดังสมการที่ (1), (2) และ (3)



การพัฒนากำลังเกิดจากการที่ปูนซีเมนต์ผสมและน้ำแล้วเกิดปฏิกิริยาปูนซีเมนต์ไฮเดรชัน ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบ CSH, CAH และ Calcium Hydroxide ($Ca(OH)_2$) ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไป โดยผลของการทำปฏิกิริยาระหว่าง $Ca(OH)_2$ ที่แตกตัวออกเป็น Ca^{2+} และแร่ดินเหนียว จะได้ CSH และ CAH สารประกอบเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสาน และทำให้เกิดการ

รวมกัน ของอนุภาคของดินเป็นผลให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีกำลังสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจาก สมการ (1), (2) และ (3) เรียกว่า Primary Reaction และ Secondary Reaction ตามลำดับ

Terrel *et al.* (1979) ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาของดินปูนซีเมนต์ การผสมปูนซีเมนต์และเม็ดดิน หยาบ (Coarse Grained Soil) ปูนซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) จะทำหน้าที่ยึดอนุภาคของดินเข้าด้วยกัน โดยทำการยึดเกาะที่ผิวระหว่าง

ปูนซีเมนต์เจล (Cement Gel) และผิวอนุภาค ส่วนดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soil) โดยเฉพาะที่มีส่วนของดินเหนียวผสมอยู่ด้วยจะมีส่วนช่วยทำปฏิกิริยา คือ แร่ดินเหนียวที่สลายออกมาในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH สูง และจะทำปฏิกิริยาและ Free Lime หรือ Hydrated Lime ที่ได้จากปูนซีเมนต์ โดยจะก่อเป็นภาพของ Calcium Silicate Hydrated (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrated (CAH)

5. โครงสร้างของดินปูนซีเมนต์

5.1 คุณสมบัติด้านวิศวกรรมสำหรับวัสดุงานทางที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

คุณสมบัติทางด้านกายภาพที่มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยปูนซีเมนต์ คือ ส่วนคละของดิน พื้นที่ผิวของวัสดุ และปริมาณของจุดสัมผัส วัสดุประเภทที่มีการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินดี (Well-Graded) โดยทั่วไปแล้วจะมีความต้องการปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าวัสดุดินประเภทที่มีการกระจายตัวขนาดเดียว (Uniform-Graded) ความต้องการปูนซีเมนต์ของวัสดุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงและพื้นที่ผิวของวัสดุและปริมาณของจุดสัมผัส หมายความว่า ปริมาณความต้องการปูนซีเมนต์ในดินเม็ดละเอียดจะมีปริมาณสูงกว่าดินเม็ดหยาบ

ในการศึกษานี้จะทำการรวบรวมข้อมูลทางวิศวกรรมด้านกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วยปูนซีเมนต์ จากการศึกษาบทความทางวิชาการต่างๆ พบว่า คุณสมบัติของวัสดุงานทางก่อนที่จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติ มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม อาทิเช่น ปริมาณมวลรวมละเอียด, ปริมาณมวลรวมหยาบ, ค่าความแข็งแรงของวัสดุ,

ค่าขีดจำกัด (Atterberg's Limits) ค่าการแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR) และความหนาแน่น (Density) โดยคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่กล่าวมาข้างต้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน

5.2 แนวความคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของดินปูนซีเมนต์เกี่ยวกับและการเปลี่ยนแปลง

แนวความคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของดินปูนซีเมนต์เกี่ยวกับและการเปลี่ยนแปลงในส่วนประกอบและโครงสร้างของดินปูนซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งแบ่งให้เห็นเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- 1) ภายใต้การบดทับ ขั้นตอนนี้เป็นช่วงที่ปูนซีเมนต์ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและน้ำและจะเข้าไปผสมและอนุภาคของดินตามภาพที่ 1 (ก)
- 2) ภายใต้การบ่มระยะสั้น อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเริ่มมีปฏิกิริยาทางเคมีและน้ำขึ้นทำให้เกิดเป็นวุ้นปูนซีเมนต์ แทรกซึมตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และ (Released Lime) เริ่มทำปฏิกิริยาและดินที่มี (Active Soil Silica) และ (Active Soil alumina) ที่ละลายปนอยู่ในน้ำจะเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของ (Soil Silica) และ (Soil Alumina) ในดิน และผลของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะแผ่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังแสดงในภาพที่ 1 (ข)
- 3) ภายใต้การบ่มระยะยาว อนุภาคของปูนซีเมนต์จะเกิดกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมี และน้ำอย่างสมบูรณ์อันมีผลทำให้ปริมาณวุ้นปูนซีเมนต์ และขอบเขตการแทรกซึมของวุ้นปูนซีเมนต์แผ่กระจายไปทั่วทั้งก้อนของดินปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 1 (ค)

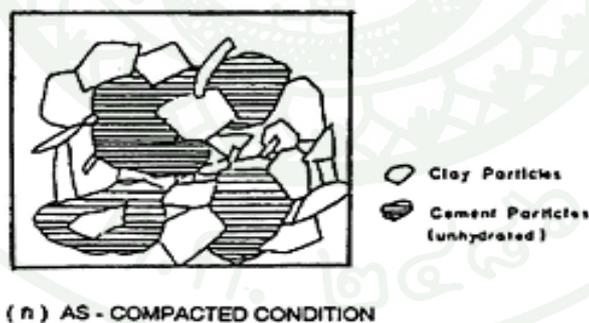
ทั้ง 3 ขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าขั้นตอน 1 ในภาพที่ 4 (ก) อาจจะไม่เป็นจริงตามธรรมชาติเพราะดินในธรรมชาติมักจะมีน้ำชื้นอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นขั้นตอนที่ 1 และ 2 จะเกิดพร้อมกันไปเพราะว่าปูนซีเมนต์เมื่อผสมและความชื้นในดินหรืออากาศจะทำปฏิกิริยาทางเคมีและน้ำอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งกลบเลื่อนปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1

หลังจากปูนซีเมนต์ผสมและน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นผลให้เกิด (Calcium Silicate hydrated) ในภาพของวุ้นขึ้นในส่วนผสมของปูนซีเมนต์และน้ำ ดังนั้น จึงสามารถที่จะเข้าใจได้ว่าภายใต้สภาวะของการบดทับอนุภาคปูนซีเมนต์มีได้ผสมและดินแต่เพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีและน้ำ ตามข้อ 1 - 3 ด้วย

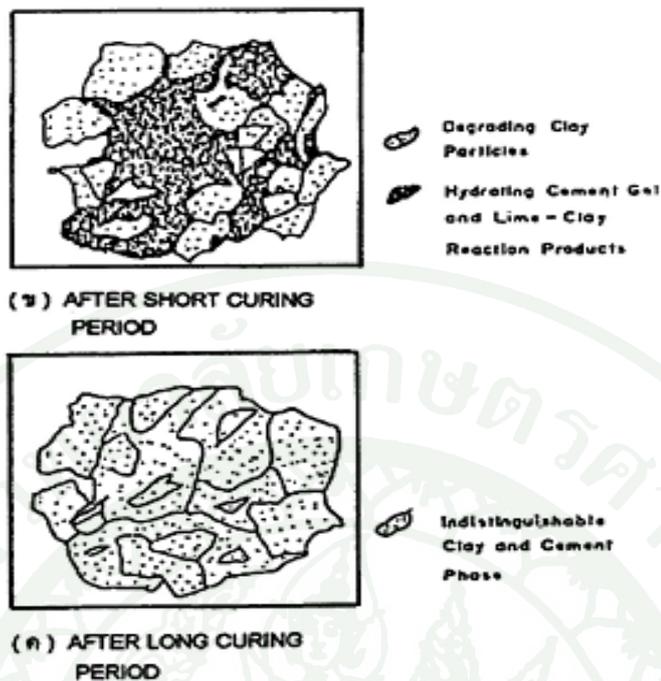
Mitchell (1982) ได้อธิบายเกี่ยวและ โครงสร้างของดินปูนซีเมนต์โดยแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบและ โครงสร้างของดินปูนซีเมนต์ ดังภาพที่ 1

ภายใต้การบดทับดิน อนุภาคของปูนซีเมนต์ จะทำปฏิกิริยาปูนซีเมนต์ไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้เกิดปูนซีเมนต์เจลแทรกเข้าไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และปล่อย Lime ออกมา โดยจะทำปฏิกิริยาและ Soil Silica และ Soil Alumina ที่มีอยู่ดินทำให้เกิดการแยกตัวของ Soil Silica และ Soil Alumina ในดิน หลังจากนั้นปูนซีเมนต์เจลและสารที่ได้จากปฏิกิริยาจะแพร่กระจายไปตามอนุภาคของดินดังแสดงในภาพที่ 1(ข)

ภายใต้การบ่มในระยะยาวจะเกิดปฏิกิริยาปูนซีเมนต์ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ทำให้ปูนซีเมนต์เจลแทรกซึมกระจายไปทั่วก้อนของดินปูนซีเมนต์ เป็นผลให้กำลังของดินปูนซีเมนต์สูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1(ค)



ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของดินปูนซีเมนต์ (ข้อมูลจาก Mitchell และ Jack)



ภาพที่ 1 (ต่อ)

ที่มา: Mitchell and Jack (1982)

6. ลักษณะโครงสร้างและมาตรฐานข้อกำหนดสำหรับวัสดุ ของงานผิวทางแบบยึดหยุ่น

6.1 ผิวทาง (Surface Course) ผิวบนสุดของชั้นทางที่รับน้ำหนักจากล้อยานพาหนะ โดยมีพื้นที่ของแรงกระทำเท่าและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อของยานพาหนะและ ผิวทาง วัสดุที่ใช้ทำผิวทางจะต้องมีคุณสมบัติ แข็งแรง ทนทาน สามารถรับแรงต่าง ๆ ได้มากกว่า แรงที่กระทำต่อชั้นทาง วัสดุที่ใช้ทำ ได้แก่ หิน ซึ่งนำมาบดทับ โดยมี ยางแอสฟัลต์ เป็นตัวเชื่อมยึดระหว่างเม็ดหิน และป้องกันการซึมของน้ำลงสู่ใต้ผิวทาง เพื่อมิให้เกิดความเสียหาย ต่อโครงสร้างทางได้

6.2 พื้นทาง (Base Course) เป็นชั้นที่รับน้ำหนักจากผิวทาง แล้วถ่ายลงสู่ชั้น รองพื้นทางการใช้วัสดุสำหรับใช้เป็นชั้นพื้นทาง ต้องมีความแข็งแรง ทนทาน ได้แก่วัสดุ ประเภท หินคลุก กรวด หรือ วัสดุ ประเภท Stabilized Soil เช่น Soil Cement

6.3 รองพื้นทาง (Subbase Course) เป็นชั้นที่รับน้ำหนักจากชั้นพื้นทาง แล้วถ่ายลงสู่ชั้นวัสดุคัดเลือก วัสดุที่ใช้มีคุณภาพต่ำกว่า วัสดุชั้นพื้นทาง เช่น ดินลูกรัง หรือ Granular Soil

6.4 วัสดุคัดเลือก (Selected Material) เป็นวัสดุที่รับน้ำหนักที่ถ่ายจากรองพื้นทางในกรณีที่มีน้ำท่วมสูงจะช่วยยกระดับถนนให้สูงพ้นจากระดับน้ำท่วมสูงสุด เพื่อลด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินคันทางให้น้อยลง วัสดุที่นำมาใช้สำหรับงานชั้นวัสดุคัดเลือก ควรเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีกว่าดินคันทาง ราคาถูก

6.5 ดินฐานราก (Subgrade) เป็นชั้นที่รับน้ำหนักที่ถ่ายจาก ชั้นวัสดุคัดเลือก เป็นชั้น ดินที่มีต้นไม้ ต้นหญ้า และพืชต่าง ๆ ในการก่อสร้างต้อง เปิดหน้าดิน และ ไถหน้าดินออกเพื่อเอารากไม้ เศษวัสดุ ออก แล้วบดทับตาม ข้อกำหนด ก่อนก่อสร้าง ชั้นเหนือดินฐานรากขึ้นไป

7. วัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในการทำหน้าทีรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างทาง ซึ่งมวลรวมเป็นวัสดุเหนียวและมีความแข็ง ใช้สำหรับผสมมีลักษณะก้อนเล็กๆ เช่น หินคลุก กรวดทราย กากถลุง และหินฝุ่น เป็นต้น

7.1 หินคลุก (Crushed Rock) เป็นวัสดุหินไม่มวลรวมมีเนื้อแข็ง เหนียว สะอาด ไม่ผุ ปราศจากวัสดุอื่นเจือปน มีขนาดคละกัณฑ์ เมื่อทดสอบตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรง (Gradation) ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่งตรงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดคละของวัสดุรองพื้นทาง

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)		ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล				
		A	B	C	D	E
50.0	(2")	100	100	-	-	-
25.0	(1")	-	-	100	100	100
9.50	(3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100	-
2.00	(เบอร์ 10)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425	(เบอร์ 40)	8-20	15-30	15-35	25-45	20-50
0.075	(เบอร์ 200)	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

ที่มา: กรมทางหลวง (2532), มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมปูนซีเมนต์ ทล.-ม. 203/2532

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

7.2.1 ต้องเป็นหินฝุ่นหรือทราย สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ตะกอน หรืออินทรีย์วัตถุผสมปะปนอยู่ และจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาและวัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ

7.2.2 ค่า Sand Equivalent เมื่อทำการทดสอบตามวิธีของ AASHTO T 176 มากกว่าร้อยละ 50 โดยปกติถ้าไม่จำเป็นไม่ควรใช้ทราย ถ้าจะใช้ควรก็ต่อเมื่อมีความจำเป็น เช่น ต้องการปรับปรุงขนาดคละของมวลรวม และเพิ่มปริมาณ เป็นต้น

8. California Bearing Ratio (CBR)

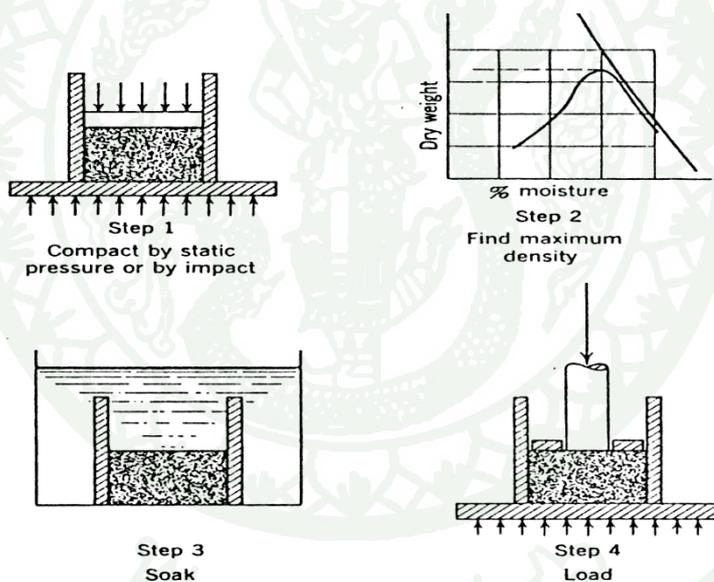
ในงานทางวัสดุที่ใช้ก่อสร้างคันดิน หรือทำ โครงสร้างทาง นอกจากจะต้องปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดทับให้แน่น เช่น บดทับ ณ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม แล้ว ยังต้องคำนึงถึงกำลังต้านทาน แรง หรือน้ำหนักกด และเสถียรภาพของดิน กล่าวคือ หากดินยุบตัวมาก แต่กำลัง

ต้านทานน้อย อนุমানได้ว่า บดทับ ไม่แน่น นอกจากนั้น จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของดิน เมื่อปริมาณความชื้นสูงมาก คืออิ่มตัว (Saturated) ซึ่งในทางธรรมชาติอาจเกิดขึ้นได้ เช่น โครงสร้างทาง หรือผิวทางในภาวะที่ถูกน้ำท่วมซึ่งการทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) คล้ายคลึงและการทดสอบความแน่นของการบดทับดินในห้องปฏิบัติการ (ทั้งวิธี Standard หรือ Modified Proctor) ทั้งนี้เพราะกระบวนการเตรียมตัวอย่าง อุปกรณ์ทดสอบ และวิธีทดสอบ คล้ายคลึงกัน และกระบวนการทดสอบ CBR ก็จะต้องทดสอบหาความหนาแน่นของดินด้วยเสมอ เพียงแต่มีรายละเอียดการทดสอบเพิ่มเติม เช่น ทดสอบการบวมตัว (Swell) ของตัวอย่าง ภายใต้สภาวะที่ถูกแช่น้ำ (Soaking) ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะของดินที่บดทับในสนาม เช่น โครงสร้างชั้นทางต่าง ๆ ซึ่งอาจถูกน้ำไหลบ่า หรือท่วมขัง เป็นเวลานานพอที่ทำให้ดินบวมตัว เสียรูป (Deform) หรือเสียเสถียรภาพในที่สุด ดังนั้น ในทางปฏิบัติ อาจแก้ไขด้วยการพยายามออกแบบให้ ผิวทาง หรือ โครงสร้างทางชั้นสำคัญ มีระยะปลอดพื้นน้ำ (Freeboard) อย่างเพียงพอ หรือออกแบบระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน (Sub drain) เช่น มีชั้นทรายรองพื้น (Sand cushion) ใต้ผิวทางคอนกรีต ระบบระบายน้ำใต้ดินชนิดมีท่อกรู (Perforated pipe) ตัวกรอง หรือวัสดุคัดเลือกลมลก่อนข้างหยาบ ที่มีช่องว่างระหว่างมวล (Void) ก่อนข้างสูงนอกจากนั้น การทดสอบยังมีวัตถุประสงค์จะคำนวณ ค่า CBR ซึ่งเป็นค่าเปรียบเทียบ (ร้อยละ) ระหว่าง กำลังรับแรงต้านทาน (อาจเรียกว่า แรงธาร หรือ แรงแบกทาน - Bearing capacity) ของดิน ภายใต้น้ำหนักกด เปรียบเทียบและกำลังมาตรฐาน ณ ค่าระยะยุบตัว (Penetration) ที่เท่ากันงานทาง และการออกแบบผิวทางโดยมาตรฐาน หรือวิธีต่าง ๆ เช่น Road Note 29 (TRRL) Design of Concrete

การทดสอบ California Bearing Ratio หรือเรียกสั้น ๆ ว่า การทดสอบ C.B.R เป็นการทดสอบเพื่อหาลำกำลังรับน้ำหนักของดินที่บดอัดแล้ว สำหรับชั้นคันทาง (Sub grade) ชั้นรองพื้นทาง (Sub base) และชั้นพื้นทาง (Base) โดยในแบบก่อสร้างทั่วไปจะกำหนดความหนาแน่นของชั้นดินที่จะบดอัดในแต่ละชั้นเป็น % C.B.R. โดยถ้า % C.B.R. ที่ถูกกำหนดมีค่ามากเท่าใดก็แสดงว่าชั้นดินนั้นต้องบดอัดให้แน่นมากขึ้นตามไปด้วยการทดสอบ C.B.R. เป็นการหาค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินหรือหินคลุกที่บดอัดแล้ว โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของหน่วยแรงต้านทานของตัวอย่างดินทดสอบที่บดอัด (Test Unit Load) ต่อหน่วยน้ำหนักมาตรฐานของหินคลุกบดอัด (Standard Unit Load) ในระดับความลึกหรือระยะจมของแท่งกด (Penetration Piston) ที่เท่ากันแล้วเปรียบเทียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ (4)

$$CBR (\%) = \frac{\text{Penetration Stress(Psi) Required} \times 100}{\text{Penetration 0.1 inch}} \quad (4)$$

โดยทั่วไปค่า CBR จะเป็นอัตราส่วนที่จม 0.1 นิ้ว แต่ถ้าอัตราส่วนของความเค้นที่ 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วที่ทำให้แท่งกดกลมตัน (Piston) จม 0.2 นิ้วสูงกว่าสำหรับการจม 0.1 นิ้ว ควรจะทำการทดสอบซ้ำแต่ถ้ายังคงเหมือนเดิมให้ใช้ค่า CBR ที่การจม 0.2 นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM D1883-99 ค่า CBR ได้จากค่าความชื้นพอเหมาะ (Optimum moisture Content) และค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งสูงสุด (maximum dry unit weight) ทำโดยการเตรียมตัวอย่าง 3 ตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นพอเหมาะต่างกัน $\pm 0.5\%$ และใช้พลังงานบดทับ (Compactive Effort) ต่างกันค่า CBR ที่หน่วยน้ำหนักแห้งที่ออกแบบหาได้จากกราฟที่พล็อตระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและค่า CBR (Yoder and Witczak, 1975) ขั้นตอนการทดสอบแสดงใน ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบ CBR (Step 1) ทำการบดทับดินที่ OMC (Step 2) หาค่า γ_d สูงสุด (Step 3) ไปแช่น้ำ 4 วัน (Step 4) ออกแรงกดด้วยท่อนเหล็กมาตรฐาน

ที่มา: จิรพัฒน์ (2529)

9. มาตรฐานรองพื้นทางดินปูนซีเมนต์ (Soil Cement Subbase)

งานชนิดนี้จะประกอบด้วยการก่อสร้างรองพื้นทางที่ใช้ดินผสมปูนซีเมนต์และน้ำ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้น ไปบนชั้นวัสดุคัดเลือกหรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการปูหรือเกลี่ยแต่ง และบดทับให้ถูกต้องตามแนว ระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนภาพตัด ตามที่แสดงไว้ในแบบ

ดินที่ใช้ผสมและปูนซีเมนต์นี้ต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ได้ระบุไว้ในแบบ หรือในรายละเอียดต่อท้ายสัญญา ต้องเป็นวัสดุที่ปราศจากหน้าดิน วัชพืช หรืออินทรีย์วัตถุอื่น ๆ และไม่มีสารอื่นที่อาจเป็นอันตรายต่อคุณภาพของดินปูนซีเมนต์

9.1 มาตรฐานทางหลวงสำหรับดินผสมปูนซีเมนต์

- Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท.102/2515 “วิธีการ ทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน. ไม่เกินร้อยละ 40
- ค่า Plasticity Index เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 103/2515 “วิธีการทดลองหาค่า Plastic Limit และ Plasticity Index” ไม่เกินร้อยละ 20
- ทล.-ท.108/2517 “การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดทับ ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด
- ทล.-ท.109/2517 “การทดลองหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80

9.2 ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Course) เป็นชั้นที่รับน้ำหนักจากชั้นพื้นทาง แล้วถ่ายลงสู่ชั้น วัสดุคัดเลือก วัสดุที่ใช้มีคุณภาพต่ำกว่า วัสดุชั้นพื้นทาง เช่น หินผุ แห่่งที่ 2 หรือ Granular Soil

9.3 มาตรฐานทางหลวงสำหรับวัสดุงานพื้นทาง หินคลุก

- ทล.-ท.102/2515 “การทดสอบหาค่า Liquid Limit (L.L) ของดิน” ไม่เกินร้อยละ 25
- ทล.-ท.103/2515 “การทดสอบหาค่า Plastic Limit และ Plastic Index” ไม่เกิน ร้อยละ 11
- ทล.-ท.108/2517 “การทดสอบ Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน” ที่ความหนาแน่นแห้งของการบดทับ ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุด
- ทล.-ท.109/2517 “การทดสอบหาค่า CBR” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25
- ทล.-ท.206/2517 “การทดสอบหาค่า Durability ของวัสดุ” ไม่น้อยกว่าร้อยละ 35 สำหรับกรณีวัสดุ จำพวก Shale

10. มาตรฐานพื้นทางดินปูนซีเมนต์ (Soil Cement Base)

งานชนิดนี้จะประกอบด้วยการก่อสร้างพื้นทางที่ใช้ดินผสมปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์ และน้ำโดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการปูหรือเกลี่ยแต่ง และบดทับให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนภาพตัด ตามที่แสดงไว้ในแบบดินที่ใช้ผสมและปูนซีเมนต์นี้ ต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ได้ระบุไว้ในแบบ หรือในรายละเอียดต่อท้ายสัญญา ต้องเป็นวัสดุที่ปราศจากน้ำดิน วัชพืช หรืออินทรีย์วัตถุอื่น ๆ และไม่มีสารอื่นที่อาจเป็นอันตรายต่อคุณภาพของดินปูนซีเมนต์เจือปนอยู่ ห้ามใช้วัสดุจำพวก Shale มาตรฐานทางหลวงสำหรับดินผสมปูนซีเมนต์

- มีขนาดละเอียดดี และเมื่อทำการทดสอบที่ ทล.- ท. 205/2517 “วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง” มีขนาดโตสุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร มีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ไม่เกินร้อยละ 70 และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 25

- Liquid Limit เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.- ท.102/2515 “ วิธีการ ทดลองหาค่า Liquid Limit (LL) ของดิน.ไม่เกินร้อยละ 15

- มีค่าความสึกกร่อน เมื่อทำการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2515 “ วิธีการทดลองหาค่าความสึกหรือของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion” ไม่เกินร้อยละ 60

11. การทดสอบและควบคุมคุณภาพของวัสดุในงานทาง

11.1 การทดสอบเพื่อหาขนาดและการเรียงตัวของเม็ดวัสดุ (Gradation Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาขนาดคละ สัดส่วนที่คละกัน ของวัสดุ วิธีการที่นิยมใช้ คือการ Sieve Analysis โดยใช้ขนาดของตะแกรงตามมาตรฐานที่ กรมทางหลวงกำหนด โดยการร่อนผ่านตะแกรง นำวัสดุที่ค้างแต่ละตะแกรงไปชั่งนำมา เขียนกราฟ ระหว่างขนาด และ เปอร์เซ็นต์ผ่าน จะเห็นลักษณะการเรียงตัวของวัสดุ จากผลการทดสอบที่ได้ จะเป็นตัวบ่งชี้ถึง ความแข็งแรง ของวัสดุในการรับแรง ลักษณะของวัสดุที่มีขนาดเม็ด การเรียงตัวของเม็ดใหญ่และเล็กที่มีสัดส่วนที่พอดี (Well grade) เมื่อคดทับแน่น จะมีความแน่นที่ดี กว่า วัสดุที่มีขนาด ใกล้เคียงกัน (Uniform Grade) และ ขนาดที่ห่างกันมาก (Gap grade)



ภาพที่ 3 เครื่องทดสอบหาขนาดคละของวัสดุ

11.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีความชื้น เป็นการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ เมื่อมีปริมาณความชื้นในระดับต่าง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อ ความแข็งแรง กำลังต้านทานรับแรงเนื่อง การเปลี่ยนภาพร่าง ความหนืด เหนียว และการแตกร้าว เมื่อเปลี่ยนความชื้น วิธีการทดสอบ ดังกล่าวคือวิธี ATTERBERG'S LIMITS

- Liquid Limit (LL) การทดสอบ โดยนำดินที่ผ่านตะแกรง #40 ผสมและน้ำใส่ลงในกระตาะทองเหลือง ใช้ที่ปาดขูดดินให้เป็นร่อง ค่า LL. คือปริมาณความชื้นใน ดินที่ทำให้ร่องที่ถูกปาดไหลมาชนกันยาวครึ่งนิ้ว เมื่อปล่อยให้ระยะตกกระทบและฐาน ซึ่งมีระยะตกกระทบสูง 1 ซม. จำนวน 25 ครั้ง

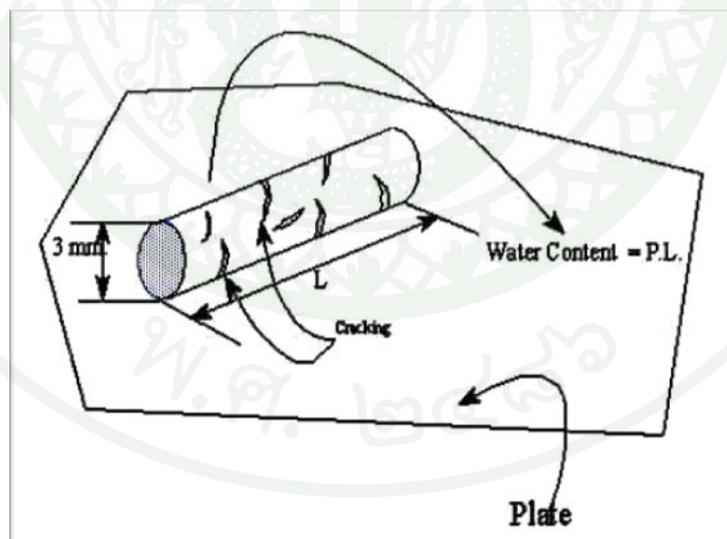
- Plastic Limit (PL) การทดสอบโดย นำดินที่ผ่านตะแกรง # 40 ผสมและน้ำแล้วปั้นเป็นท่อนยาวรีกลึงและพื้น โดยใช้แรงกดพอเหมาะ ให้ท่อนดินเล็กลง จนมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มม. ถ้าดินยังไม่แตกทำซ้ำ จนตัวอย่างแตก หรือขาดความชื้นในดินขณะนั้นคือ Plastic Limit

- Plastic Index (PI) เป็นช่วงความชื้นของน้ำในดิน ที่ดินจะแสดงความเหนียว (Plastic) ได้จากค่า ระหว่าง Liquid Limit และ Plastic Limit ค่า PI จะเป็นตัวแสดงว่า ดินส่วนละเอียด มีคุณสมบัติของแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างเม็ดมากน้อยเพียงใด ดินที่มีค่า PI ต่ำเมื่อมีความชื้นมากกว่า PL จะเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวหมดแรงยึดเกาะ เช่น พวก Silt ดินที่มีค่า PI สูง จะต้องการปริมาณความชื้นสูงกว่า PL มากเพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวจึงอุ้มน้ำได้มาก มีเม็ดละเอียดมาก



ภาพที่ 4 การหา Liquid Limit

ที่มา: www.cst.co.th/images/column_1216990285/ATTERBERG%2520LIMIT

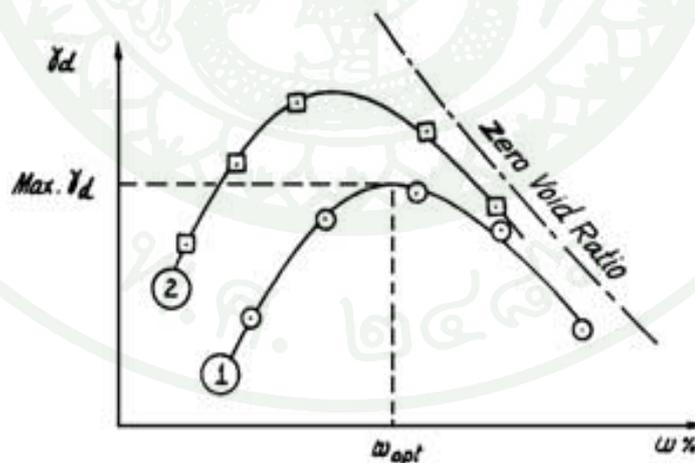


ภาพที่ 5 การหา Plastic Limit

ที่มา: www.denichsoiltest.com/joomla_images/Plastic-Limit2.jpg

11.3 การทดสอบการบดทับ

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุงานทาง จะมีความหนาแน่นและรับกำลังได้เพิ่มขึ้นเมื่อได้มีการบดทับวัสดุให้มีความหนาแน่น สูงสุดได้เมื่อมีความชื้นที่เหมาะสม เรียกว่า Optimum Moisture Content (OMC) เมื่อบดทับดินที่มีปริมาณความชื้นน้อยจะได้ความหนาแน่นที่ได้จากการบดทับน้อย เนื่องจากการเบียดชิดกันของเม็ดดินไม่ดีพอ หากมีน้ำมากเกินไปน้ำจะเข้าไปเคลือบรอบๆ มวลดิน และช่วยต้านพลังงานบดทับ ทำให้ความหนาแน่นลดลง ไม่ว่าจะเพิ่มพลังงานบดทับก็ตามจากเหตุผลดังกล่าว Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น และความหนาแน่น ของดินที่ได้จากการบดทับในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า วิธีทดสอบแบบ Standard Proctor ซึ่งได้เป็นที่ยอมรับและใช้เป็นมาตรฐานในการบดทับดินในงานก่อสร้าง ถนน สนามบิน งานเขื่อน และงานอื่น ๆ ทางด้านวิศวกรรมโยธา ปัจจุบันใช้ทดสอบ ชั้นรองพื้นทาง (Subgrade) เนื่องจากปัจจุบัน ยานพาหนะที่ใช้ขนส่งได้มีการพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกได้มากขึ้น จำเป็นที่ต้องมีการเพิ่มพลังงานในการบดอัดดินให้สูงขึ้น มีความแน่นสูงขึ้น รับน้ำหนักได้มากขึ้น จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบ การบดทับดิน ที่เรียกว่า วิธีทดสอบแบบ Modified Proctor Test ปัจจุบันใช้ทดสอบวัสดุ คัดเลือก ชั้นรองพื้นทาง ชั้นไหล่ทาง และวัสดุที่มี กรวดปน ทรายปน



ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (Y_d) และเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Percent Water Content) ของ Standard Proctor (1) และ Modified Proctor (2)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบรายละเอียด Standard Proctor และ Modified Proctor

	Standard Proctor (AASHTO T 99)		Modified Proctor (AASHTO T 180)	
กระบอกลูกเหล็ก (Mold)				
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (นิ้ว)	4	6	4	6
ความสูง (นิ้ว)				
ปริมาตร (ลบ.ฟุต)	0.0333	0.075	0.0333	0.075
HAMMER				
น้ำหนัก (ปอนด์)	5.5	5.5	10	10
ช่วงตก (นิ้ว)	12	12	18	18
เส้นผ่าศูนย์กลาง (นิ้ว)	2	2	2	2
ชั้นดิน	3	3	5	5
ความหนาชั้นดิน (นิ้ว)			1	1
จำนวนการตอกต่อชั้น	25	56	25	56

11.4 Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

11.4.1 หลักการของเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

Dynamic Cone Penetrometer (DCP) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับประเมินค่า CBR ในสนามแบบ Intrusive ที่สามารถใช้ทดสอบเพื่อหาค่า CBR ของดินในสนามได้อย่างรวดเร็ว ค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบจะช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินความแข็งแรงของวัสดุที่มีในชั้นทางเดิมได้และสามารถประเมินได้ว่า จะออกแบบวัสดุชั้นทางเดิมเป็น โครงสร้างชั้นทางประเภทใด ทำให้สามารถออกแบบถนนได้อย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ ในส่วนของงานก่อสร้างการทดสอบ DCP ทำให้ผู้ควบคุมงานสามารถตรวจสอบค่า CBR ของชั้นทางในระหว่างก่อสร้างได้ทันทีและสามารถเปรียบเทียบและค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบในห้องทดลองว่า สอดคล้องกันมากน้อยเพียงใดทำให้ผู้ควบคุมงานสามารถสั่งการแก้ไขได้ทันที ทำให้ได้งานที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้ DCP ยังใช้ทดสอบ Soft Spot ตามแนวก่อสร้างถนนเพื่อหาค่า CBR ของชั้นทางที่ไม่ได้มาตรฐานเพื่อทำการแก้ไขระหว่างก่อสร้าง (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์และพรพรม

จันทร์เจริญ, 2544) เครื่องมือ DCP มีการใช้อย่างกว้างขวางทั้งใน แอฟริกาใต้ สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลียและประเทศอื่นๆ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ใช้ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย สามารถวัดค่าดัชนีความแข็งแรงในสนามได้อย่างรวดเร็วและสามารถหาค่า Subgrade Modulus ได้ (Sawangsurinya and Edil 2005) เครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) แสดงในภาพที่ 7

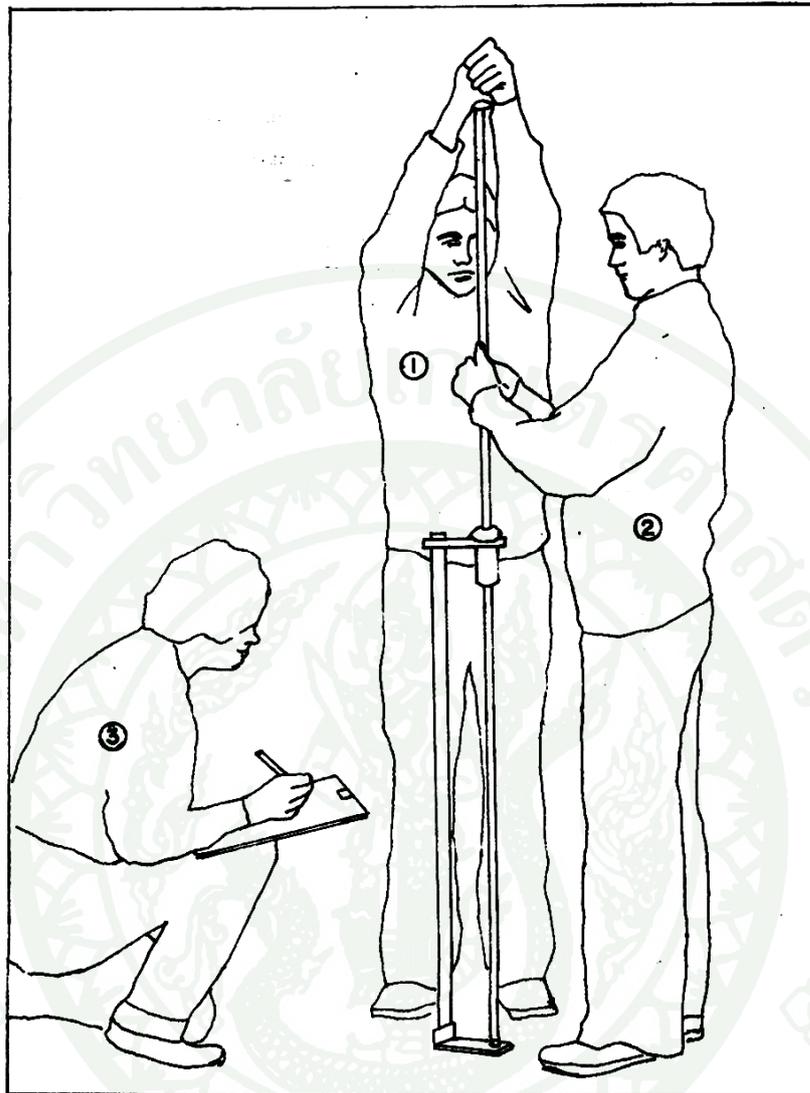


ภาพที่ 7 เครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer

ที่มา: <http://pavementinteractive.org/index.php?title=DCP>

11.4.2 การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

การทดสอบด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer (DCP) จะต้องใช้ผู้ทดสอบอย่างน้อย 3 คน ร่วมกันทดสอบโดยมีหน้าที่แต่ละคนต่างกัน คนที่หนึ่งจะเป็นผู้จับเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้ง คนที่สองทำหน้าที่ยกตุ้มน้ำหนักขนาด 8 กก. ขึ้นจนถึงระดับที่กำหนดไว้ และปล่อยให้ตุ้มตกลงอย่างอิสระเพื่อกดหัวกรวยให้จมลงไปในดินและคนที่สามทำหน้าที่จับบันทึกข้อมูลระยะที่หัวกรวยจมลงไปในดินดังภาพที่ 8



1. คนจับเครื่องมือให้ตรง 2. คนปฏิบัติงาน (ยกลูกตุ้ม และ ปล่อยลงอย่างอิสระ) 3. คนบันทึกค่า

ภาพที่ 8 การทดสอบ Dynamic Cone Penetrometer

ที่มา: อารุช (2553)

วิธีการทดสอบ เริ่มต้น โดยการเลือกจุดที่จะทดสอบและจัดวางเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้งจากนั้นทำการ ยกตุ้ม น้ำหนักขึ้นจนได้ ระยะ 575 มิลลิเมตรจากนั้นปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงมาอย่างอิสระกระแทกและเหล็กยึดแกนซึ่งจะกดปลายกรวยให้จมลงไปบนดินเล็กน้อยก่อน จากนั้นทำการทดสอบซ้ำเหมือนเดิมจนปลายกรวยจมลงไปบนดินอย่างต่อเนื่องจนได้ระยะที่ต้องการ ระหว่างทำการทดสอบให้จดบันทึกจำนวนที่ถูกตุ้มน้ำหนักตกกระทบและความลึกที่จม จำนวนการจดบันทึกไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความแน่นของดินที่ทดสอบ ภายหลังจากทดสอบแล้ว เสร็จก็ทำการถอนเครื่องมือจากดิน โดยใช้ตุ้มน้ำหนักกระแทกที่ด้ามจับหลายครั้งเพื่อให้ก้านเหล็กขยับขึ้นมาจนปลายกรวยโผล่พ้นดิน (ธีระชาติ และพรพรม, 2544)

ในการทดสอบ ประสิทธิภาพ ฎุประทุม (2536) ได้เสนอข้อควรระวังในการทดสอบดังนี้

- ควรตรวจสอบว่าสภาพผิวและที่ปลายของ Cone อยู่ในสภาพที่เรียบร้อยตามมาตรฐานและท่อนล่างคือ Rod ก็ตรงไม่โค้งงอ
- รอยต่อระหว่างท่อนล่าง (Rod & Cone) และท่อนบน (Handle) ขัน (Screw) ติดกันแน่นทุกครั้งก่อนเริ่มลงมือทดลองและถ้าระหว่างการทดลองเกิดหลวม จะทำให้อายุของเครื่องมือสั้นลง
- ต้องจับเครื่องมือให้อยู่ในแนวตั้งเสมอ โดยใช้ลูกน้ำวัด ตลอดการทดลองและถ้าระหว่างการทดลองเกิดเอียงขึ้นมาต้องพยายามแก้ไขให้อยู่ในแนวตั้ง เพราะถ้าเอียงข้อมูลที่ได้จะไม่ถูกต้อง
- ก่อนเริ่มทำการตอก ถ้าบริเวณผิวบนสุดของชั้นวัสดุมีลักษณะเปื่อยยุ่ย เช่น หลัง ฝนตกใหม่ๆ (ในดินที่มี PI สูง) หรือเป็นฝุ่น Non Plastic (NP) ให้ทำการเคาะเบาๆ ด้วยตุ้มน้ำหนักของเครื่องมือลงไปประมาณ 1-2 เซนติเมตรหรือให้ตัว Cone จมลงไปแล้วจึงเริ่มต้นอ่านค่าที่ Scale นั้นเป็นศูนย์ เป็นจุดเริ่มต้นการจม เนื่องจากผิวบนสุดที่มีสภาพดังกล่าวจะมีค่า CBR ต่ำกว่าค่าที่แท้จริง

- การยกตุ้มน้ำหนัก 8 กิโลกรัม เพื่อตอกทุกครั้งต้องยกให้แตะถึงฐานล่างของ Handle และแตะเพียงเบาๆเท่านั้นแล้วจึงปล่อยให้หล่นลงมาด้วยน้ำหนักของตัวเอง อย่ายกต่ำไป โดยไม่ถึงฐานล่างของ Handle หรือยกแรงไปจนกระทบฐานล่างของ Handle ซึ่งจะทำให้เครื่องมือ ทั้งชุดขยับขึ้นจากตำแหน่งเดิม ซึ่งจะทำให้เกิดข้อมูลผิดพลาดได้

- การอ่านระยะจมทุกครั้ง ไม้วัดควรจะอยู่ในแนวตั้งทุกครั้ง เพื่อป้องกันการ ผิดพลาดจากการอ่านแต่ละครั้ง

- ถ้าตอก 20 ครั้งแล้วไม่สามารถวัดค่าที่จมได้ ถือว่าเกินความสามารถของ เครื่องมือที่จะวัด ถ้าพื้นตอกก้าน rod อาจจะ โกงงอหรือส่วนอื่นๆของเครื่องมือจะ ชำรุดไป ด้วยการทดสอบ DCP Test จะวัดค่าความต้านทานต่อการจมของหัวตุ้มเหล็ก (Piston) เรียกว่าค่า DCP Penetration Index (DPI) มีหน่วยเป็น mm/blow ค่า DPI ตลอดความลึกของการจมสามารถหา ได้สองวิธีคือ วิธี Arithmetic average และ weighted average ดังแสดงในภาพที่ 11 ค่าDPI คำนวณ โดยวิธี Arithmetic average และ weighted average หาได้จากสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ (Sawangsurinya and Edil, 2005)

$$DPI_{ave} = \frac{\sum (DPI)}{N} \quad (5)$$

$$DPI_{ave} = \frac{\sum [(DPI)*Z]}{H} \quad (6)$$

เมื่อ N = จำนวน DPI ทั้งหมดที่บันทึกตลอดความลึกที่ทดสอบ
 Z = ความลึกที่จมต่อจำนวน Blow ที่บันทึก 1 ครั้ง
 H = ความลึกที่ทดสอบทั้งหมด

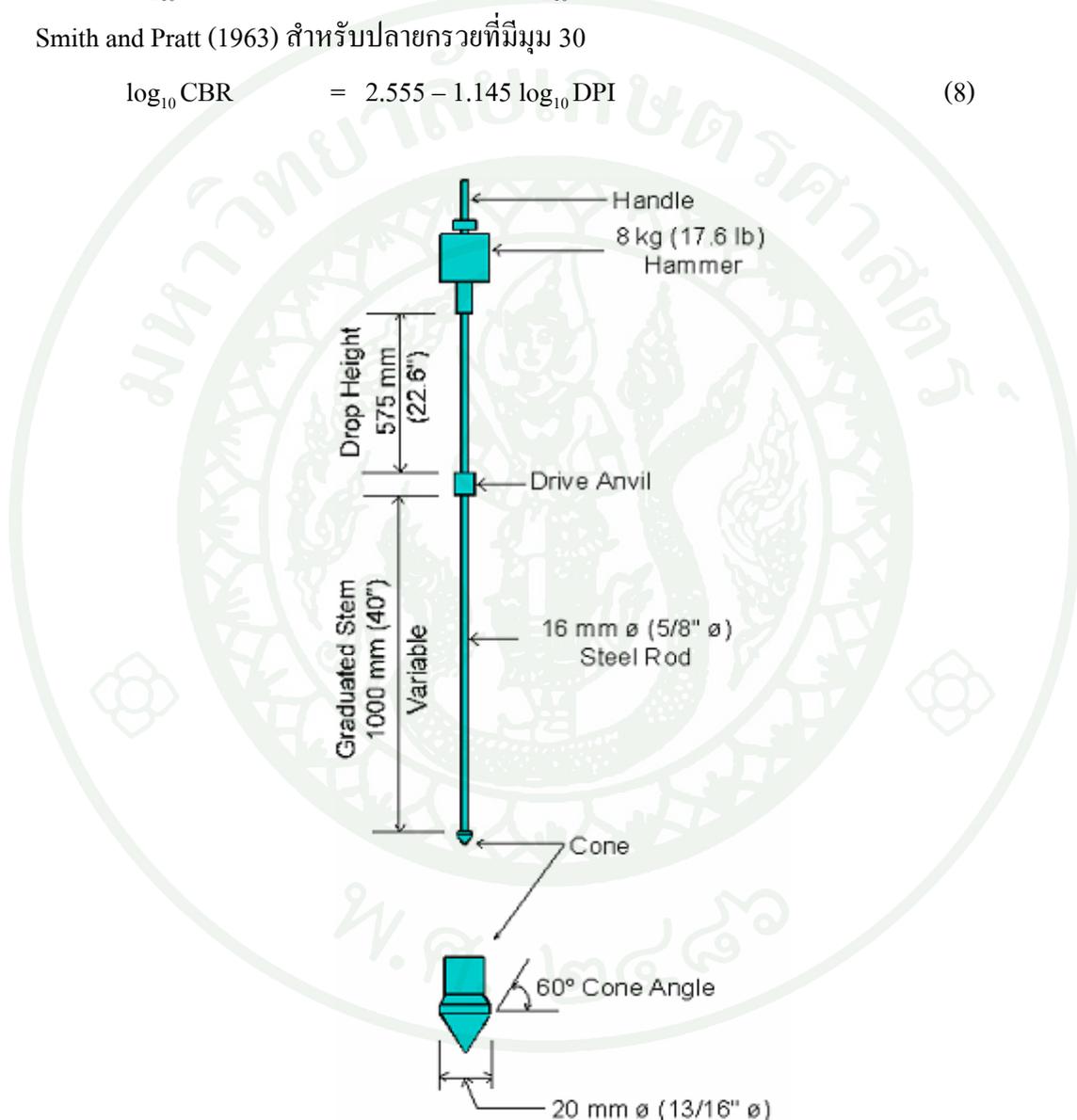
10.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dynamic Cone Penetrometer (DCP) และ Unsoaked California Bearing Ratio (Unsoaked CBR)

Hodges et al. (1975) รายงานว่าที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างค่า DCP และ Unsoaked CBR ไว้ดังแสดงในภาพที่ 10 และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้
 Van Vuuren (1969) สำหรับปลายกรวยที่มีมุม 30

$$\log_{10} \text{CBR} = 2.503 - 1.150 \log_{10} \text{DPI} \tag{7}$$

Smith and Pratt (1963) สำหรับปลายกรวยที่มีมุม 30

$$\log_{10} \text{CBR} = 2.555 - 1.145 \log_{10} \text{DPI} \tag{8}$$



ภาพที่ 9 Dynamic Cone Penetrometer (DCP) Illinois Department of Transportation

ที่มา: PTA-T4 (Eff. 04/1997, Rev. 02/2005) Bureau of Materials and Physical Research

Kleyn & Van Heeden (1982) สำหรับปลายกรวยที่มีมุม 60

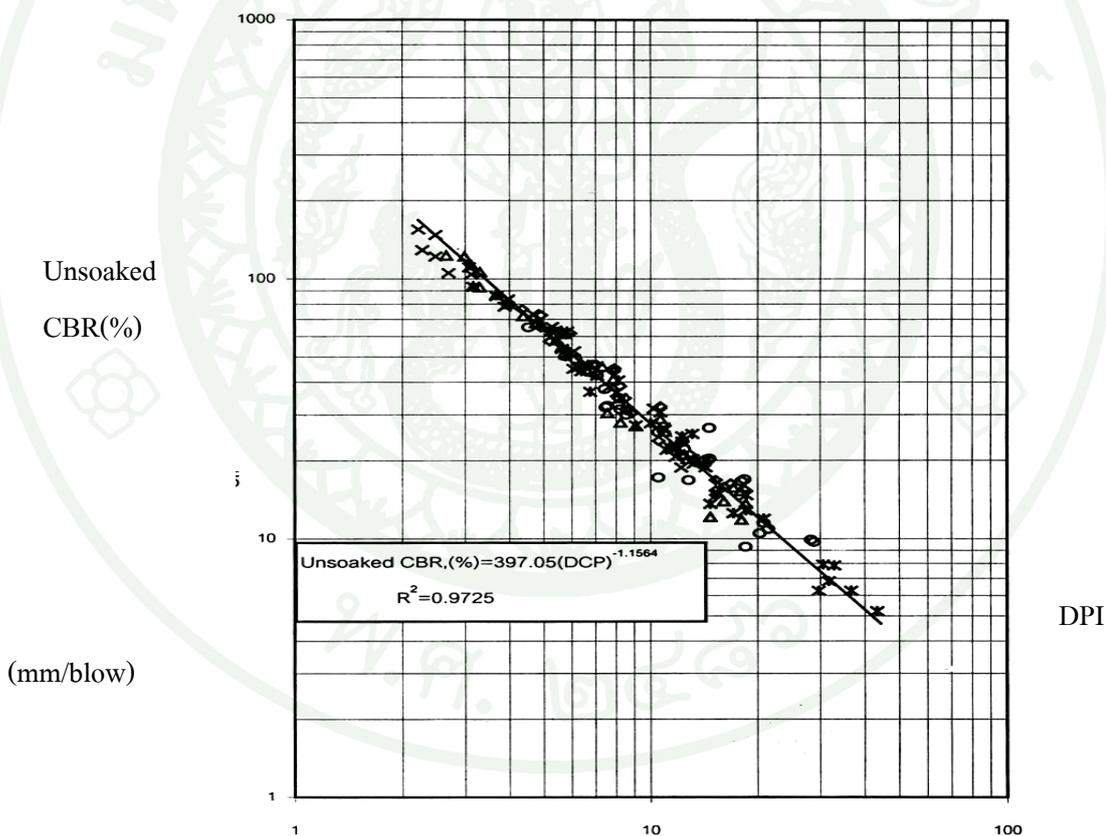
$$\log_{10} \text{CBR} = 2.632 - 1.280 \log_{10} \text{DPI} \tag{9}$$

TRRL, Overseas Road Note (1983) สำหรับปลายกรวยที่มีมุม 60

$$\log_{10} \text{CBR} = 2.480 - 1.057 \log_{10} \text{DPI} \tag{10}$$

เมื่อ DPI = ค่าการจมนีหน่วยเป็น mm/Blow

ธีระชาติ และพรพรหม (2543) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DPI และ Unsoaked CBR ของตัวอย่างหินผุ 3 แหล่ง หินปูน 1 แหล่งและ Silty Sand 1 แหล่ง ทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยเครื่องมือ DPI ที่มีปลายกรวยมีมุม 60 ซึ่งใช้งานกันกว้างขวางหลายประเทศพบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 10 เมื่อนำมาเขียนเป็นภาพเส้นตรงได้ดังสมการที่ 10



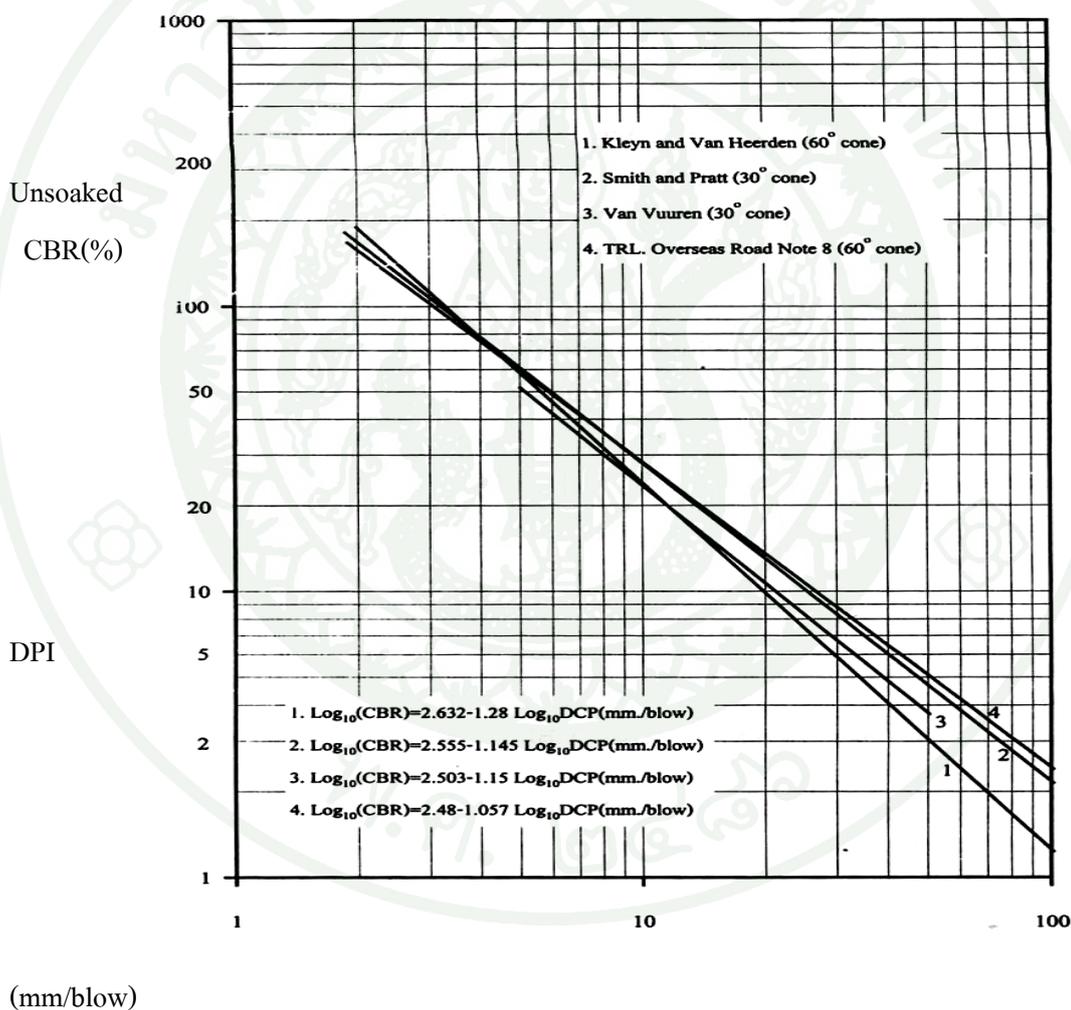
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง DPI และ Unsoaked CBR ของดิน 5 ชนิด

ที่มา: ธีระชาติ และพรพรหม (2543)

$$\text{Unsoaked CBR (\%)} = 397.65 (\text{DPI})^{-1.1564} \tag{11}$$

เมื่อ DPI = ค่าการจมน้ำหน่วยเป็น mm/Blow

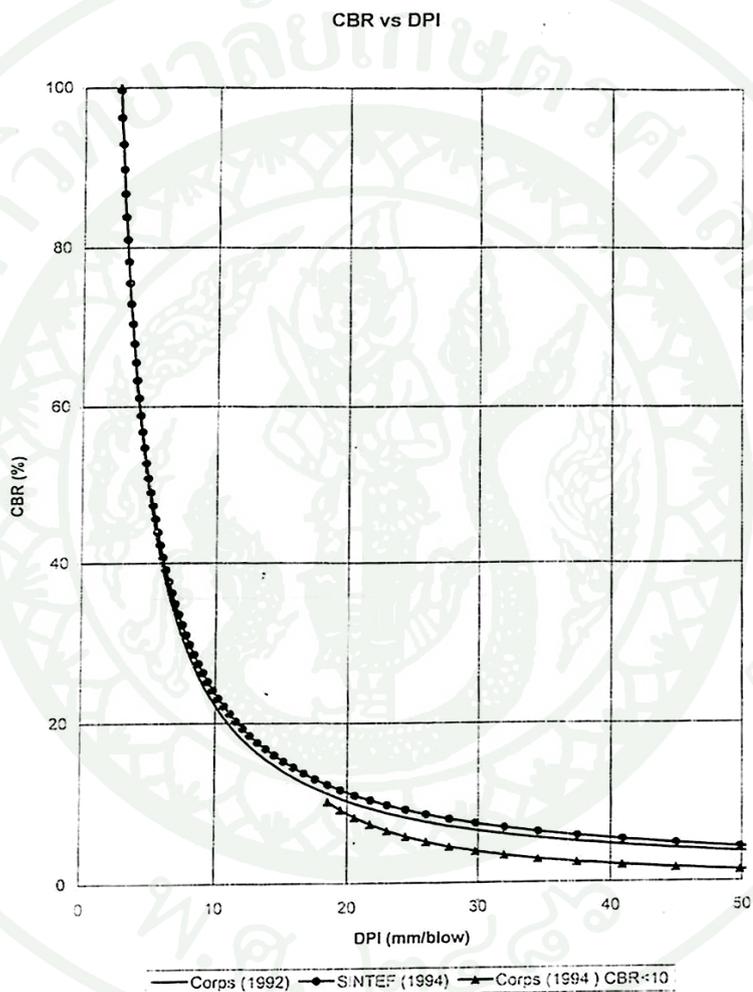
โดยความสัมพันธ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่า Field CBR ในสภาพที่แท้จริงของถนนและชั้นทางทำอากาศยานที่ประกอบด้วยดินและวัสดุผสมรวมที่มีค่า Unsoaked CBR ในช่วง 5-150 ได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DPI และ Unsoaked CBR

ที่มา: Hodges (1993)

Siekmeier *et al.* (1998) รายงานว่าสำหรับ Granular Base Materials ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จาก DPI และ CBR โดย The Foundation for Industrial and Scientific Research ที่ Norwegian Institute of Technology (SINTEF) ซึ่งได้รับเงินทุนจาก The Norwegian Road Research Laboratory (NRRL) ได้สรุปคุณสมบัติเชิงกลความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และ DPI ของ Granular Base Materials ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และ DPI ของ Granular base materials

ที่มา: Siekmeier *et al.* (1998)

Sawangsurriya and Edil (2005) รายงานว่า ได้มีนักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาวิจัยพัฒนาสมการ แสดงความสัมพันธ์ทั่วไประหว่างค่า DPI และค่า CBR ของวัสดุชั้นทางทั้ง Granular และ Cohesive Materials ได้ดังนี้

$$\log(\text{CBR}) = \alpha + [\beta \log(\text{DPI})] \quad (12)$$

โดยที่ CBR มีหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์ (%) และ DPI มีหน่วยเป็น mm/blow US Army Corps of Engineers ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ α และ β เท่าและ 2.46 และ -1.12 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ได้รับยอมรับแล้วจากหลายองค์กรและนักวิจัยหลายท่าน

12. พลังงานที่ใช้บดทับ

พลังงานที่ใช้บดทับเป็นตัวแปรสำคัญมากในการทดสอบ การบดทับดินในห้องทดสอบจะต้องคำนึงถึง ขนาดแบบทดสอบ น้ำหนักก้อนที่ใช้ ความสูงของการตกกระทบของก้อน จำนวนชั้นดินที่บดทับ และความหนาของชั้นดินในการบดทับแต่ละชั้น ดังสมการ

$$\text{พลังงานในการบดทับ} \quad (E) = \frac{B \times N \times H \times W}{V} \left(\frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \quad (13)$$

โดยกำหนดให้

E = พลังงานที่ใช้ในการบดทับ, (ft-lb/ft³)

B = จำนวนชั้น

N = จำนวนครั้งที่ตกในแต่ละชั้น

W = น้ำหนักของก้อนตก, (lb)

H = ระยะตกกระทบของก้อน, (ft)

V = ปริมาตรของดินในแบบทดสอบ, (ft³)

พลังงานที่ใช้ในการบดทับตามตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4

ตารางที่ 3 พลังงานที่ใช้บดทับ Mold Dia. 4 นิ้ว

เต็มความสูง Mold Dia. 4 นิ้ว							
Test	Hammer		Number of Blow per Layer	Drop		Energy per Unit Volume	
	Weight (Lbs)	No of Layer		Height (ft.)	ft.-lb/ft ³	T-m/m ³	
E1	10	4	10.5	1.5	18,918.92	92.26	
E2	10	5	12.5	1.5	28,153.15	137.29	
E3	10	5	25	1.5	56,306.31	274.58	

ตารางที่ 4 พลังงานที่ใช้บดทับ Mold Dia. 6 นิ้ว

เต็มความสูง Mold Dia. 6 นิ้ว							
Test	Hammer		Number of Blow per Layer	Drop		Energy per Unit Volume	
	Weight (Lbs)	No of Layer		Height (ft.)	ft.-lb/ft ³	T-m/m ³	
E4	10	7	15	1.5	13,750.99	67.1328	
E5	10	7	31	1.5	28,418.71	138.74	
E6	10	7	62	1.5	59,587.61	290.91	

13. ทฤษฎีเกี่ยวข้องและการทดสอบ

13.1 การทดสอบการบดทับ (Compaction Test)

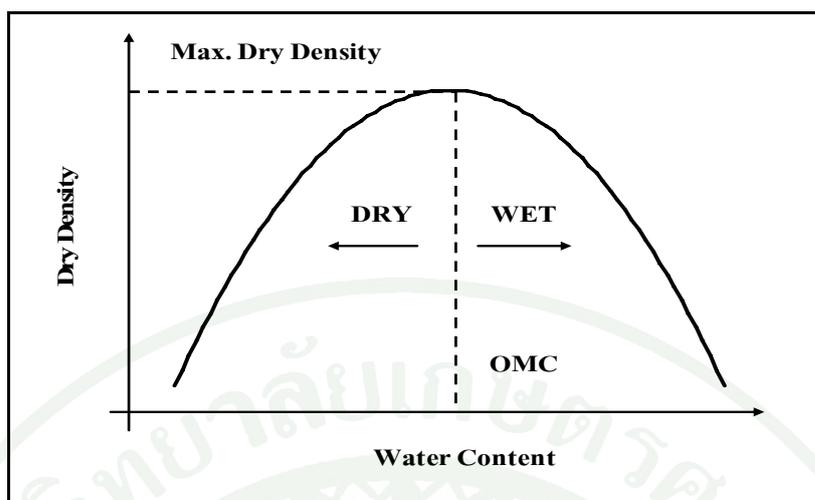
ดินประกอบด้วยเม็ดดินขนาดต่างๆ ระหว่างเม็ดดินเหล่านี้มีรูพรุน (Void) ในรูพรุนมีน้ำและอากาศแทรกอยู่ การทำให้ดินแข็งแรงขึ้นโดยทำให้รูพรุนเหล่านี้ลดลงทางกลศาสตร์ เรียกว่า การบดทับ การบดทับที่ดี บางครั้งสามารถทำให้รูพรุนที่มีอากาศอยู่ (Air Void) เกือบหมดไปได้เมื่อทำได้เช่นนี้แล้ว ภายหลังความชื้นในจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักความหนาแน่นแห้งของดินที่ถูกบดทับในห้องทดลองที่สำคั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

13.1.1 ปริมาณน้ำในดิน (Water Content) หรือ (Moisture Content)

13.1.2 ธรรมชาติของดินคือ ขนาดของเม็ดดิน ส่วนคละ (Gradation) และคุณสมบัติด้านกายภาพ เช่น ความถ่วงจำเพาะ ลักษณะของเม็ดดิน เป็นต้น

13.1.3 พลังงานที่ใช้บดทับเป็นการบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Proctor)

ในการทำการบดทับในห้องทดลอง ซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดทับในสนามต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้บดทับในสนาม เข้ามาผึ่งให้แห้งแล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำเข้าไปในปริมาตรที่พอเหมาะ แล้วเริ่มทำการบดทับในแบบ (Mold) โดยวิธีการที่จะกล่าวรายละเอียดภายหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดหาความหนาแน่น ในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆ อย่างน้อย 4 ถึง 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดทับแต่ละครั้ง ก็จะหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นแห้งและความชื้นจะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า ความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) และความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า (Optimum Water Content) ซึ่งจะได้นำเอาค่าที่ได้นี้ไปใช้ในการทดลองหาค่าการแบกทาน โดยใช้เปอร์เซ็นต์น้ำที่ความชื้น $\pm 1\%$, ความชื้น $\pm 2\%$ และความชื้น $\pm 3\%$ แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าความชื้นที่เหมาะสม (Moisture Content)



ภาพที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณน้ำ

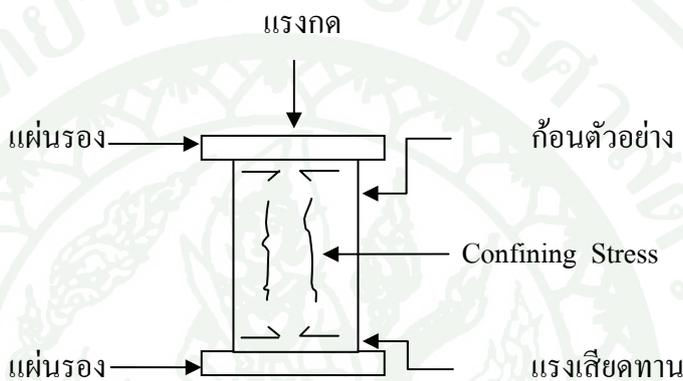
13.2 การทดสอบการแบกทาน (California Bearing Ratio)

การทดสอบการแบกทาน (California Bearing Ratio) เป็นวิธีการทดสอบวัดแรงเสียดทานของดินที่บดทับจนแน่นดีแล้ว ส่วนมากจะทดสอบที่ปริมาณความชื้นสูงสุด โดยใช้ท่อนเหล็กกลมตัน (Piston) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว กดลงบนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ด้วยอัตรา 0.05 นิ้ว ต่อนาที แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบและหน่วยแรงกด (Unit Load) มาตรฐานที่ได้จากการกด (Penetration) ค่าที่ได้เรียกว่า เปอร์เซ็นต์การแบกทาน นำค่าที่ได้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและค่าการแบกทาน จากค่าการแบกทาน ของดินแต่ละชนิดยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินอย่างคร่าวๆ ว่าเหมาะสมที่จะใช้และงานก่อสร้างถนนในชั้นดินถม ชั้นรองพื้นทาง (Sub base) หรือชั้นพื้นทาง (Base)

13.3 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength)

ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) คือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) สูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งแท่งตัวอย่างดินภาพทรงกระบอกหรือภาพ (Prismatic) จะรับได้ ถ้าในกรณีที่ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ยังไม่ถึงค่าสูงสุดเมื่อความเครียด (Strain) ในแนวตั้งเกินร้อยละ 20 ให้ใช้ค่าแรงอัดต่อหน่วยพื้นที่ที่ความเครียดร้อยละ 20 นั้นเป็นค่า Unconfined Compressive Strength (UCS)

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะเป็นค่าบ่งบอกถึงคุณสมบัติความสามารถต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่าง ขณะที่กดก้อนตัวอย่างก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้างทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างและแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าวจะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างเรียกว่า Confining Stress ดังภาพที่ 14 โดยค่า Confining Stress จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างและแผ่นรองมีค่ามาก Standard Methods for Testing Aggregate and Concrete (2543)



ภาพที่ 14 แรงต้านทานต่อการแตกตัวด้านข้าง (Confining Stress)

ที่มา: Standard Methods for Testing Aggregate and Concrete (2543)

ก้อนตัวอย่างที่มีความชื้นจะส่งผลทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่แห้ง เพราะการขยายตัวของปูนซีเมนต์เพสต์ เนื่องมาจากการดูดซึมน้ำจะส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างปูนซีเมนต์เพสต์และมวลรวมลดลง

ความเครียดในแนวดิ่งสำหรับแรงกดใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{14}$$

- เมื่อ ϵ = ความเครียดในแนวดิ่ง สำหรับแรงกดใดๆ
- ΔL = ระยะยวบตัวของตัวอย่างที่ถูกกดอ่านได้จาก Dial Gauge
- L_0 = ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง

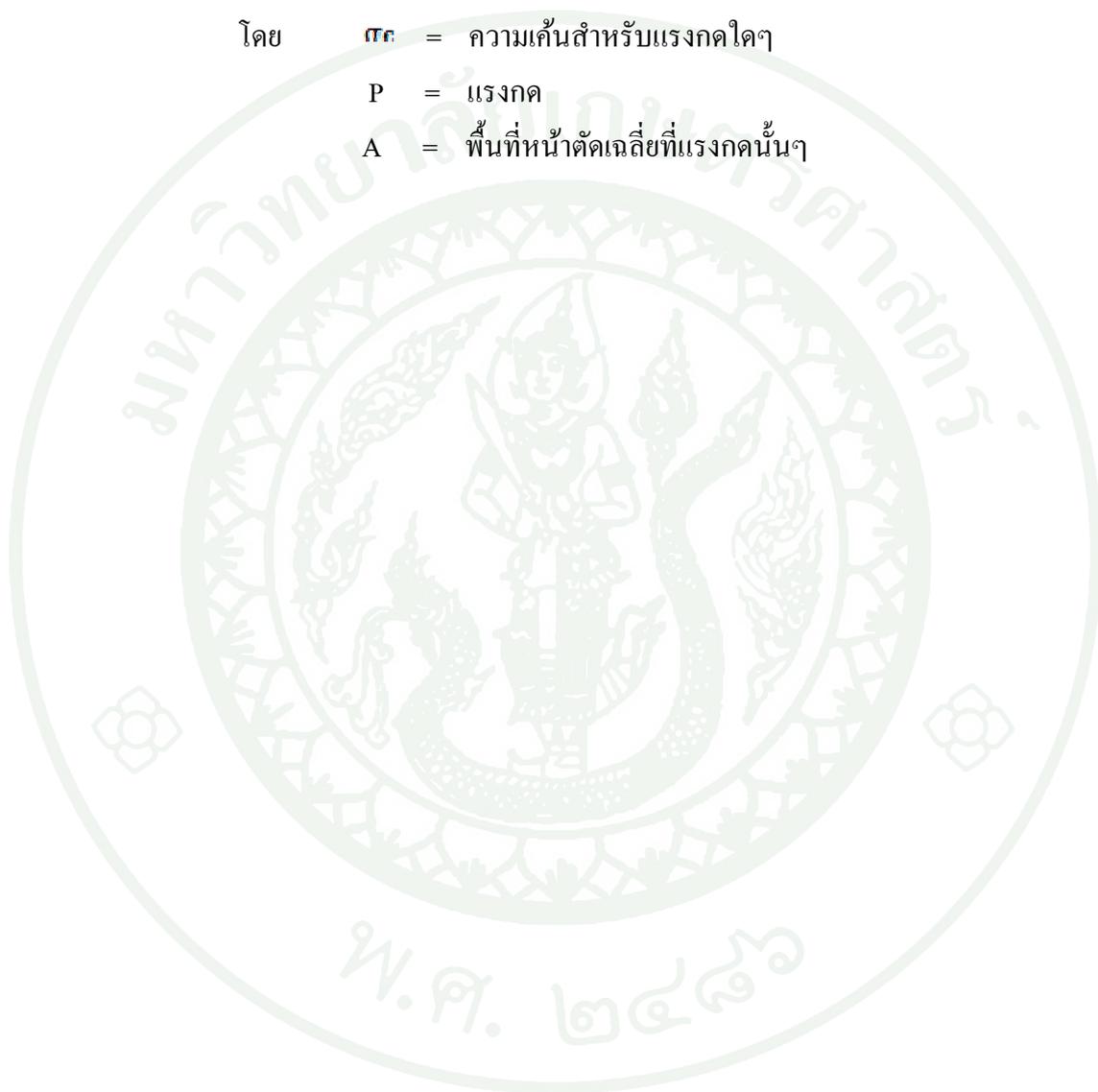
ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (15)$$

โดย σ_c = ความเค้นสำหรับแรงกดใดๆ

P = แรงกด

A = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยที่แรงกดนั้นๆ



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

1.1 อุปกรณ์ทดสอบหาขนาดคละของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม้ด้าง (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 อุปกรณ์ทดสอบการบดทับ (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 หินผุแหล่งที่ 1 (Weathered Rock 1) แหล่งวัสดุจากโครงการก่อสร้างของกรมทางหลวง จังหวัดลพบุรี

2.2 หินผุ แหล่งที่ 2 (Weathered Rock 2) แหล่งวัสดุจากโครงการก่อสร้างของกรมทางหลวง จังหวัดสุพรรณบุรี

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15

วิธีการ

1. เตรียมตัวอย่าง

นำวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ นิ้ว หรือ 19 มิลลิเมตร

2. วิธีการทดสอบวัสดุ

2.1 ทดสอบหาขนาดคละ (Sieve Analysis) วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้าง เพื่อหาขนาดคละของมวลรวม (Gradation) แล้วเปรียบเทียบกับมวลรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรง หรือ ค้างบนตะแกรงตามขนาดต่างๆ และมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{R}{T} \times 100 \quad (16)$$

เมื่อ P = เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก

R = มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

T = มวลของตัวอย่างทั้งหมด

2.2 ทดสอบหาค่า Atterberg Limit ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Liquid Limit (LL)} = \frac{\text{มวลของน้ำในดิน (gm)}}{\text{มวลของดินอบแห้ง (gm)}} \times 100 \quad (17)$$

เมื่อ Liquid Limit (LL) = ปริมาณของน้ำที่มีอยู่พอดีในดินซึ่งทำให้ดิน
เปลี่ยนจากภาวะ Plastic เป็นภาวะ Liquid

$$\text{Plastic Limit (PL)} = \frac{\text{มวลของน้ำ (gm)}}{\text{มวลของดินแห้ง (gm)}} \times 100 \quad (18)$$

$$\text{Plastic Index (PI)} = \text{LL} - \text{PL} \quad (19)$$

เมื่อ Plastic Limit (LL) = อัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำต่อมวลของดินแห้ง

Plastic Index (PI) = ค่าจำนวนน้ำต่ำสุดในดิน เมื่อดินนั้นยังคงอยู่ใน
สภาพ Plastic

2.3 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 สามารถคำนวณ
ได้จากสมการ

$$G_s = \frac{G_t \cdot M_s}{M_s - M_1 - M_2} \quad (20)$$

เมื่อ G_s = ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

G_t = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ t (องศา
เซลเซียส) (เปิดตารางที่ 1 ตามมาตรฐานการ
ทดสอบ 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 ทดสอบการบดทับ (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นสูงสุดของวัสดุตัวอย่างและปริมาณน้ำที่ใช้บดทับ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ปริมาณน้ำในวัสดุรวมรวมเป็นร้อยละ

$$W = \frac{(M_1 - M_2)}{M_2} \times 100 \quad (21)$$

เมื่อ W = ปริมาณน้ำในมวลรวมเป็นร้อยละคิดเทียบและน้ำหนักของมวลรวมอบแห้ง

M_1 = น้ำหนักของมวลรวมเปียก (gm)

M_2 = น้ำหนักของมวลรวมอบแห้ง (gm)

ค่าความแน่นเปียก (Wet Density)

$$\sigma_t = \frac{A}{V} \quad (22)$$

เมื่อ σ_t = ความแน่นเปียก (gm/cm³)

A = น้ำหนักของมวลรวมเปียกที่บดทับในแบบ (gm)

V = ปริมาตรของมวลรวมเปียกที่บดทับในแบบ (cm³)

ค่าความแน่นแห้ง (Dry Density)

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (23)$$

เมื่อ ρ_d = ความแน่นแห้ง (gm/cm³)

ρ_t = ความแน่นเปียก (gm/cm³)

ω = ปริมาณน้ำในมวลรวมเป็นร้อยละ

2.5 ทดสอบหาค่าการแบกทาน (California Bearing Ratio, CBR) เพื่อเปรียบเทียบและ Bearing Value ของวัสดุตัวอย่างและวัสดุหินมาตรฐาน เมื่อทำการทดสอบตัวอย่างนั้นโดยใช้ก้อนบดทับในแบบที่ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) เพื่อนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างของถนนและใช้ควบคุมงานการบดทับให้ได้ความแน่นและความชื้นตามความต้องการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ค่าการแบกทาน (CBR) มีหน่วยเป็นร้อยละ

$$\text{CBR (\%)} = \frac{X}{Y} \times 100 \quad (24)$$

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

$$\text{Swell (\%)} = \frac{S}{H} \times 100 \quad (25)$$

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

H = ความสูงเริ่มต้น (Initial Height) ของก้อนตัวอย่างแห้งน้ำ (mm)

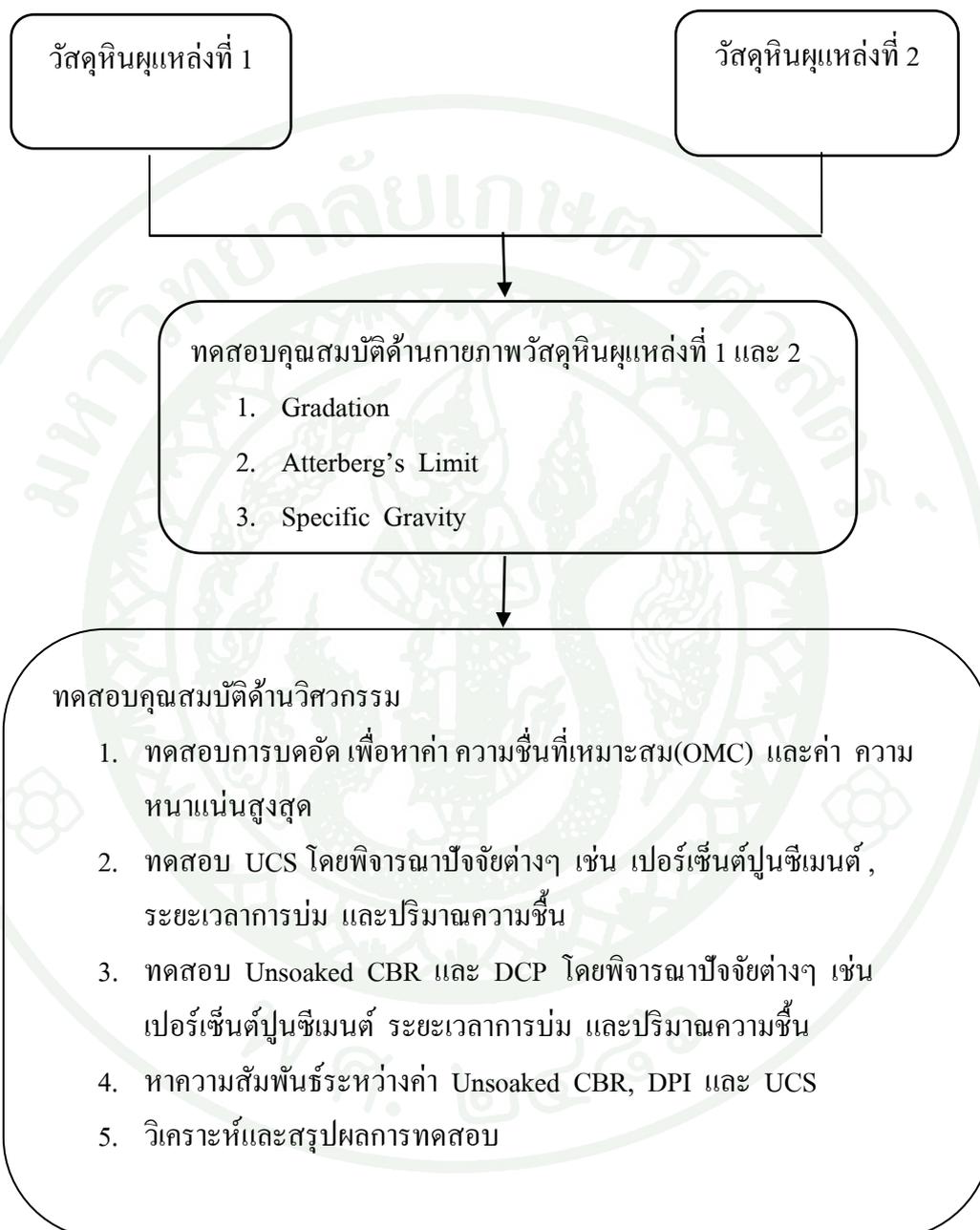
3. การปรับเทียบขนาดท่อนเหล็กกลมตันหัวกด CBR

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

$$\frac{Y}{D1''} = \frac{X}{D3''} \quad (26)$$

เมื่อ Y = ระยะปรับแก้ที่นำมาใช้อ้างอิงสำหรับอ่านค่าแรงกด
 X = ระยะการจมใดๆ ของท่อนเหล็กกลมตัน
 = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 1 ตารางนิ้ว
 = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 3 ตารางนิ้ว

แผนงานการวิจัย



ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุหินผุทั้งสองแหล่ง
2. ทราบถึงค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุหินผุ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนต่างๆ ในแต่ละช่วงอายุการบ่ม
3. พัฒนาการความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ เพื่อแนวทางในการตรวจสอบวิเคราะห์งานโครงสร้างชั้นทาง
4. สามารถหาค่า Unsoaked CBR และ UCS ในสนามได้อย่างรวดเร็วจากกราฟความสัมพันธ์โดยไม่ต้องเก็บตัวอย่างในสนามมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

แหล่งทุนสนับสนุน

ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้วัสดุและเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบ

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลอง

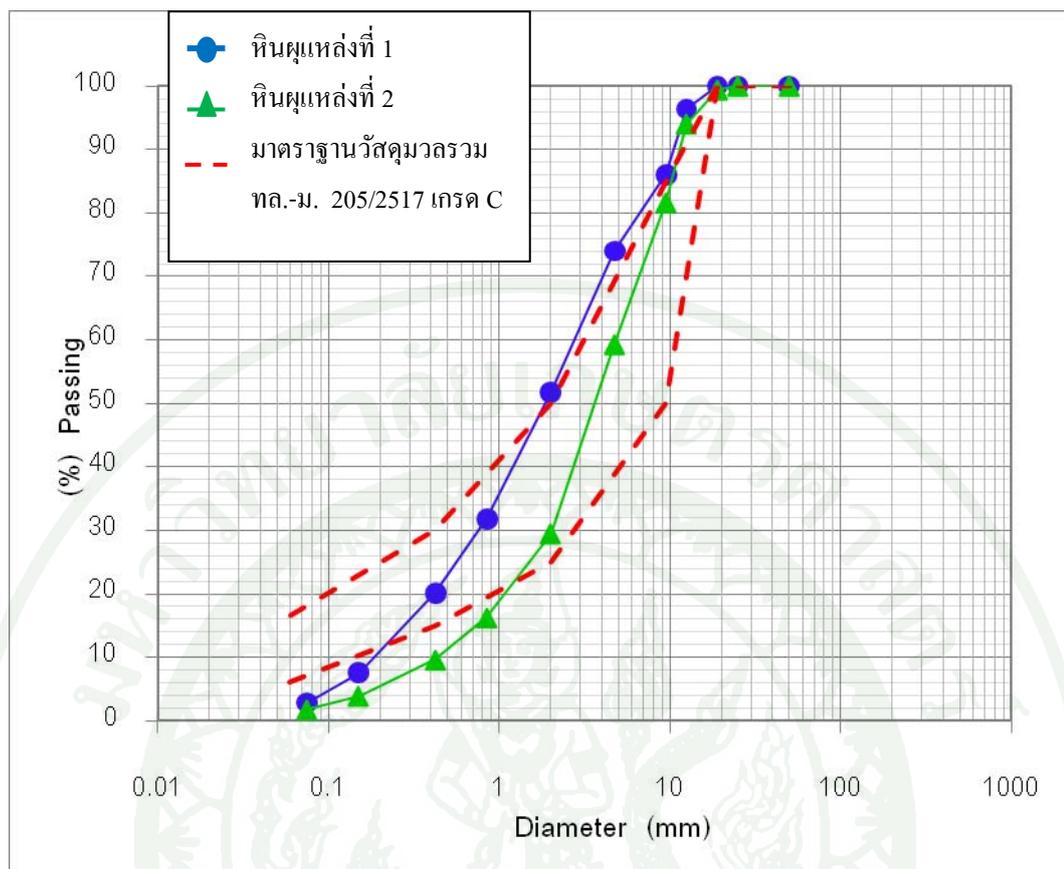
1. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุหินผุ

ในการศึกษานี้ได้นำวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ผลทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุมีดังต่อไปนี้

1.1 ผลทดสอบการหาขนาดคละของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 วัสดุมีลักษณะหยาบ มีเม็ดละเอียดผสมอยู่ สัดส่วนขนาดคละสม่ำเสมอ มีสีขาวและสีแดงตามลำดับและจากขนาดคละของวัสดุหินผุสามารถจัดอยู่ในระหว่างมาตรฐานวัสดุมวลรวมเกรด C ดังแสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 15

ตารางที่ 5 ขนาดคละวัสดุหินผุทั้งสองชนิด

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1	วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2
เบอร์ 2" (50 มม.)	100.0	100.0
เบอร์ 1" (25 มม.)	100.0	100.0
เบอร์ 3/4" (19 มม.)	100.0	99
เบอร์ 1/2" (12.5 มม.)	96	94
เบอร์ 3/8" (9.5 มม.)	86	82
เบอร์ 4" (4.75 มม.)	74	59
เบอร์ 10" (2 มม.)	52	30
เบอร์ 20" (0.85 มม.)	32	16
เบอร์ 40" (0.425 มม.)	20	10
เบอร์ 100" (0.15 มม.)	8	4
เบอร์ 200" (0.075 มม.)	3	2



ภาพที่ 15 ขนาดผละวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2

1.2 ผลทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่าและ 2.87 วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่าและ 2.83 ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2

รายการ Determination No.	หินผุ แหล่งที่ 1		หินผุ แหล่งที่ 2	
	1	2	1	2
Pycnometer + water + soil M ₁ (gm.)	726.3	731.4	695.8	687.4
Temperature (° C)	45	56	48	55
Pycnometer + water M ₂ (gm.)	667.1	671.9	635.8	627.3
Dish + Dry Soil (gm.)	342.7	329.4	269.4	313.4
Dish (gm.)	252.3	338.6	177.6	220.7
Dry Soil M _s (gm.)	90.4	90.8	91.8	92.7
Gt (เปิดตาราง ทล.-ท.101/2515)	0.9902	0.9852	0.9890	0.9857
G _s	2.87	2.86	2.86	2.80
Average G _s	2.87		2.83	
Liquid Limits	14.20		19.21	

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

1.4 ผลการจำแนกประเภทดินวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จะอยู่ในกลุ่ม GP และจำแนกตามระบบ AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-3 วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จะอยู่ในกลุ่ม GP และจำแนกตามระบบ AASHTO จะอยู่ในกลุ่ม A-3

2. ผลทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2

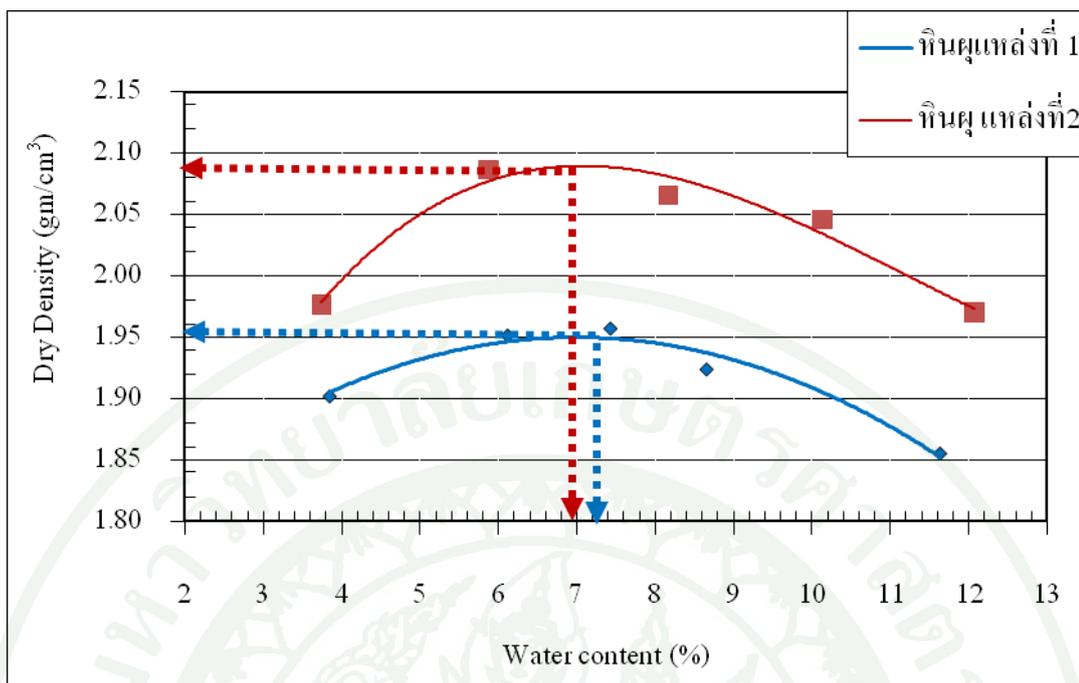
ผลทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

2.1 ผลทดสอบการบดทับ (Compaction Test) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุมีความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) เท่าและ 7.2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) เท่าและ 1.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 16

2.2 ผลทดสอบการบดทับ (Compaction Test) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุมีความแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) เท่าและ 6.9 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) เท่าและ 2.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 16

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบการบดทับ (Compaction Test) แบบสูงกว่ามาตรฐาน

รายการทดสอบ	วัสดุที่ทำการทดสอบ	
	หินผุแหล่งที่ 1	หินผุแหล่งที่ 2
Optimum Moisture Content (%)	7.2	6.9
Maximum Dry Density (gm/cm ³)	1.96	2.09

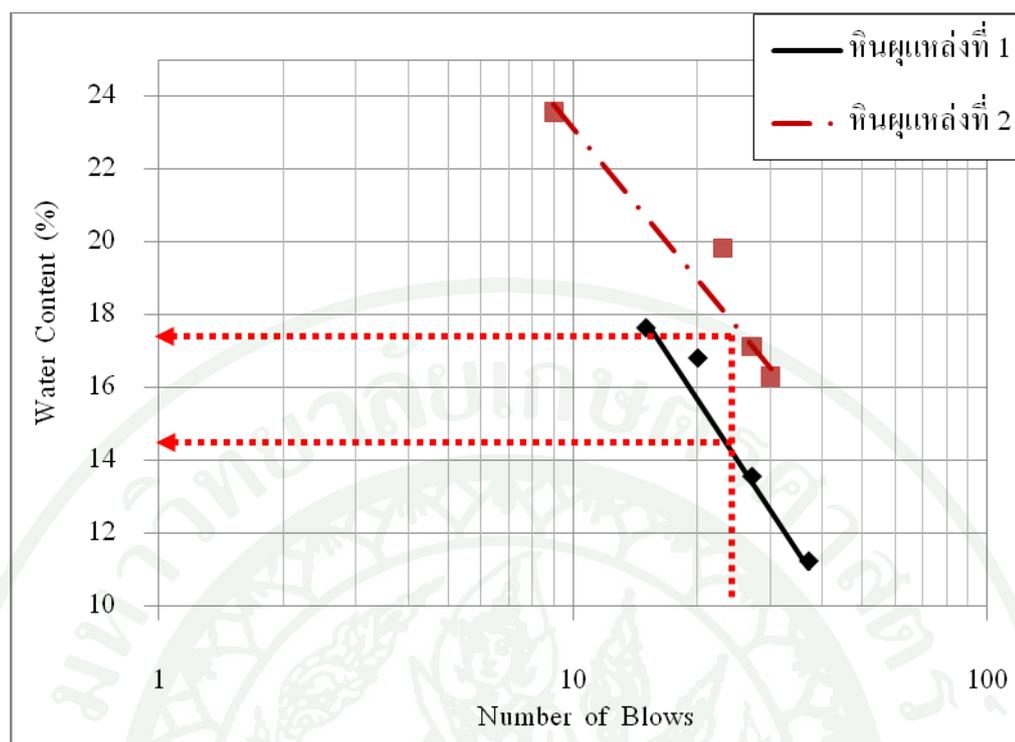


ภาพที่ 16 ผลการทดสอบการบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐานของวัสดุหินผุทั้งสองแหล่ง

2.3 ผลการทดสอบค่า Liquid Limit ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยแต่ละแหล่งคือ 14.82 % และ 17.60 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 17

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ Liquid Limit ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2

	หินผุแหล่งที่ 1				หินผุแหล่งที่ 2			
Blows	37	27	20	15	30	27	23	9
%w	11.24	13.57	16.82	17.65	16.32	17.13	19.82	23.56
Average (%)	14.82				19.21			

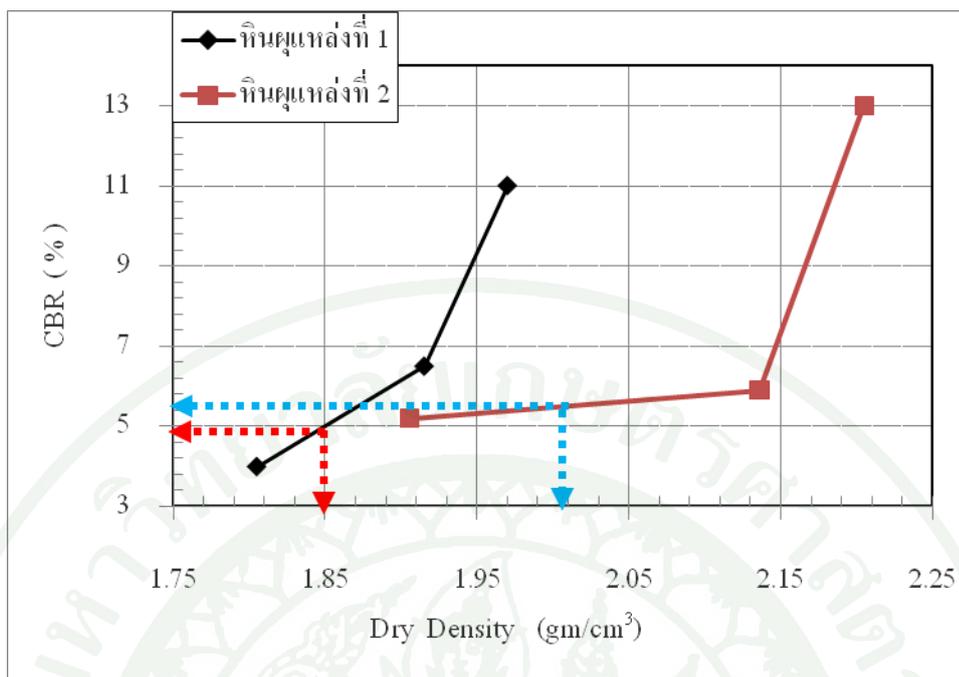


ภาพที่ 17 ผลการทดสอบ Liquid Limit ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2

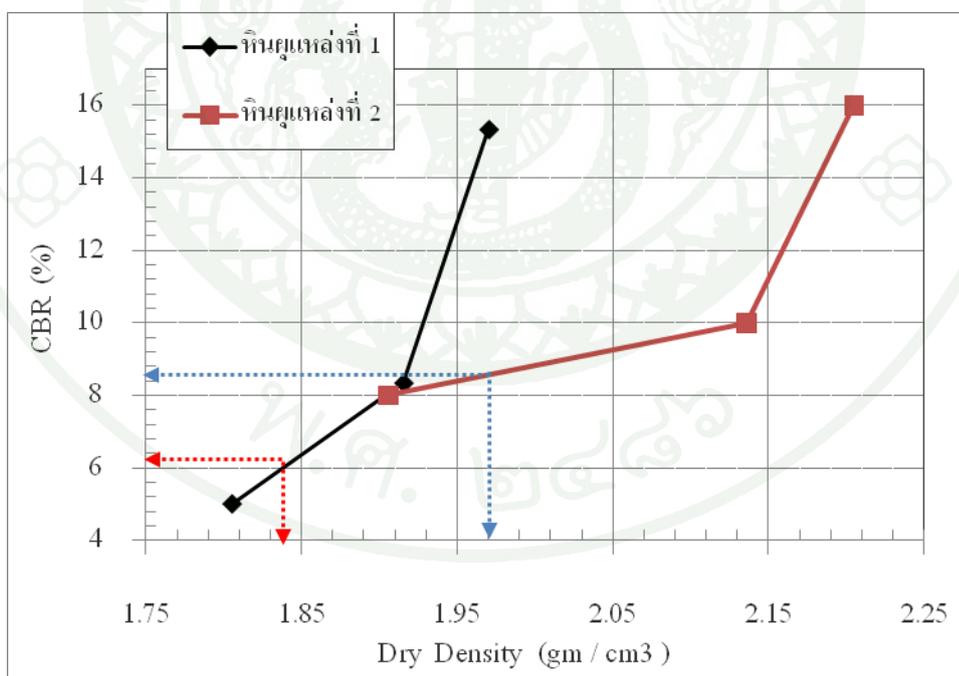
2.3 ผลการทดสอบหาค่า California Bearing Ratio (CBR) แบบแช่น้ำ วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ค่า CBR ที่ค่า CBR ที่ 0.1 นิ้ว Penetration เท่ากับ 4.20 เปอร์เซ็นต์ และ 6.10 เปอร์เซ็นต์ ค่า CBR ที่ 0.2 นิ้ว Penetration เท่ากับ 5.8 เปอร์เซ็นต์และ 8.50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลการทดสอบหาค่า CBR ดังแสดงในตารางที่ 9 ภาพที่ 18 และ 19

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบหาค่า CBR แบบแช่น้ำ

รายการทดสอบ	วัสดุที่ทำการทดสอบ	
	หินผุแหล่งที่ 1	หินผุแหล่งที่ 2
Optimum Moisture Content (%)	7.20	6.90
Maximum Dry Density (gm/cm ³)	1.95	2.09
Dry Density @ 95%	1.85	1.98
CBR ที่ 0.1 in. Penetration (%)	4.70	5.80
CBR ที่ 0.2 in. Penetration (%)	6.10	8.50



ภาพที่ 18 ผลการทดสอบ CBR ที่ 0.1 นิ้ว Penetration วัสดุหินผุแหล่งที่ 1



ภาพที่ 19 ผลการทดสอบ CBR ที่ 0.2 นิ้ว Penetration วัสดุหินผุแหล่งที่ 2

2.5 ผลการทดสอบหาค่าระหว่าง California Bearing Ratio (CBR) และ Dynamic Cone Penetration Index (DPI) ของหินผุแหล่งที่ 1 และ หินผุแหล่งที่ 2 แบบไม่ผสมปูนซีเมนต์ดังแสดงในตาราง ที่ 10, 11, 12, 13, 14 และ 15 รวมทั้งภาพที่ 20 และ 21 สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อ CBR มีค่าสูง DPI จะมีค่าต่ำ และเมื่อ CBR ต่ำจะมีค่า DPI สูงเนื่องจากค่า DPI เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการจม ต่อ จำนวนการตอกหน่วยเป็น mm/blow นั้นจึงหมายความว่าถ้า DPI สูงแสดงว่าวัสดุที่ทำการทดสอบมีความสามารถรับแรงกระแทกได้น้อยหรือดินมีความอ่อนสูงซึ่งจะมีค่าตรงข้ามกับค่า CBR คือ CBR สูงดินก็จะสามารถรับแรงบดทับได้สูงโดยเปรียบเทียบข้อมูลของ Sawangsuriya and Edill (2005) และ อาวุธ โพธิ์อุดม(2553)

ตารางที่ 10 ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 0.1 นิ้ว วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

Items	OMC (%)	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm ³)	Energy (ft-lb/lb ³)	Unsoaked CBR ที่ 0.1" (%)	DPI (mm/blow)		
						(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	0.6*OMC	5.8	1.94	67.2	4.8	20.5	17.4	15.6
2	0.6*OMC	5.4	1.81	138.7	10.7	18.5	15.9	13.3
3	0.6*OMC	5.3	2.04	277.5	9.9	18.0	15.5	13.2
4	0.8*OMC	5.4	1.93	67.2	7.8	19.0	16.3	15.0
5	0.8*OMC	5.6	1.84	138.7	11.3	17.5	15.1	13.1
6	0.8*OMC	5.8	1.98	277.5	11.5	16.5	14.1	11.9
7	1.0*OMC	7.0	1.88	67.2	9.2	16.0	14.0	12.8
8	1.0*OMC	6.8	1.81	138.7	11.8	15.5	13.4	11.9
9	1.0*OMC	7.2	1.93	277.5	14.1	14.5	12.4	10.8
10	1.2*OMC	8.6	1.84	67.2	9.0	17.0	14.8	13.4
11	1.2*OMC	8.8	1.81	138.7	9.6	16.0	13.8	12.0
12	1.2*OMC	8.3	1.93	277.5	12.5	15.5	13.3	11.5
13	1.4*OMC	9.8	1.85	67.2	8.0	18.0	15.6	14.2
14	1.4*OMC	9.8	1.81	138.7	8.7	17.0	14.7	12.6
15	1.4*OMC	9.4	1.94	277.5	11.3	16.5	14.3	12.5

ตารางที่ 11 ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 0.2 นิ้ว วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

Items	OMC (%)	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm ³)	Energy (ft-lb/lb ³)	Unsoaked CBR ที่ 0.2" (%)	DPI (mm/blow)		
						(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	0.6*OMC	5.8	1.94	67.2	6.5	20.5	17.4	15.6
2	0.6*OMC	5.4	1.81	138.7	13.3	18.5	15.9	13.3
3	0.6*OMC	5.3	2.04	277.5	13.6	18.0	15.5	13.2
4	0.8*OMC	5.4	1.93	67.2	10.5	19.0	16.3	15.0
5	0.8*OMC	5.6	1.84	138.7	13.7	17.5	15.1	13.1
6	0.8*OMC	5.8	1.98	277.5	14.3	16.5	14.1	11.9
7	1.0*OMC	7.0	1.88	67.2	12.7	16.0	14.0	12.8
8	1.0*OMC	6.8	1.81	138.7	14.7	15.5	13.4	11.9
9	1.0*OMC	7.2	1.93	277.5	17.7	14.5	12.4	10.8
10	1.2*OMC	8.6	1.84	67.2	11.7	17.0	14.8	13.4
11	1.2*OMC	8.8	1.81	138.7	12.7	16.0	13.8	12.0
12	1.2*OMC	8.3	1.93	277.5	16.2	15.5	13.3	11.5
13	1.4*OMC	9.8	1.85	67.2	10.1	18.0	15.6	14.2
14	1.4*OMC	9.8	1.81	138.7	11.3	17.0	14.7	12.6
15	1.4*OMC	9.4	1.94	277.5	13.7	16.5	14.3	12.5

ตารางที่ 12 ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยปูนซีเมนต์

Items	OMC (%)	Water	Dry	Energy (ft-lb/lb ³)	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
		Content	Density		CBR	(0-25)	(0-50)	(0-75)
		(%)	(gm/cm ³)		(Max)	(%)	(%)	(%)
1	0.6*OMC	5.8	1.94	67.2	6.5	20.5	17.4	15.6
2	0.6*OMC	5.4	1.81	138.7	13.3	18.5	15.9	13.3
3	0.6*OMC	5.3	2.04	277.5	13.6	18.0	15.5	13.2
4	0.8*OMC	5.4	1.93	67.2	10.5	19.0	16.3	15.0
5	0.8*OMC	5.6	1.84	138.7	13.7	17.5	15.1	13.1
6	0.8*OMC	5.8	1.98	277.5	14.3	16.5	14.1	11.9
7	1.0*OMC	7.0	1.88	67.2	12.7	16.0	14.0	12.8
8	1.0*OMC	6.8	1.81	138.7	14.7	15.5	13.4	11.9
9	1.0*OMC	7.2	1.93	277.5	17.7	14.5	12.4	10.8
10	1.2*OMC	8.6	1.84	67.2	11.7	17.0	14.8	13.4
11	1.2*OMC	8.8	1.81	138.7	12.7	16.0	13.8	12.0
12	1.2*OMC	8.3	1.93	277.5	16.2	15.5	13.3	11.5
13	1.4*OMC	9.8	1.85	67.2	10.1	18.0	15.6	14.2
14	1.4*OMC	9.8	1.81	138.7	11.3	17.0	14.7	12.6
15	1.4*OMC	9.4	1.94	277.5	13.7	16.5	14.3	12.5

ตารางที่ 13 ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 0.1 นิ้ว วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยปูนซีเมนต์

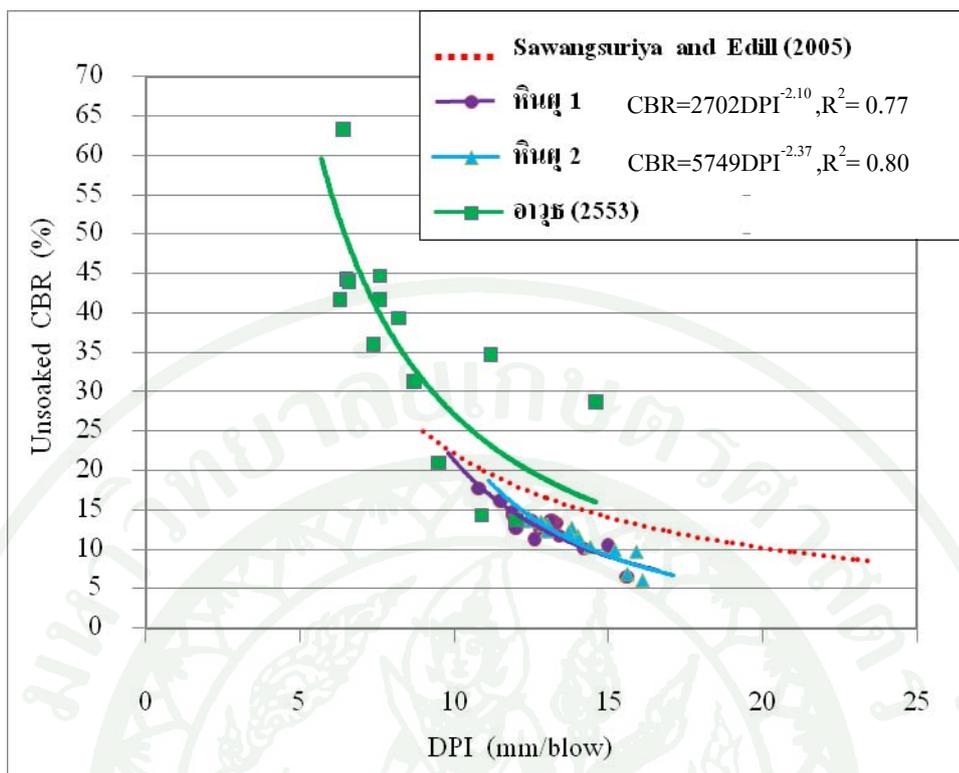
Items	OMC (%)	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm ³)	Energy (ft-lb/lb ³)	Unsoaked CBR ที่ 0.1" (%)	DPI (mm/blow)		
						(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	0.6*OMC	4.2	1.96	67.2	4.2	21.0	18.2	16.1
2	0.6*OMC	4.5	1.95	138.7	10.5	19.0	16.5	14.0
3	0.6*OMC	4.4	2.02	277.5	9.2	18.5	15.9	13.8
4	0.8*OMC	6.1	2.08	67.2	5.0	20.0	17.0	15.6
5	0.8*OMC	6.3	2.09	138.7	11.1	18.0	15.5	13.7
6	0.8*OMC	6.2	2.07	277.5	10.0	17.5	14.9	13.0
7	1.0*OMC	7.5	2.07	67.2	7.9	18.5	15.7	14.4
8	1.0*OMC	7.6	2.06	138.7	11.4	16.5	14.3	12.4
9	1.0*OMC	6.9	2.06	277.5	10.3	15.5	13.6	12.1
10	1.2*OMC	9.3	2.03	67.2	7.5	19.5	16.5	15.2
11	1.2*OMC	9.4	2.05	138.7	11.0	17.0	14.8	12.9
12	1.2*OMC	9.1	2.04	277.5	11.2	16.5	14.3	12.4
13	1.4*OMC	10.6	1.98	67.2	7.2	20.5	17.4	15.9
14	1.4*OMC	10.7	2.02	138.7	10.1	18.0	15.0	13.0
15	1.4*OMC	11.0	1.90	277.5	10.1	17.5	14.9	12.8

ตารางที่ 14 ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ 0.2 นิ้ว วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยปูนซีเมนต์

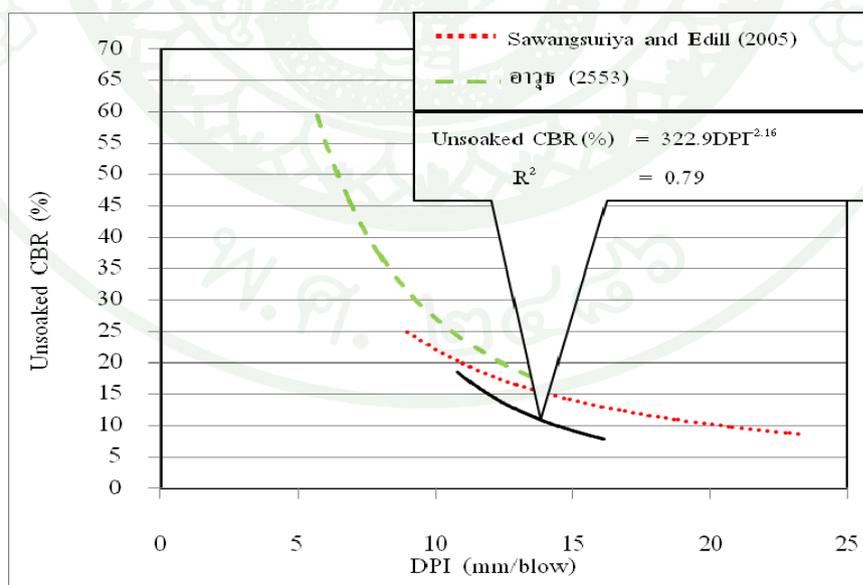
Items	OMC (%)	Water	Dry	Energy (ft-lb/lb ³)	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
		Content (%)	Density (gm/cm ³)		CBR ที่ 0.2"	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	0.6*OMC	4.2	1.96	67.2	6.1	21.0	18.2	16.1
2	0.6*OMC	4.5	1.95	138.7	11.7	19.0	16.5	14.0
3	0.6*OMC	4.4	2.02	277.5	12.7	18.5	15.9	13.8
4	0.8*OMC	6.1	2.08	67.2	6.9	20.0	17.0	15.6
5	0.8*OMC	6.3	2.09	138.7	12.2	18.0	15.5	13.7
6	0.8*OMC	6.2	2.07	277.5	13.2	17.5	14.9	13.0
7	1.0*OMC	7.5	2.07	67.2	10.3	18.5	15.7	14.4
8	1.0*OMC	7.6	2.06	138.7	13.6	16.5	14.3	12.4
9	1.0*OMC	6.9	2.06	277.5	14.1	15.5	13.6	12.1
10	1.2*OMC	9.3	2.03	67.2	9.9	19.5	16.5	15.2
11	1.2*OMC	9.4	2.05	138.7	13.1	17.0	14.8	12.9
12	1.2*OMC	9.1	2.04	277.5	14.0	16.5	14.3	12.4
13	1.4*OMC	10.6	1.98	67.2	9.7	20.5	17.4	15.9
14	1.4*OMC	10.7	2.02	138.7	12.3	18.0	15.0	13.0
15	1.4*OMC	11.0	1.90	277.5	13.5	17.5	14.9	12.8

ตารางที่ 15 ผลทดสอบหาค่า DPI และ CBR ที่ Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

Items	OMC (%)	Water Content (%)	Dry Density (gm/cm ³)	Energy (ft-lb/lb ³)	Unsoaked CBR (Max.) (%)	DPI (mm/blow)		
						(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	0.6*OMC	4.2	1.96	67.2	6.1	21.0	18.2	16.1
2	0.6*OMC	4.5	1.95	138.7	11.7	19.0	16.5	14.0
3	0.6*OMC	4.4	2.02	277.5	12.7	18.5	15.9	13.8
4	0.8*OMC	6.1	2.08	67.2	6.9	20.0	17.0	15.6
5	0.8*OMC	6.3	2.09	138.7	12.2	18.0	15.5	13.7
6	0.8*OMC	6.2	2.07	277.5	13.2	17.5	14.9	13.0
7	1.0*OMC	7.5	2.07	67.2	10.3	18.5	15.7	14.4
8	1.0*OMC	7.6	2.06	138.7	13.6	16.5	14.3	12.4
9	1.0*OMC	6.9	2.06	277.5	14.1	15.5	13.6	12.1
10	1.2*OMC	9.3	2.03	67.2	9.9	19.5	16.5	15.2
11	1.2*OMC	9.4	2.05	138.7	13.1	17.0	14.8	12.9
12	1.2*OMC	9.1	2.04	277.5	14.0	16.5	14.3	12.4
13	1.4*OMC	10.6	1.98	67.2	9.7	20.5	17.4	15.9
14	1.4*OMC	10.7	2.02	138.7	12.3	18.0	15.0	13.0
15	1.4*OMC	11.0	1.90	277.5	13.5	17.5	14.9	12.8



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR Max และ DPI วัดคูหินผุของทั้งสองแหล่งไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง CBR Max และ DPI วัดคูหินผุรวมทั้งสองแหล่งไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined Compressive Strength (UCS) ของวัสดุหินผุ ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาอายุการบ่ม และการปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด ($1.0 \cdot \text{OMC}$) จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด ($1.25 \cdot \text{OMC}$) อีกทั้งยังสามารถทราบได้อีกว่าที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2% $1 \cdot \text{OMC}$ ที่อายุ 7 วันหินผุแหล่งที่ 2 นี้สามารถพัฒนากำลังใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานชั้นรองพื้นทางของดินซีเมนต์ คือ 6.9 ksc ดังแสดงในตารางที่ 16 และ 17 และภาพที่ 22 และ 23

ตารางที่ 16 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ ($1.0 \cdot \text{OMC}$)

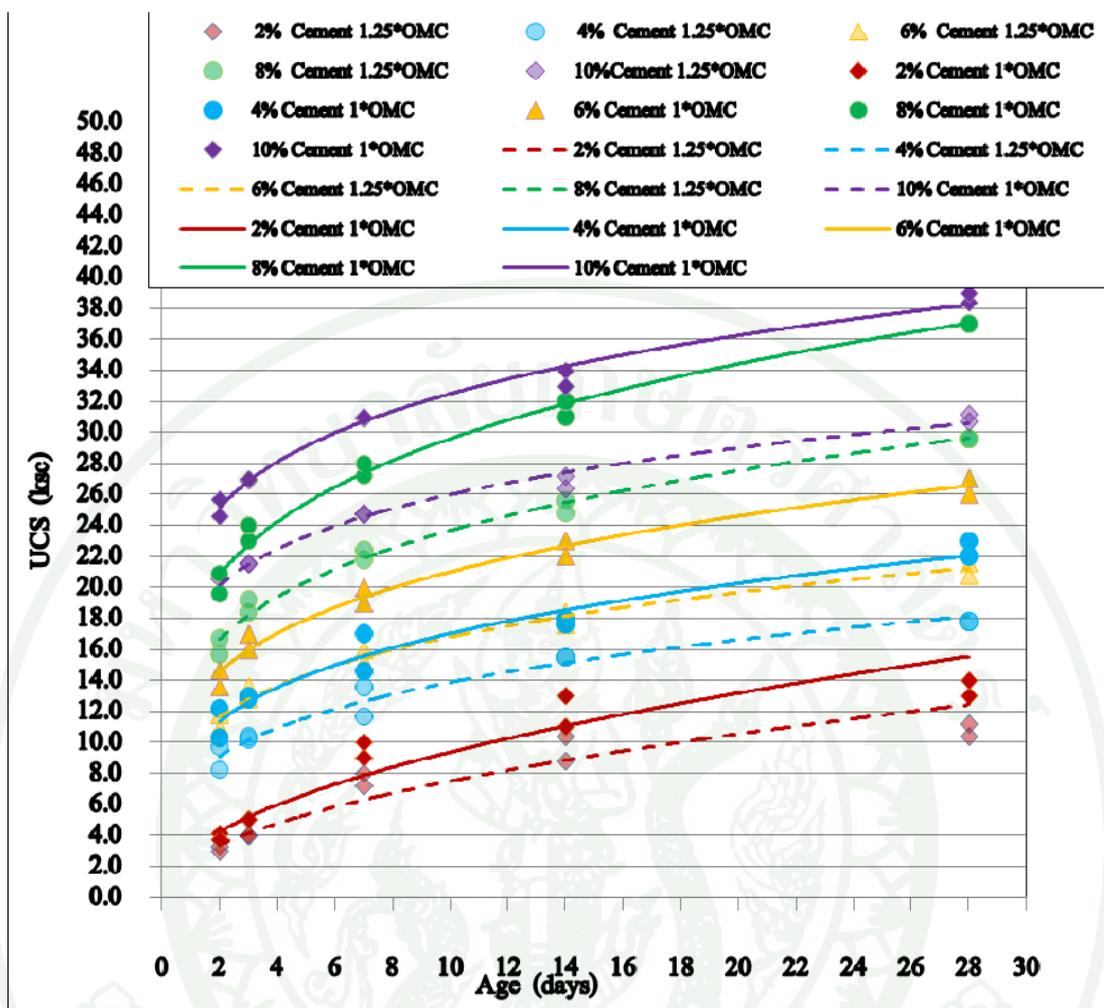
Age (day)	UCS (ksc)									
	Cement									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	4.1	3.7	12.2	10.3	14.7	13.6	19.6	20.9	25.7	24.6
3	5.0	5	12.8	13	17.0	16	23.0	24	26.9	27
7	9.0	10	14.6	17	20.0	19	27.2	28	30.9	31
14	11.0	13	17.6	18	23.0	22	31.0	32	34.0	33
28	13.0	14	22	23	26.0	27	37.0	37	38.4	39

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1 S2 ตัวอย่างที่ 2

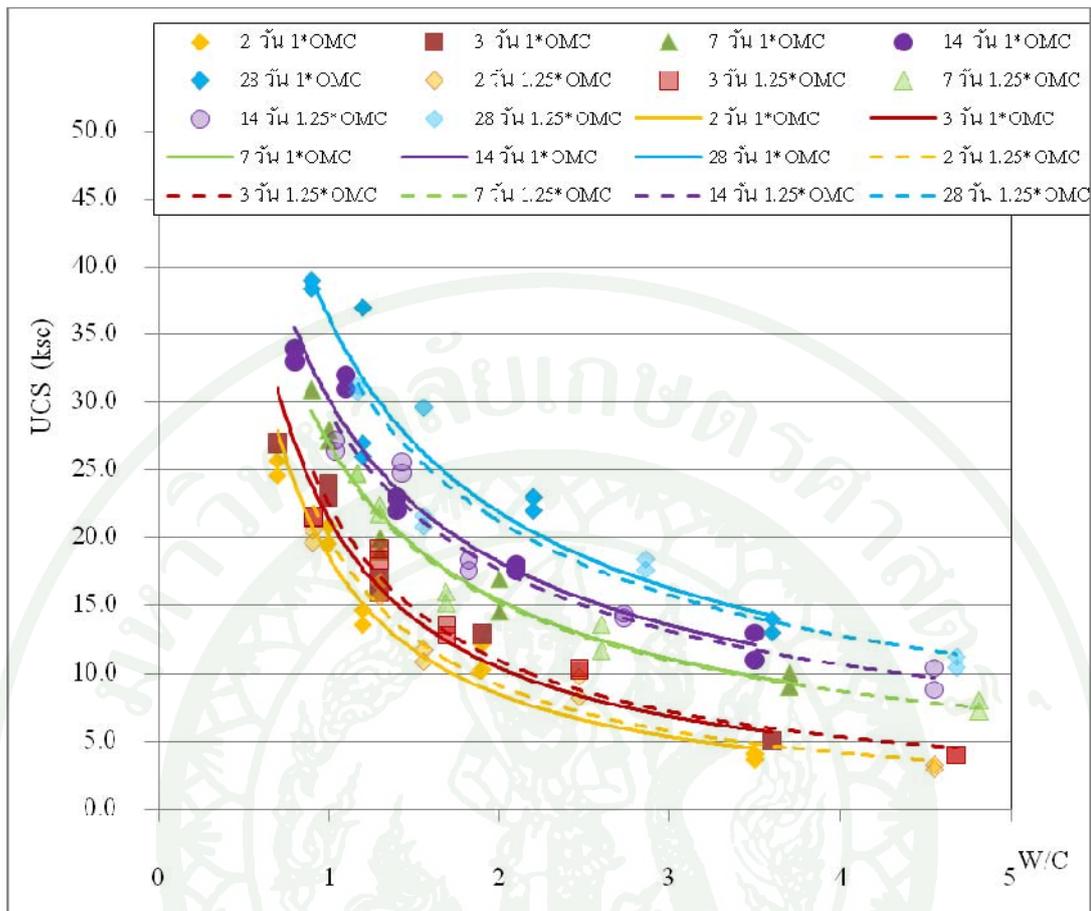
ตารางที่ 17 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 1ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)

Age (day)	UCS (ksc)									
	Cement									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	3.8	3.3	5.9	5.3	13.1	12.4	14.9	15.5	15.6	15.2
3	4.5	3.6	11.5	9.5	13.6	13.1	17.6	18.2	23	22.2
7	7.3	7.6	14	13.6	16.1	16.4	24.5	22.7	27.8	27
14	8.6	9.2	16.5	15.9	18.5	17.3	27.5	28.6	29.1	30.6
28	10.8	10.2	18.8	8.1	23.3	22.7	32.4	31.5	34.5	35.7

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1 S2 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) และอายุการบ่ม วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC) และ (1.25*OMC)



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุแหล่งที่ 1ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำ(1.0*OMC) และ (1.25*OMC)

3.2 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด Unconfined Compressive Strength (UCS) ของหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาอายุการบ่ม และการใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด (1.0*OMC) จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่สูงกว่าปริมาณน้ำที่ทำให้วัสดุตัวอย่างมีความแน่นสูงสุด (1.25*OMC) เมื่อเปรียบเทียบและวัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าอีกทั้งยังสามารถทราบได้อีกว่าที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 2 % 1*OMC ที่อายุ 7 วันหินผุ แหล่งที่ 2 นี้สามารถมีค่ากำลังใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ คือ 6.9 ksc ดังแสดงในตารางที่ 18 และ 19 และภาพที่ 24 และ 25

ตารางที่ 18 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)

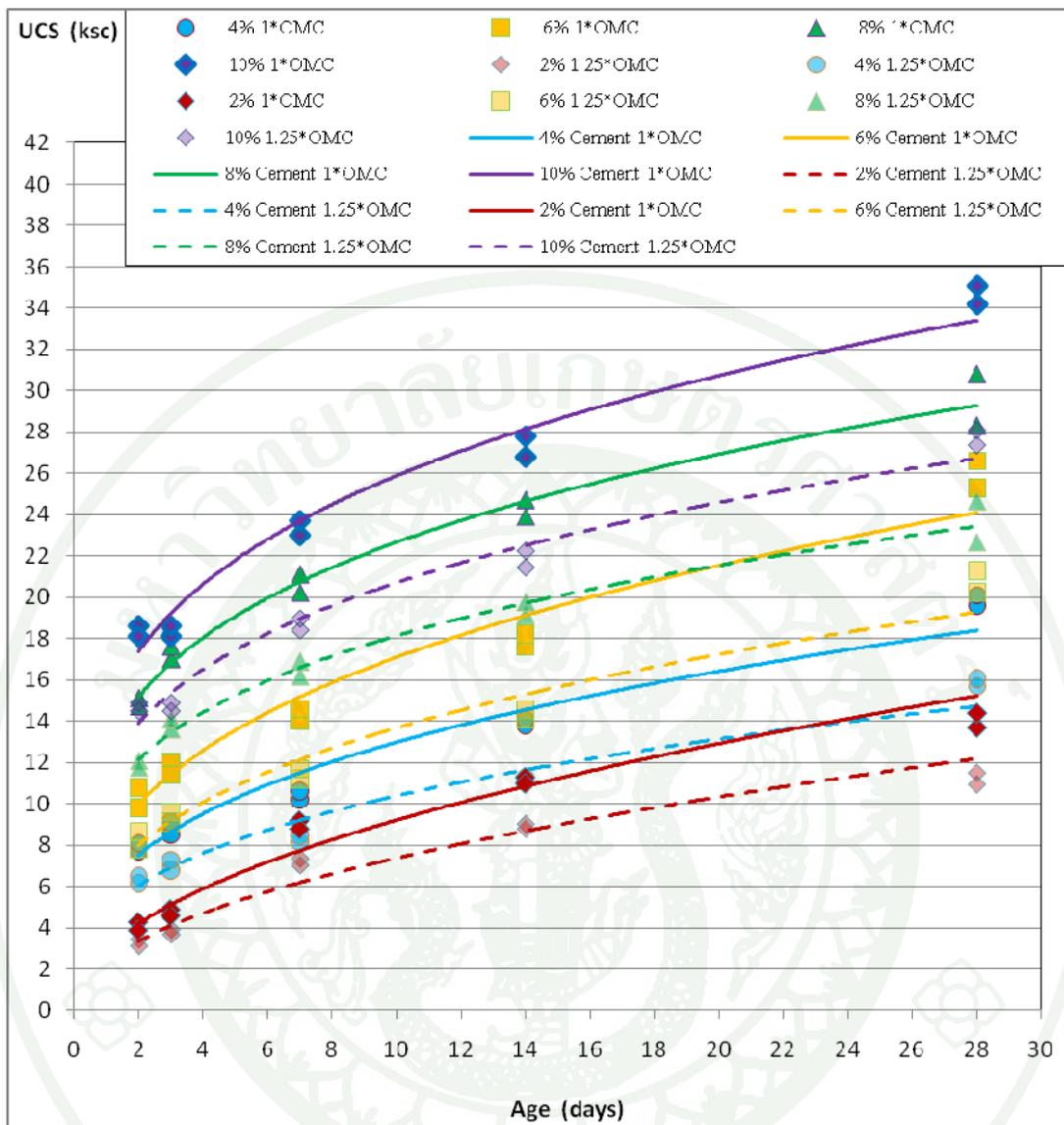
Age (day)	UCS (ksc)									
	Cement									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	4.3	3.9	7.7	8.1	10.8	9.8	15.1	14.7	18.6	18.1
3	4.9	4.6	8.5	9.1	12	11.4	17	17.6	18.1	18.6
7	9.2	8.8	10.2	10.6	14	14.6	20.2	21.1	23	23.7
14	11.3	11	13.8	14.1	17.6	18.2	23.9	24.7	26.8	27.8
28	13.7	14.4	19.6	20.1	25.3	26.6	28.3	30.8	34.2	35.1

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1 S2 ตัวอย่างที่ 2

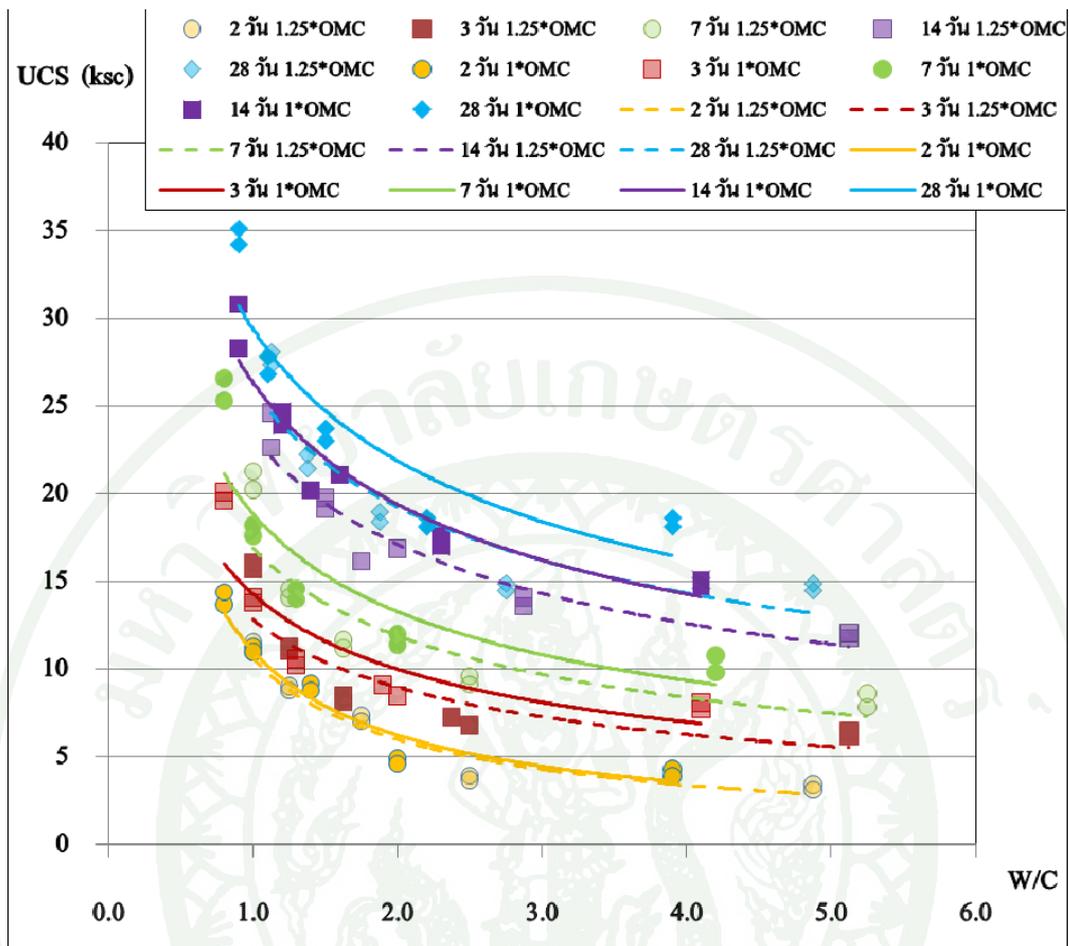
ตารางที่ 19 ผลทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)

Age (day)	UCS (ksc)									
	Cement									
	2%		4%		6%		8%		10%	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
2	3.4	3.1	6.2	6.5	8.6	7.8	12.1	11.8	14.9	14.5
3	3.9	3.7	6.8	7.3	9.6	9.1	13.6	14.1	14.5	14.9
7	7.4	7.0	8.2	8.5	11.2	11.7	16.2	16.9	18.4	19.0
14	9.0	8.8	11.0	11.3	14.1	14.6	19.1	19.8	21.4	22.2
28	11.0	11.5	15.7	16.1	20.2	21.3	22.6	24.6	27.4	28.1

หมายเหตุ S1 ตัวอย่างที่ 1 S2 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) และอายุการบ่ม วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC) และ (1.25*OMC)



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ปริมาณน้ำ (1.0*OMC) และ (1.25*OMC)

3.3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุชนิดที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง ค่า DPI จะมีค่าต่ำ และค่า Unsoaked CBR ต่ำ ค่า DPI จะมีค่าสูง กล่าวคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางตรงกันข้าม หรือมีสัดส่วนแปรผกผันกัน ดังแสดงในตารางที่ 20 และภาพที่ 26

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1ปรับปรุง
คุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

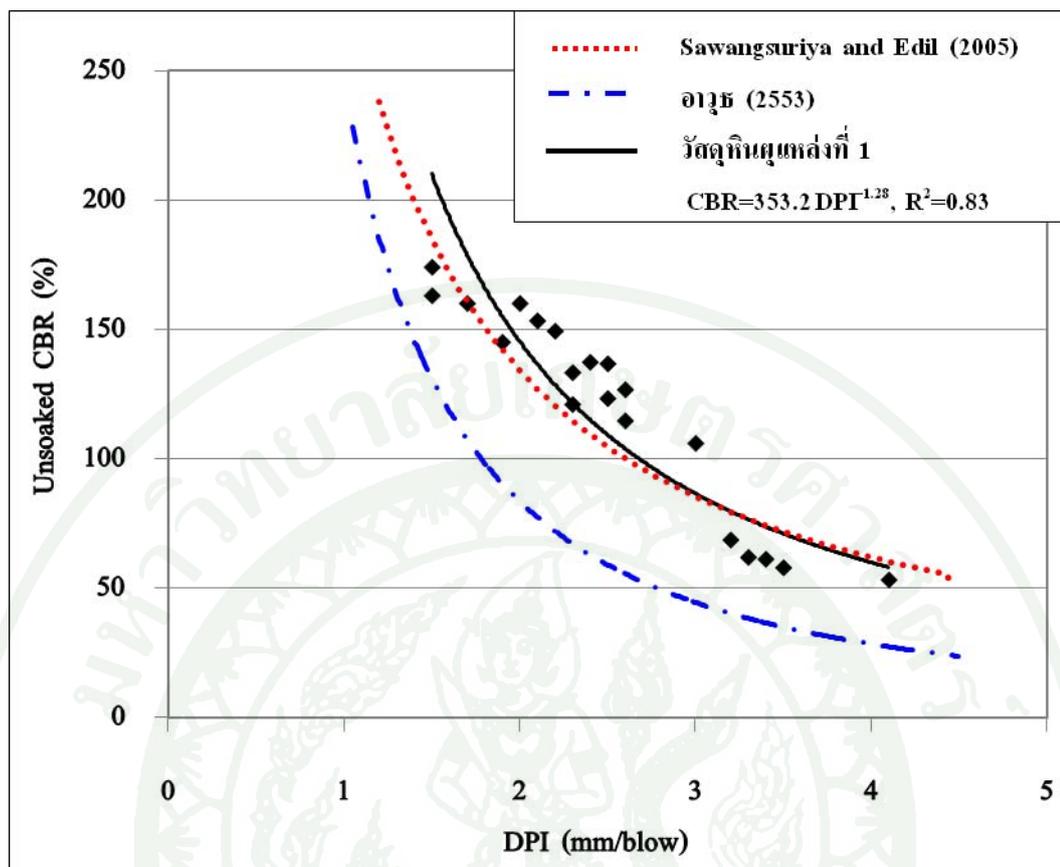
Items	Cement (%)	Age (days)	Unsoaked CBR (%)	DPI (mm/blow)	UCS (ksc)	
					S1	S2
1	2	2	62.0	3.3	4.1	3.7
2	4	2	114.7	2.6	12.2	10.3
3	6	2	136.7	2.5	14.7	13.6
4	8	2	149.3	2.2	19.6	20.9
5	10	2	160.0	1.7	25.4	24.6
6	2	3	68.7	3.2	5.0	4.9
7	4	3	121.0	2.3	12.8	13.0
8	6	3	145.0	1.9	17.0	16.0
9	8	3	163.0	1.5	23.0	24.0
10	10	3	174.0	1.5	26.9	27.0
11	2	2	58.0	3.5	3.3	3.0
12	4	2	53.3	4.1	9.8	8.0
13	6	2	123.3	2.5	11.8	10.9
14	8	2	137.3	2.4	15.7	16.7
15	10	2	126.7	2.6	20.6	19.7
16	2	3	61.3	3.4	4.0	4.0
17	4	3	106.0	3.0	10.2	10.4
18	6	3	133.3	2.3	13.6	12.8
19	8	3	153.3	2.1	18.4	19.2
20	10	3	160.0	2.0	21.5	21.6

หมายเหตุ Items 1 - 10 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)

Items 11-20 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)

S1 ตัวอย่างที่ 1

S2 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุชนิดที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง โดยที่ค่า DPI จะมีค่าต่ำ กล่าวคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางตรงกันข้ามหรือมีสัดส่วนแปรผกผันกัน ดังแสดงในตารางที่ 21 และภาพที่ 27

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

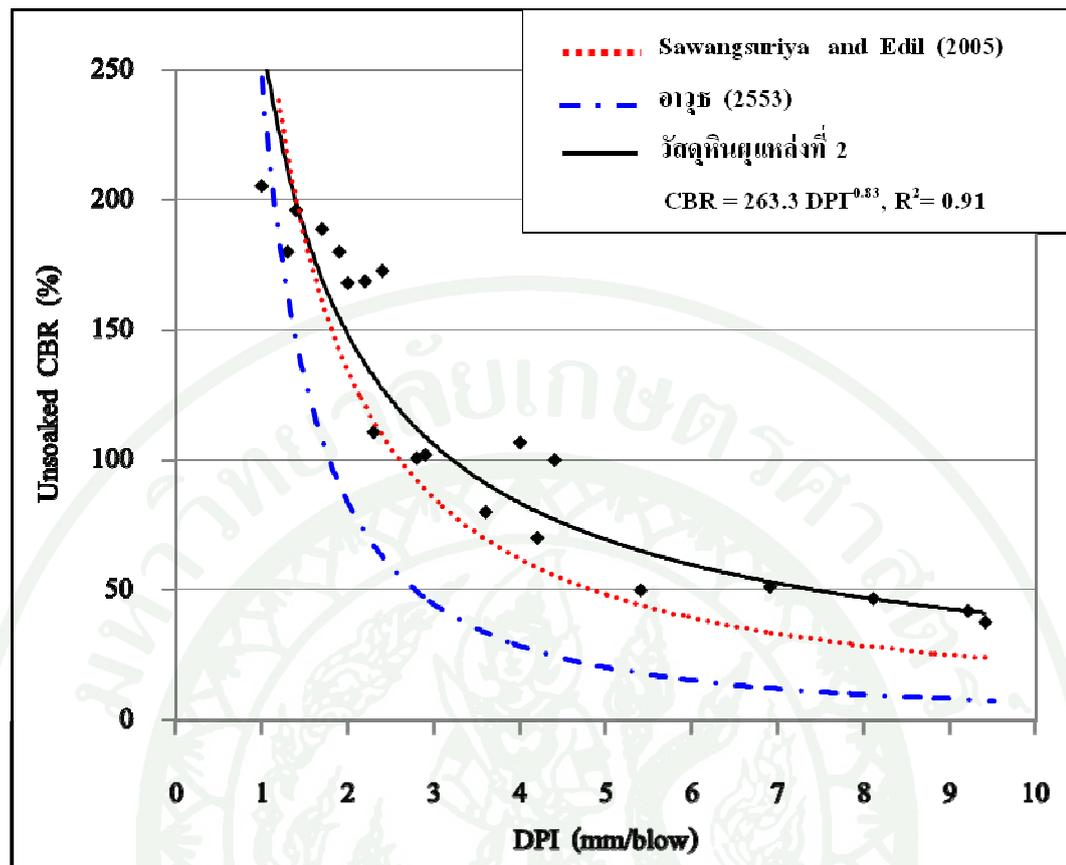
Items	Cement (%)	Age (days)	Unsoaked CBR (%)	DPI (mm/blow)	UCS (ksc)	
					S1	S2
1	2	2	50.0	5.4	4.3	3.9
2	4	2	80.0	3.6	7.7	8.1
3	6	2	102.0	2.9	10.8	9.8
4	8	2	168.0	2.0	13.8	14.3
5	10	2	196.0	1.4	15.8	16.2
6	2	3	70.0	4.2	6.5	5.9
7	4	3	100.7	2.8	11.6	12.2
8	6	3	110.7	2.3	16.2	14.7
9	8	3	180.0	1.3	20.7	21.5
10	10	3	205.3	1.0	23.7	24.3
11	2	2	37.7	9.4	3.5	3.2
12	4	2	46.7	8.1	6.4	5.7
13	6	2	106.7	4.0	7.1	6.7
14	8	2	180.0	1.9	9.6	9.1
15	10	2	168.7	2.2	12.2	11.7
16	2	3	42.0	9.2	5.3	4.8
17	4	3	51.3	6.9	9.6	8.6
18	6	3	100.0	4.4	10.7	10.1
19	8	3	188.7	1.7	14.4	13.7
20	10	3	172.7	2.4	18.3	17.6

หมายเหตุ Items 1-10 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)

Items 11-20 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)

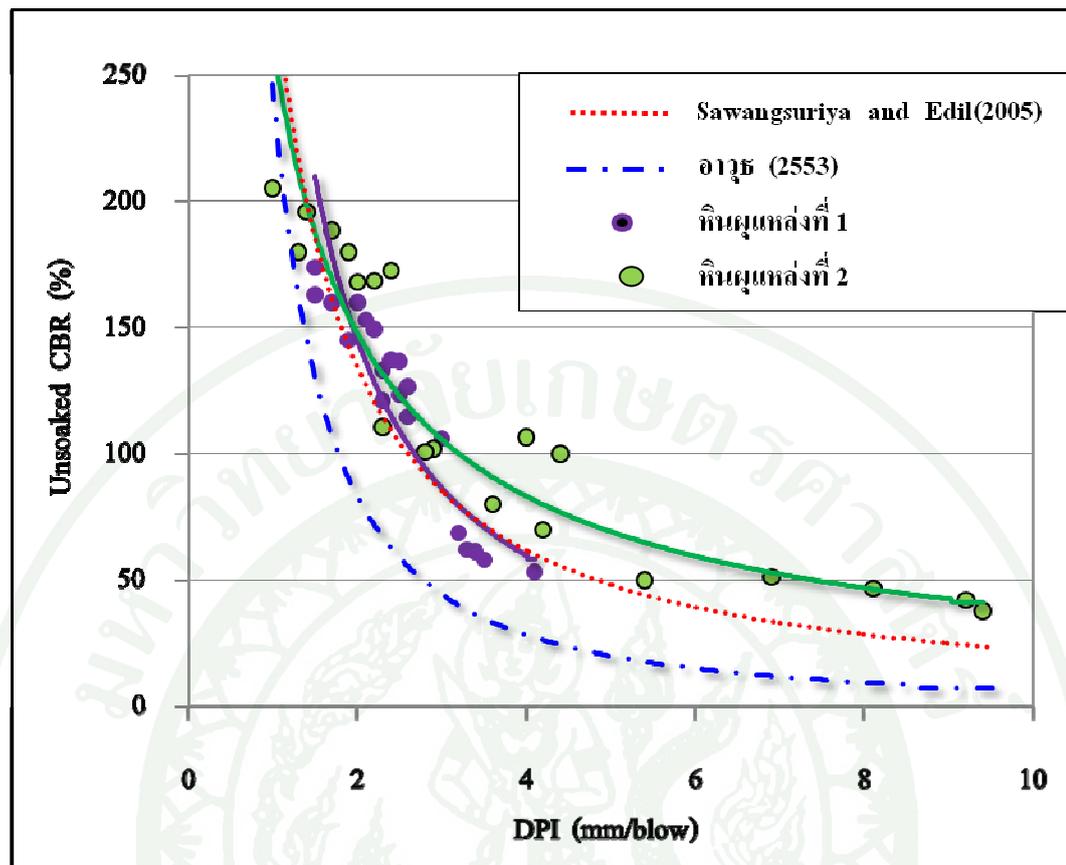
S1 ตัวอย่างที่ 1

S2 ตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อนำผลทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาเปรียบเทียบและงานวิจัยของ Sawangsurriya and Edil (2005) เห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ระยะอัตราการจมน้ำหรือค่า DPI ในช่วง 1-3 mm/blow ค่า CBR จะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Sawangsurriya and Edil (2005) แสดงว่าขนาดเม็ดวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 หลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีการขีดเรียงกันสม่ำเสมอมากขึ้นทำให้ไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 28



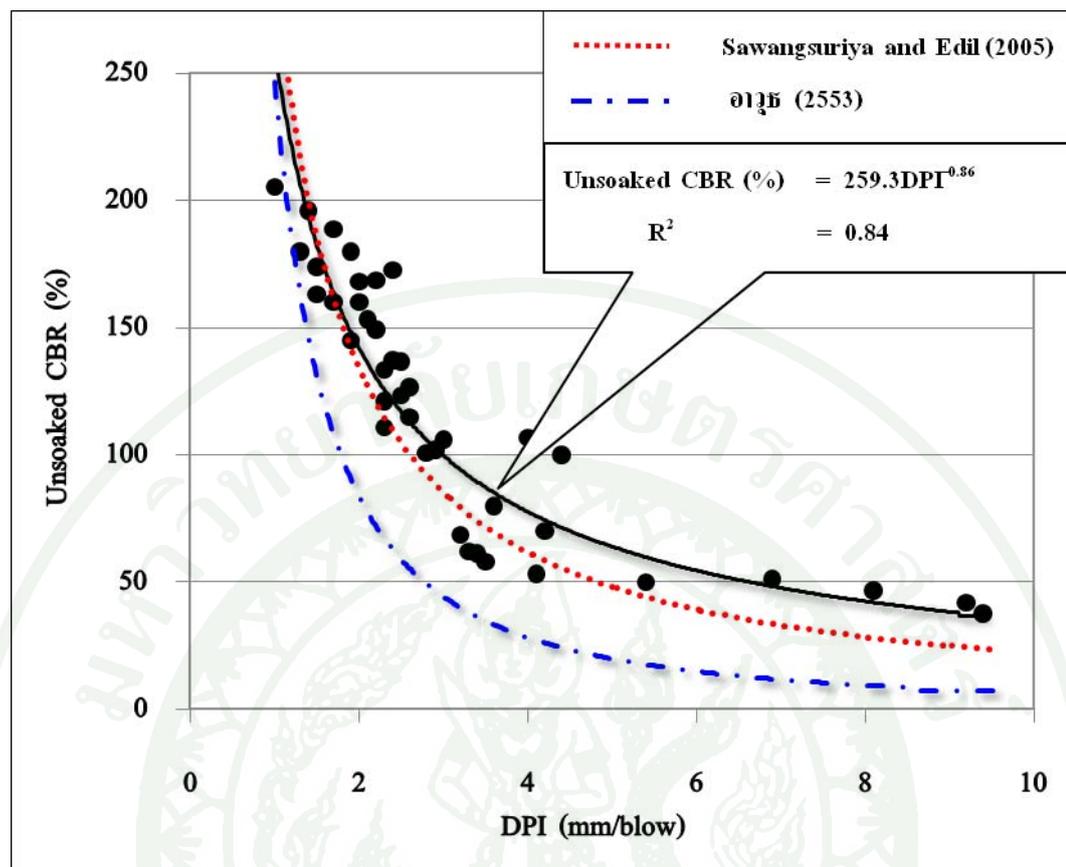
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางตรงกันข้ามกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน ดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งได้สมการของความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 27

$$\text{Unsoaked CBR} = 259.3\text{DPI}^{-0.86} \quad (27)$$

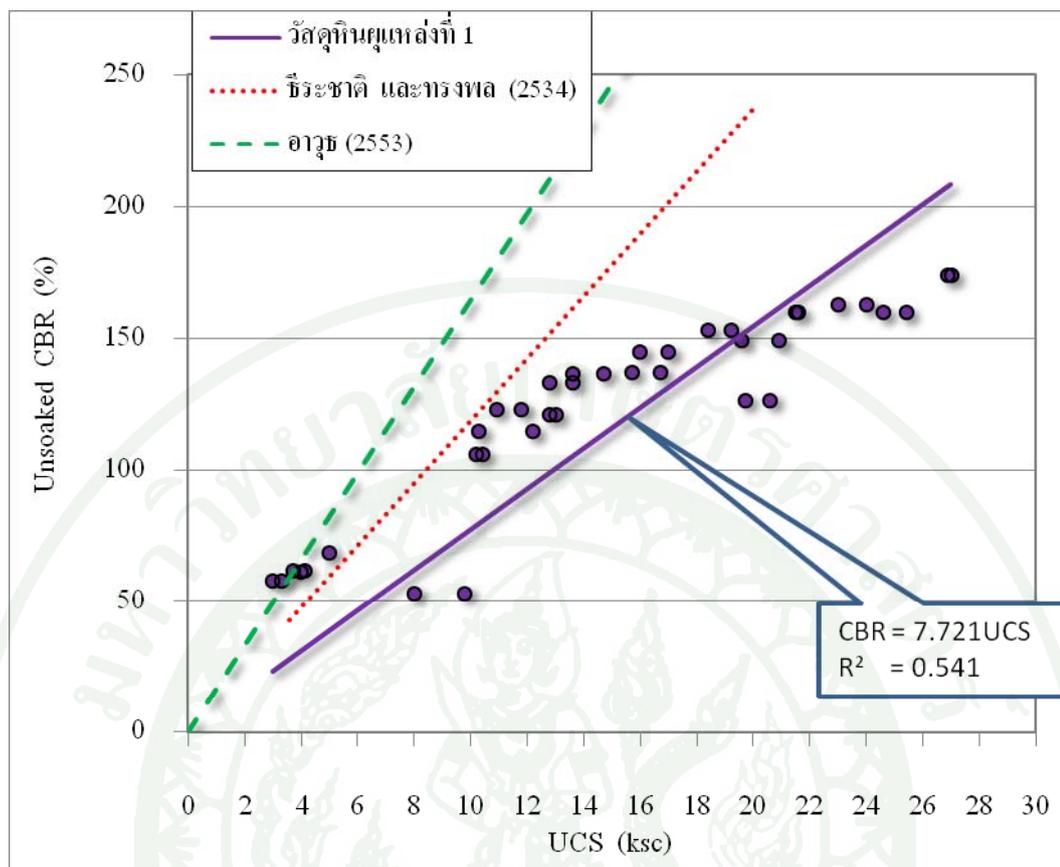
$$R^2 = 0.84$$

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



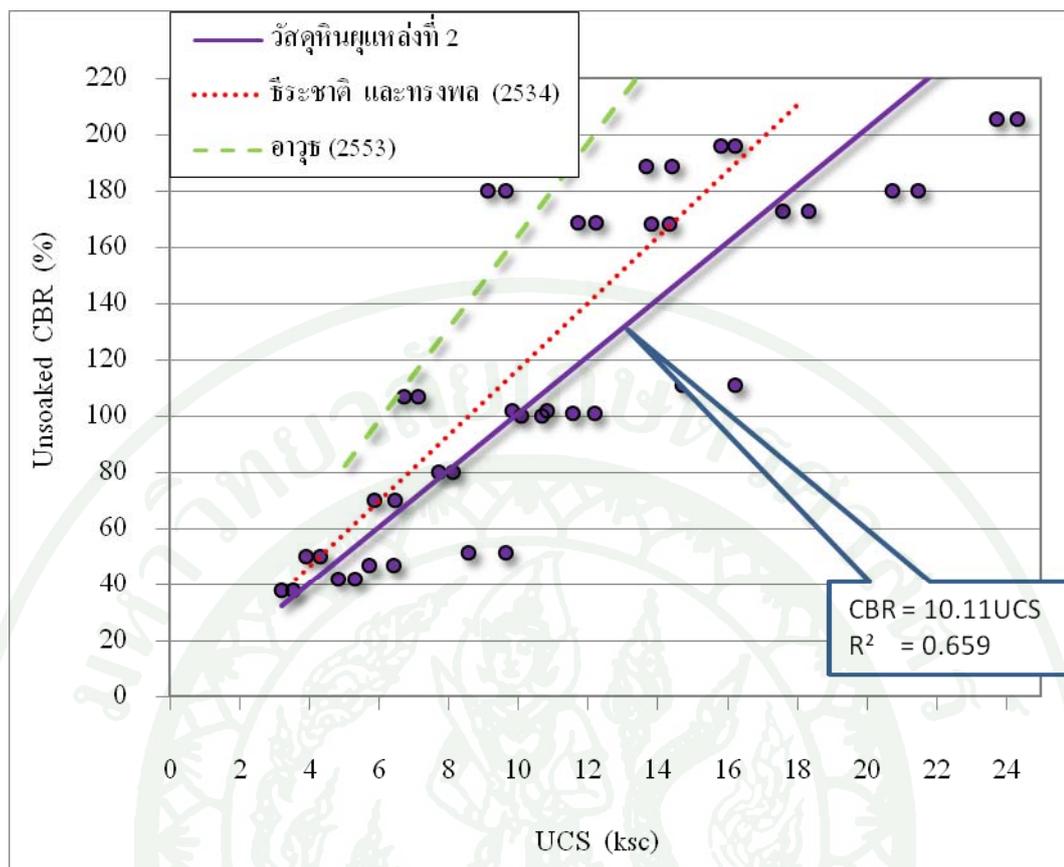
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ของวัสดุวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.4 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง ค่า UCS จะมีค่าสูง กล่าวคือแนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันหรือมีสัดส่วนแปรผันตรงกัน ดังแสดงในภาพที่ 30



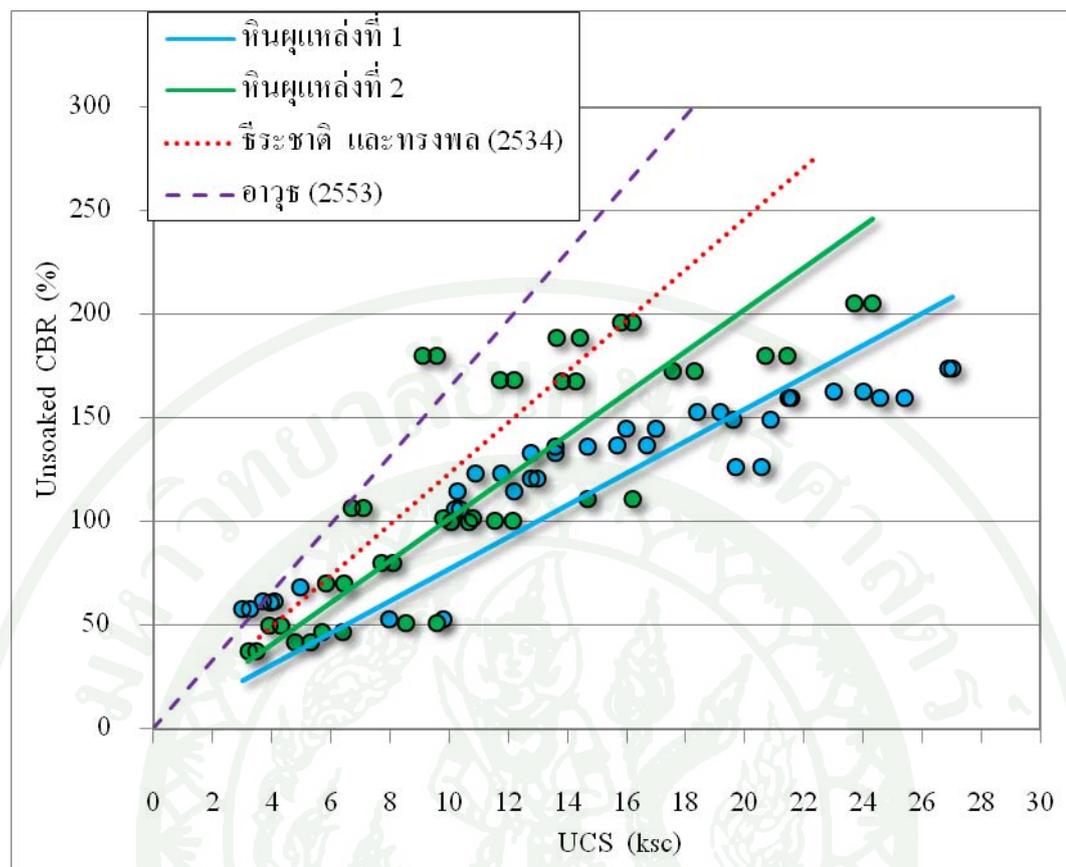
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.5 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามปริมาณต่างๆ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อค่า Unsoaked CBR สูง ค่า UCS จะมีค่าสูง กล่าวคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันหรือมีส่วนแปรผันตรงกัน ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อนำผลทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาเปรียบเทียบและงานวิจัยของ ชีระชาติ และทรงพล (2534); อวูธ(2553) พบว่าลักษณะของเส้นกราฟจากการทดสอบมีแนวโน้มต่ำกว่างานวิจัยของ ชีระชาติ และทรงพล (2534); อวูธ (2553) ดังแสดงในภาพที่ 32



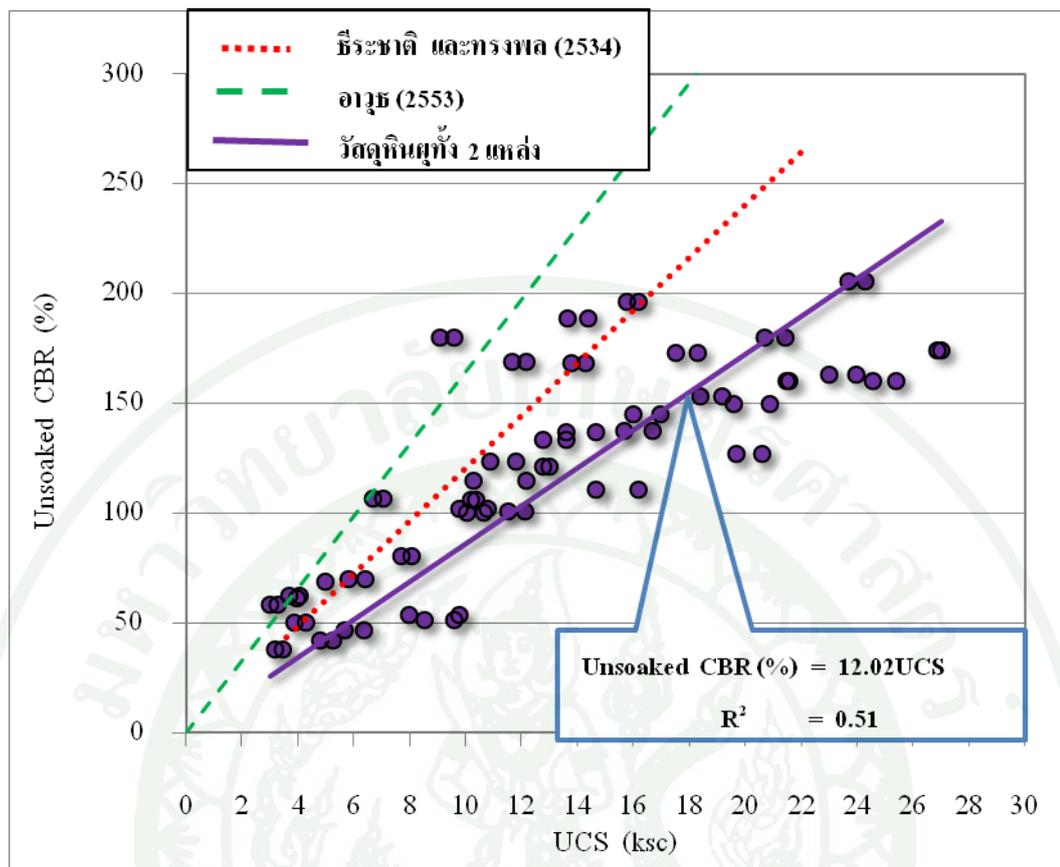
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการทดสอบเห็นได้อย่างชัดเจนคือ แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน ดังแสดงในภาพที่ 33 ซึ่งจะได้สมการของความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 28

$$\text{Unsoaked CBR} = 12.02\text{UCS} \quad (28)$$

$$R^2 = 0.51$$

โดย Unsoaked CBR = มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
UCS = มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)



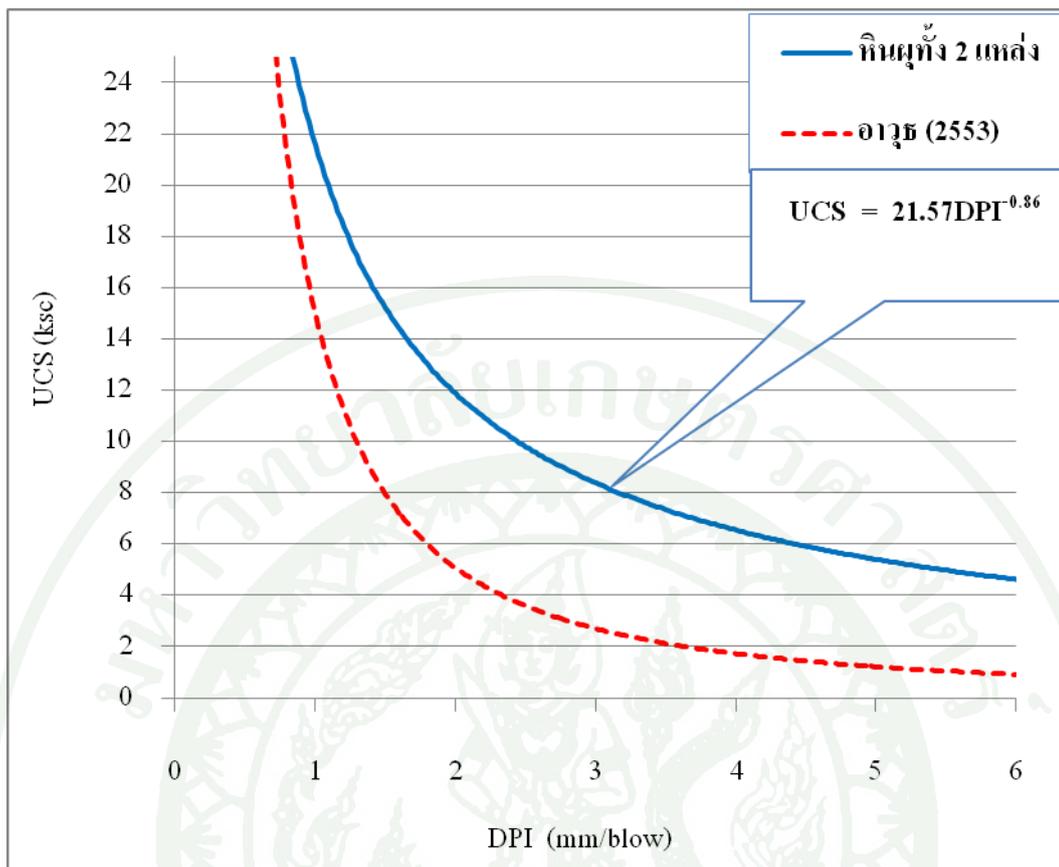
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS ของวัสดุหินผุทั้งสองแหล่งรวม ข้อมูลปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อนำสมการที่ 27 และ 28 มาหาความสัมพันธ์กัน จะได้สมการที่ 29 และภาพที่ 34

$$\text{Unsoaked CBR} = 259.3\text{DPI}^{-0.86} \tag{27}$$

$$\text{Unsoaked CBR} = 12.02\text{UCS} \tag{28}$$

$$\text{UCS (ksc)} = 21.57\text{DPI}^{-0.86} \tag{29}$$

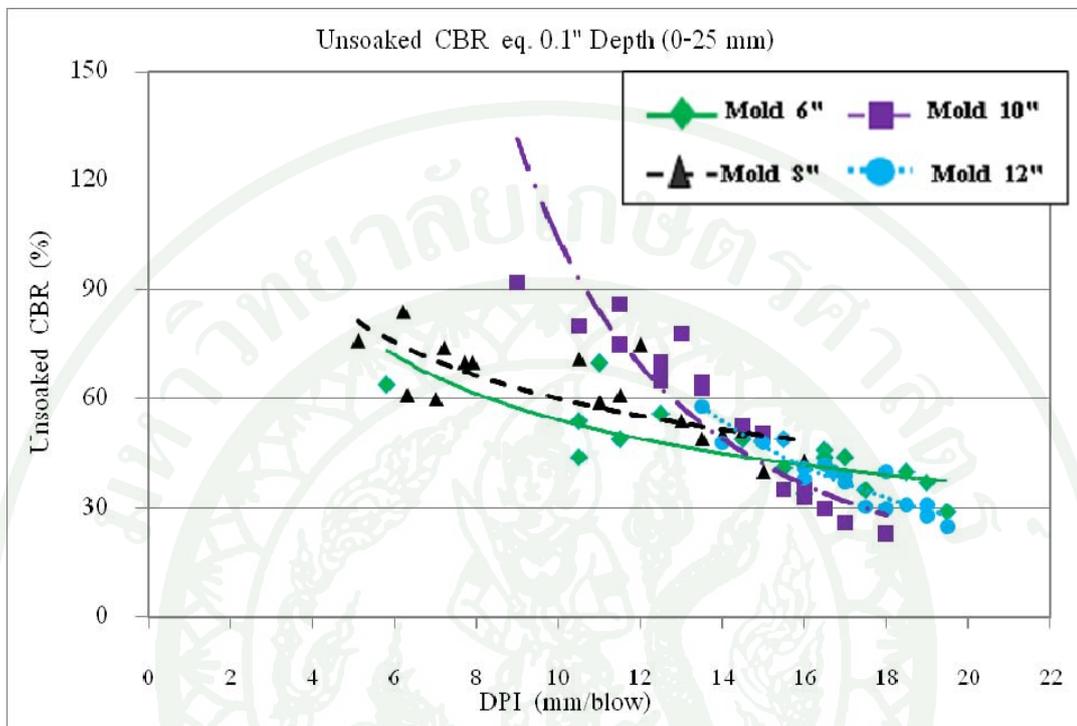


ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และ DPI ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

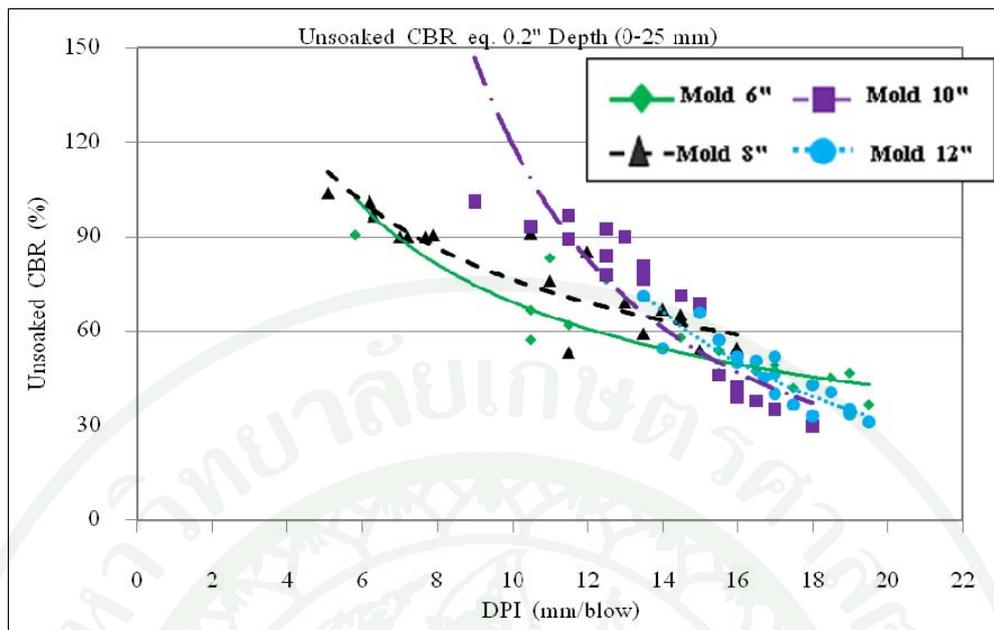
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ซึ่งมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันทางสถิติศาสตร์ ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 27, 28 และ 29 สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่า Field CBR ในสภาพจริงของชั้นทางถนน และยังช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินและทำนายความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางเพื่องานตรวจสอบวิเคราะห์และควบคุมงานก่อสร้างชั้นทางได้อย่างรวดเร็ว

จากการทดลองในข้างต้นนั้นจะเห็นได้ว่าการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ต่างที่ได้นั้นได้ทำในห้องทดลองซึ่งอาจจะมีข้อแตกต่างจากการทำงานจริงทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้เห็นข้อแตกต่างและใช้ในการอ้างอิงให้ใกล้เคียงและการก่อสร้างหน้างาน นั่นคือการเปลี่ยนขนาด Mold เป็นแต่ละขนาดดังนี้คือ 6, 8, 10 และ 12 นิ้ว ตามลำดับ เพื่อหาผลกระทบแรงดัน

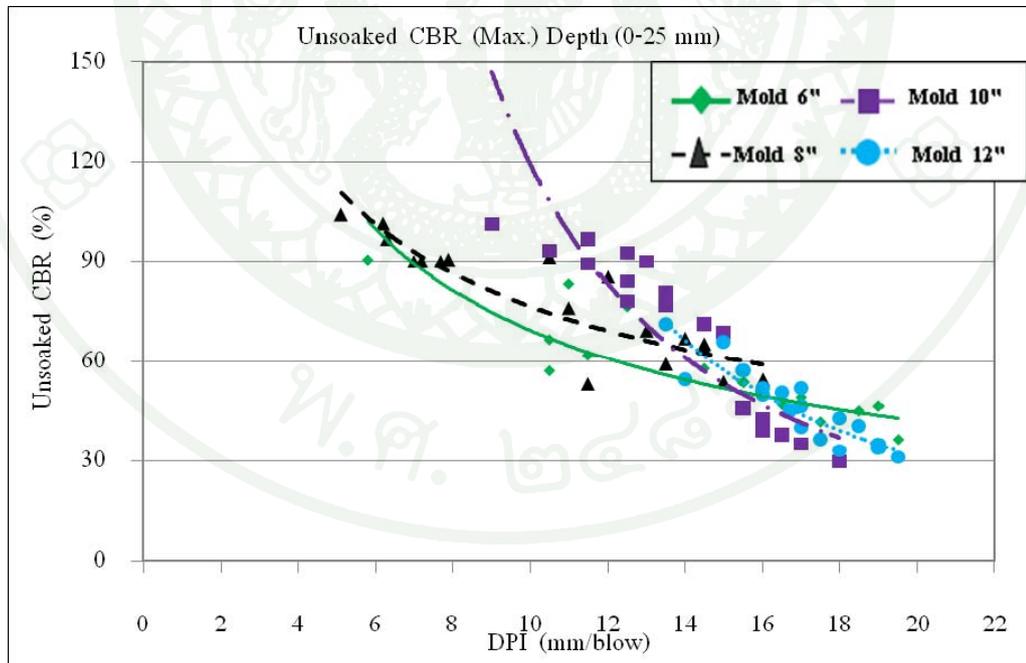
ด้านข้างของตัว Mold ว่าจะมีผลกระทบเล็กน้อยเพียงใดและการทดลอง ได้ผลการทดลองดังแสดง
 ในภาพที่ 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 และ 43



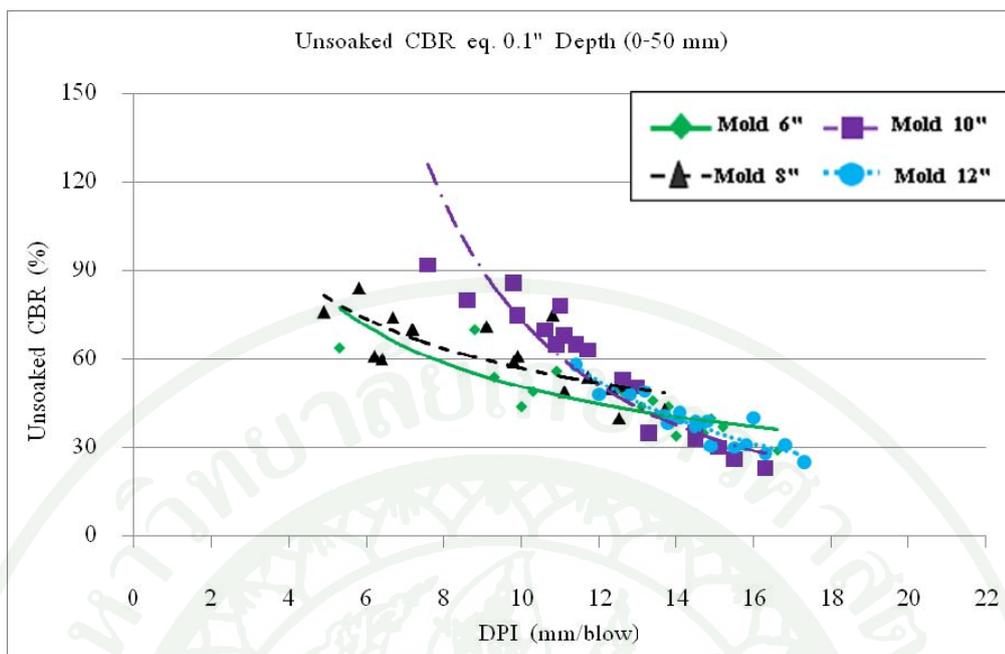
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR eq 0.1" และ DPI (0-25mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



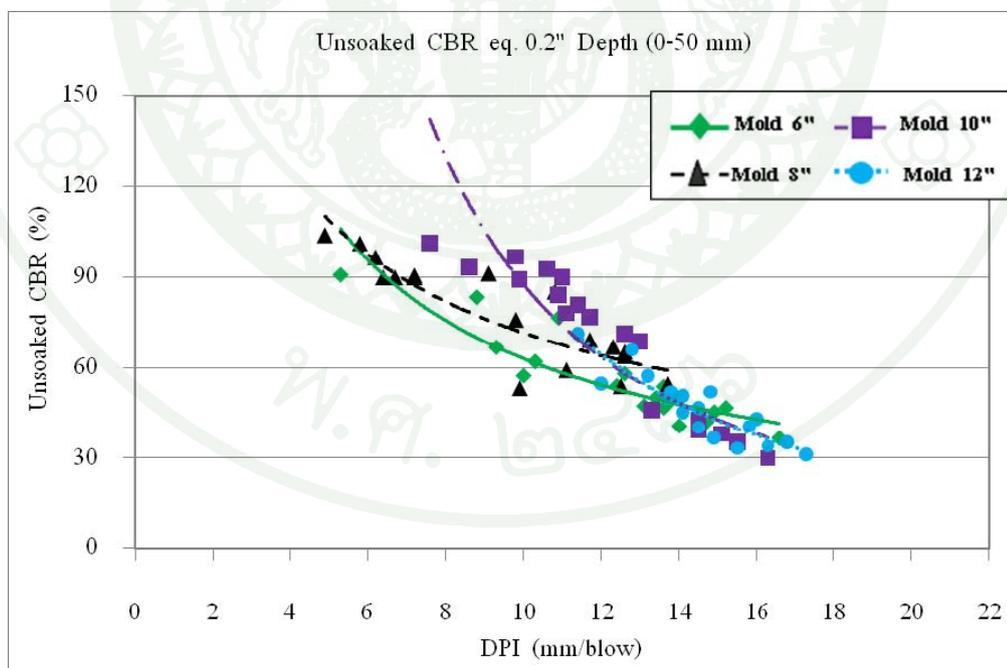
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR eq. 0.2" และ DPI (0-25mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



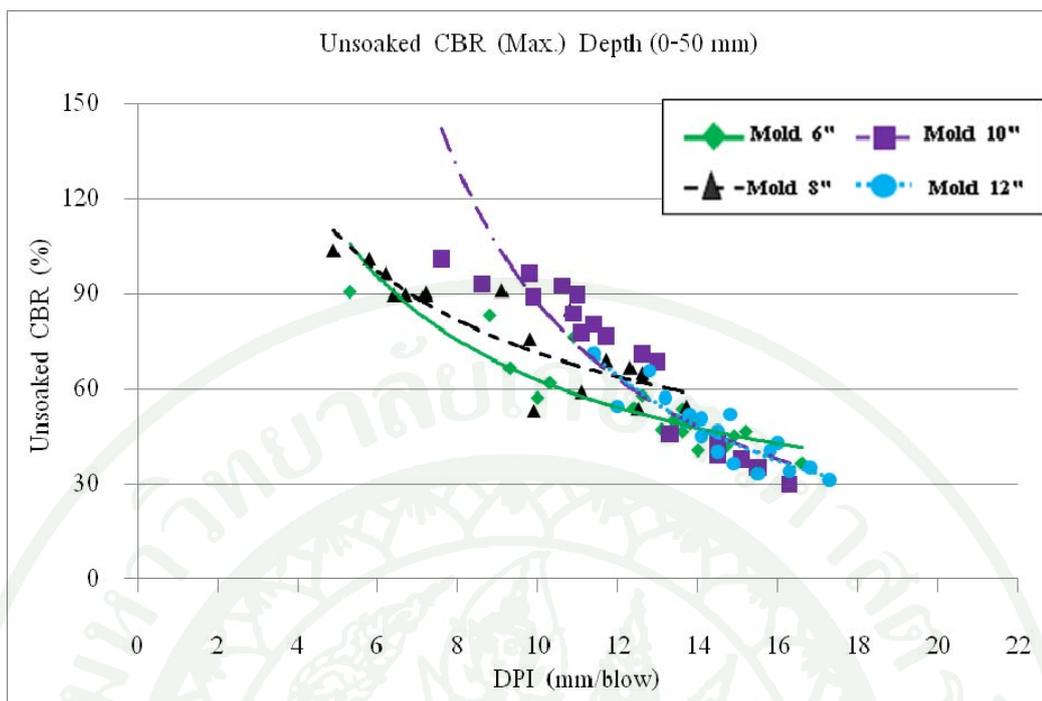
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR Max และ DPI (0-25mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



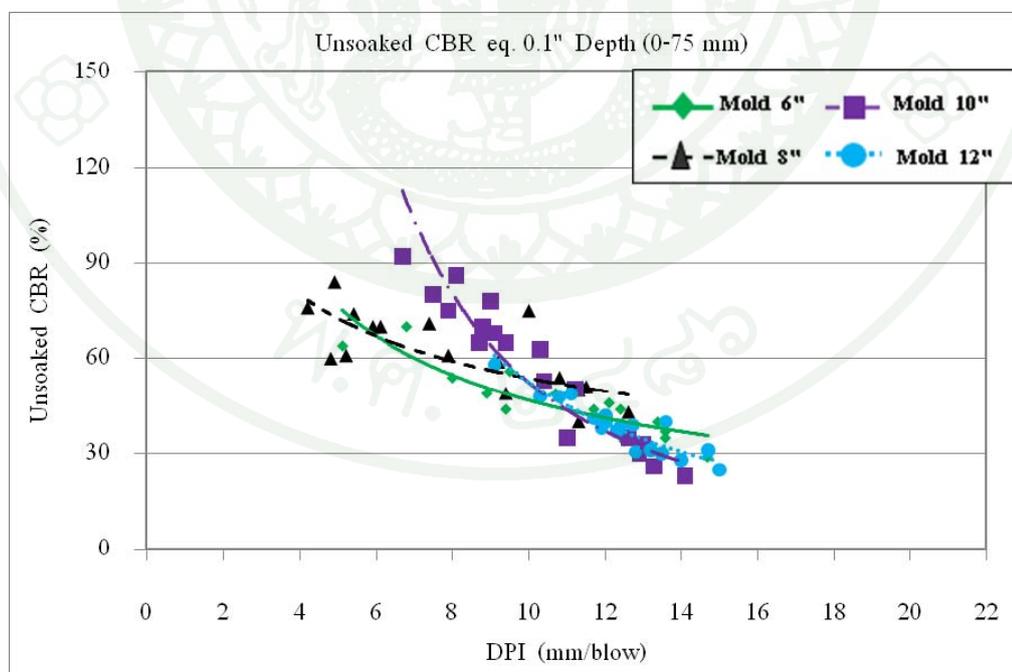
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR eq.0.1" และ DPI (0-50mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



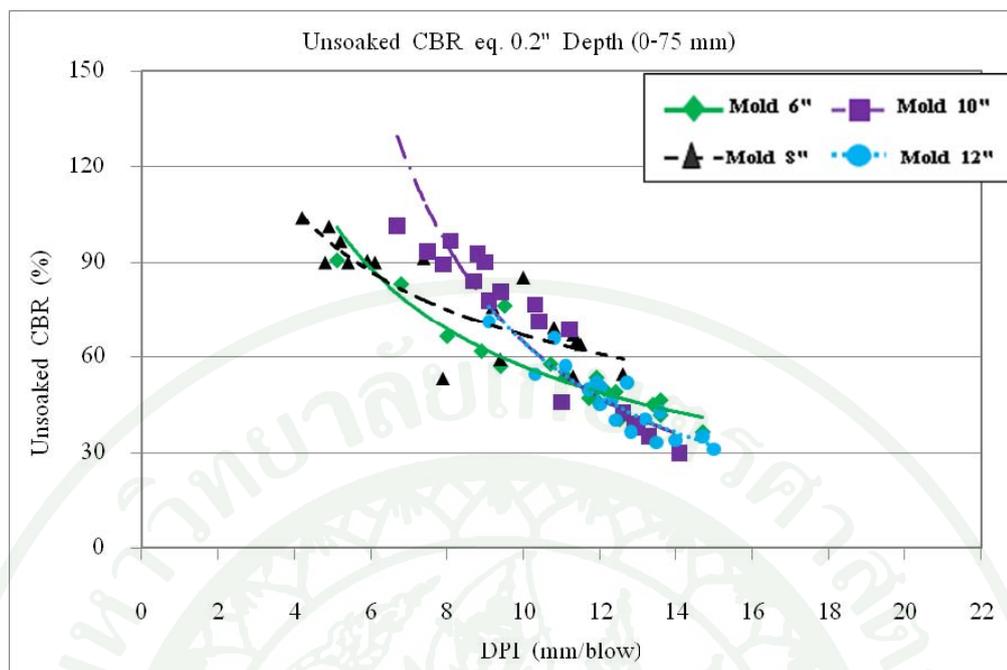
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR eq.0.2" และ DPI (0-50mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



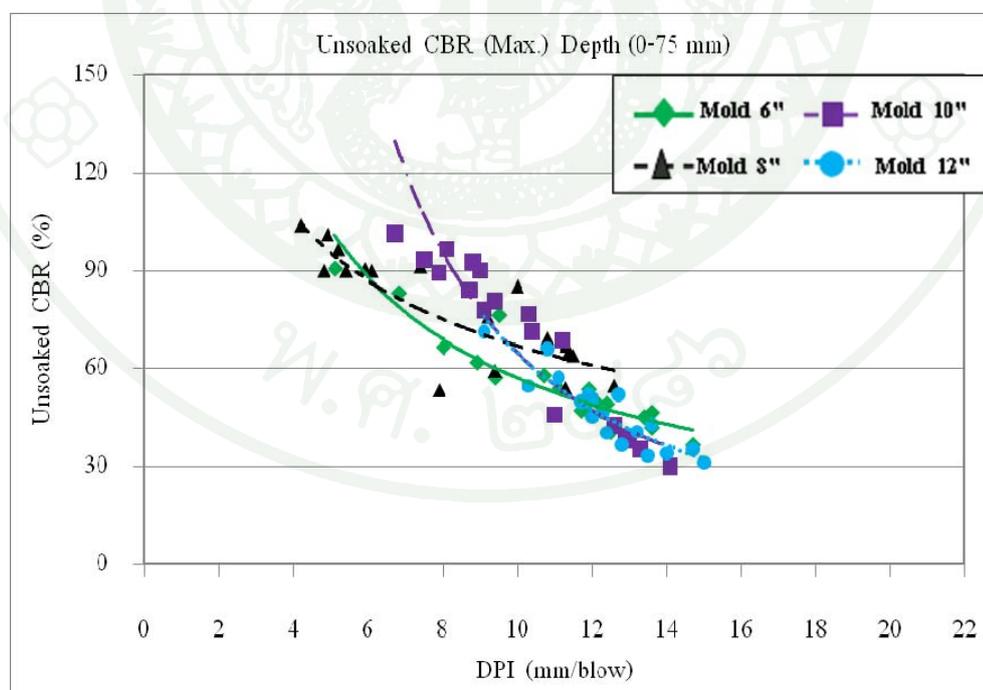
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR Max และ DPI (0-50mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR eq.0.1" และ DPI (0-75mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR eq.0.2" และ DPI (0-75mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ค่า Unsoaked CBR Max และ DPI (0-75mm) ในการเปลี่ยนขนาด Mold ของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากการทดลองในการเปลี่ยนขนาด Mold เพื่อศึกษาผลกระทบจากแรงดันทางข้างของแบบเหล็กที่ทำ Mold นั้นจะพบว่าขนาด Mold 6" และ 8" นั้นแรงดันทางข้างนั้นมีผลต่อการทดลองซึ่งค่าที่ได้นั้นยังคงมีการเปลี่ยนแปลงดังได้แสดงให้เห็นจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง Unsoaked CBR และ DPI ข้างต้น แต่ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนขนาด Mold เป็น 10" และ 12" นั้นความสัมพันธ์แทบจะเป็นกราฟเส้นเดียวกันจึงสามารถคาดคะเนได้ว่าขนาดของ Mold จะเริ่มไม่ผลกระทบเมื่อขนาดใหญ่ตั้งแต่ขนาด ประมาณ 10" เป็นต้นไปและขนาดของ Mold ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันทางข้างของ Mold นั้นมีค่าใกล้เคียงและสภาพหน้างานก่อสร้างจริงจึงสามารถเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในการอ้างอิงและศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

วิจารณ์

1. การศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพวัสดุหินผุ

1.1 วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 มีสีขาวเม็ดวัสดุมีลักษณะเป็นฝุ่นมีเม็ดละเอียดผสมอยู่มาก สัดส่วนขนาดละเอียดสม่ำเสมอ มีสีขาว เม็ดวัสดุมีการขีดเรียงกันสม่ำเสมอทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้นน้อย

1.2 วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 มีสีแดงขนาดเม็ดวัสดุมีลักษณะหยาบมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อยมีลักษณะหยาบ สัดส่วนขนาดละเอียดและการขีดเรียงกันไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 จึงทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้นมาก

1.3 ความหนาแน่นของวัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 มากกว่าวัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 หรืออาจกล่าวได้ว่า γ_{\max} หินผุ แหล่งที่ 1 > γ_{\max} หินผุ แหล่งที่ 2

2. การศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุหินผุ ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1 วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูงขึ้น จากผลการทดสอบค่า UCS และ Unsoaked CBR พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดจะสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและระยะการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ (1.0*OMC) ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ (1.25*OMC) ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI พบว่าแนวโน้มของความสัมพันธ์

มีลักษณะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS พบว่าแนวโน้มของความสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน

2.2 วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 เมื่อนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักได้สูงขึ้น จากผลการทดสอบ UCS และ Unsoaked CBR พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดจะสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นและระยะการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ $(1.0 \cdot OMC)$ ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ $(1.25 \cdot OMC)$ ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI พบว่าแนวโน้มของความสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผกผันกันความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS พบว่าแนวโน้มของความสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน

2.3 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกต่างๆ สามารถวิจารณ์ผลการทดสอบได้ดังนี้ ที่ระดับความลึก 0 – 25 มม. พบว่าเส้นกราฟจากการทดสอบมีแนวโน้มในทางเดียวกับผลงานวิจัยของ Sawangsurriya and Edil (2005) และ อาวุธ (2553) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่าและ 0.81 ค่าที่สุด ที่ระดับความลึก 0 – 50 มม. พบว่าเส้นกราฟจากการทดสอบยังคงมีแนวโน้มเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Sawangsurriya and Edil (2005) และ อาวุธ โพรธิอุคม (2553) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.80 และที่ระดับความลึก 0 – 75 มม. พบว่าเส้นกราฟจากการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Sawangsurriya and Edil (2005) และ อาวุธ (2553) และ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่าและ 0.84 สูงที่สุด กราฟมีการกระจายตัวน้อยลง ซึ่งแสดงว่าที่ระดับความลึก 0 – 75 มม. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI มีความสัมพันธ์กันดีมาก ดินมีความแน่นมาก มีแรงดันดินด้านข้างสูง ดังนั้นดินจึงมีความแข็งแรงที่ดี กราฟมีการกระจายตัวน้อยลงส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูง ซึ่งค่า R^2 ที่ได้นั้นบ่งบอกถึงกระจายตัวของข้อมูลนั้นคือยิ่ง R^2 มีค่าสูงเท่าใดการกระจายตัวจะมีค่าน้อยส่งผลทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นตามลำดับ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการศึกษาประเมินความแข็งแรงของวัสดุหินผุทั้งสองแหล่งผสมปูนซีเมนต์บดทับแน่นในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือ Dynamic Cone Penetrometer ทำให้ทราบค่าคุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. คุณสมบัติด้านกายภาพวัสดุหินผุ

1.1 วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 เมื่อดำเนินการมีเม็ดละเอียดผสมอยู่มาก สัดส่วนขนาดคละสม่ำเสมอ มีค่าดัชนีพลาสติกเป็น NP (Non-Plastic) ค่าความถ่วงจำเพาะเท่าและ 2.87 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification อยู่ในกลุ่ม GP และจำแนกตามระบบ AASHTO จัดอยู่ในกลุ่ม A-3

1.2 วัสดุหินผุแหล่งที่ 2 เมื่อดำเนินการมีเม็ดละเอียดผสมอยู่น้อยสัดส่วนขนาดคละไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบและวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 มีค่าดัชนีพลาสติกเป็น NP (Non-Plastic) ค่าความถ่วงจำเพาะเท่าและ 2.83 เมื่อจำแนกตามระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในกลุ่ม GP และจำแนกตามระบบ AASHTO จัดอยู่ในกลุ่ม A-3

2. คุณสมบัติด้านวิศวกรรมวัสดุหินผุ ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1 วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า UCS มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ $1.0 \cdot OMC$ ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ $1.25 \cdot OMC$ และที่อายุ 7 วัน ปูนซีเมนต์เพียง 2% เป็นปริมาณที่เพียงพอสำหรับค่ามาตรฐานของ UCS นั่นคือประมาณ 7 ksc

2.2 วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า UCS มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ $1.0*OMC$ ค่ากำลังรับแรงอัดจะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ $1.25*OMC$ เมื่อเปรียบเทียบและวัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มเดียวกัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่าและที่อายุ 7 วัน ปูนซีเมนต์เพียง 2% เป็นปริมาณที่เพียงพอสำหรับ ค่ามาตรฐานของ UCS นั้นคือประมาณ 7 ksc

2.3 วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่ม การใช้ปริมาณน้ำที่ $1.0*OMC$ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR จะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ $1.25*OMC$ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR สูง โดยที่ค่า DPI ต่ำ

2.4 วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มการใช้ปริมาณน้ำที่ $1.0*OMC$ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR จะสูงกว่าการใช้ปริมาณน้ำที่ $1.25*OMC$ ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR สูง โดยที่ค่า DPI ต่ำ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวตรงกันข้าม คือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน $Unsoaked\ CBR = 259.3DPI^{-0.86}$, $R^2=0.84$

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ UCS แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ มีสัดส่วนแปรผันตรงกัน $Unsoaked\ CBR = 12.02UCS$, $R^2 = 0.51$

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า UCS และ DPI แนวโน้มของความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นไปในแนวตรงกันข้าม คือ มีสัดส่วนแปรผกผันกัน $UCS\ (ksc) = 21.57DPI^{-0.86}$

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

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันทางสถิติศาสตร์สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดค่า Field CBR ในสภาพจริงของชั้นทางช่วยให้อวิศวกรสามารถประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางในวัสดุที่เป็นหินผุจาก 2 แหล่งที่ทำการศึกษาเท่านั้น นั่นคือจากจังหวัดสุพรรณบุรีและจังหวัดลพบุรีได้และสามารถใช้เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบวิเคราะห์และควบคุมงานก่อสร้างชั้นทางต่อไป

3.6 จากความสัมพันธ์ $UCS (ksc) = 21.57DPI^{0.86}$ สามารถตรวจสอบมาตรฐานของดินซีเมนต์ชั้นรองพื้นทางได้โดยมาตรฐานชั้นรองพื้นทางของดินซีเมนต์กำหนดค่า $UCS (ksc) = 6.9 ksc$ ซึ่งจากความสัมพันธ์ทำให้ได้ค่า $DPI = 3.75 \text{ mm/bolw}$ และค่านี้สามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพสภาพหน้างานได้อย่างรวดเร็ว

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ของวัสดุชนิดอื่นปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น ดินลูกรัง ดินเหนียว และ ทราช เป็นต้น เพื่อให้ทราบข้อมูลเพิ่มเติม
2. ควรศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR, DPI และ UCS ของวัสดุหินผุ ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสภาพหน้างานจริง เพื่อการเปรียบเทียบและทราบข้อมูลเพิ่มเติม

3. เพื่อให้การทดลองใกล้เคียงค่าความจริงหรือสภาพหน้างานในการทดลอง CBR และ DPI ควรใช้ขนาด Mold ใหญ่ขนาดประมาณตั้งแต่ 10 นิ้วขึ้นไปจะทำให้ผลที่ได้ใกล้เคียงสภาพหน้างานจริงมากที่สุด

4. ในการศึกษาค่า CBR และ DPI ในห้องปฏิบัติการการศึกษาควรหาผลกระทบจากการกลับด้านในการทดสอบเนื่องจากในชั้นแรกที่มีการบดอัดนั้นจะมีความแน่นสูงกว่าชั้นสุดท้ายหรือด้านบนสุดที่ใช้ทำการทดสอบ CBR ซึ่งในขณะที่ทำการหาค่า DPI นั้นจะต้องทำการกลับด้านของ Mold จึงทำให้ชั้นล่างที่ได้รับการบดอัดแน่นสะสมนั้น รับแรงกระทำจากเครื่องมือ DCP จึงอาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทางหลวง. 2532. **มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมปูนซีเมนต์**. มาตรฐานวัสดุงานทาง (ทล.ม.203). ศูนย์วิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

คชินท์ สายอินทวงศ์. 2553. แหล่งที่มา: http://www.thaiceramicsociety.com/rm_soil_pottery_stone.php

จิรพัฒน์ โขติไกร. 2529. **การออกแบบทาง**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

_____. 2549. **การออกแบบทาง**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

_____. และทรงพล บุญมาดี. 2534. **ความสัมพันธ์ระหว่าง UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH และ UNSOAKED CBR**. รายงานฉบับที่ วว. 125 กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และมีฤกษ์ พัชร. 2543. **การศึกษากำลังอัดของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์**. รายงานฉบับที่ วพ. 177. ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

_____. และอนันต์ ทวีวรรณสดี. 2543. **คุณสมบัติความเค้นความเครียดของวัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแนวตั้ง**. รายงานฉบับที่ วพ. 179 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

_____. และพรพรม จันทร์เจริญ. 2544. **การหาความสัมพันธ์ระหว่าง DCP และ UNSOAKED CBR ของดินและวัสดุผสมรวมในห้องปฏิบัติการ**. รายงานฉบับที่ วพ. 180 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

ประสิทธิ์ ภู่อประทุม. 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.

Bureau of Materials and Physical Research. **ผิดพลาด! การอ้างอิงการเชื่อมโยงหลายมิติไม่ถูกต้อง**

Catton, M.D. 1938. **Soil-Cement Mixtures for Roads**. Highway Research Board Proceeding. Vol.18.Part II,pp.314-321

Davidson, D.T. 1961. **Soil Stabilization with Portland Cement**. Highway Research Board Bull 292. National Research Council. Washing. D.C. U.S.A.

Highway Research Board Committee on Soil-Cement Stabilization. 1969. **Definition of term Relating to Soil-Portland Cement Stabilization**. Highway Research Abstracts. 29 (6): 28-129.

Hodges, J. W., J. Rolt and T.E Jones. 1975. **The Kenya road transport cost study: research on road deterioration**. TRRL Research Report LR 673. Transport and Road Research Laboratory , Crowthorne, UK.

Kleyn, E.G. and P.E. Savage. **“The Application of the Pavement DCP to determine the Bearing Properties and Performance of Road Pavements,”** International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trodheim, Norway.

Lambe, T.W., A.S. Mitcheals and Z.C. Moh. 1959. **Improvements of Soil Cement with Alkali Metal Compound**. Highway Research Board. Bulletin 241. pp. 67-103

Mill, W. J. 1935. Road Base Stabilization with Portland Cement. **Engineering News-Research**
Vol. 115. No 22. pp. 751-753

Mitchell, J.K. 1982. **Soil Improvement-State-of-The-Art**. Report Proceeding XICSMFE.
Vol. 4. pp. 533-537

Moh, Z.C. 1965. **Reaction of Soil Mineral with Cement and Chemicals**. Highway Research
Record. No. 86. pp. 33-61

Portland Cement Association (1956). **Summaries of Soil-Cement Construction**. Yearly
Supplement. SC-104-1956 Supplement. pp. 1-7

Portland Cement Association. 1950. **Soil-Cement Laboratory Handbook**. Illinois. Skokie.

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.

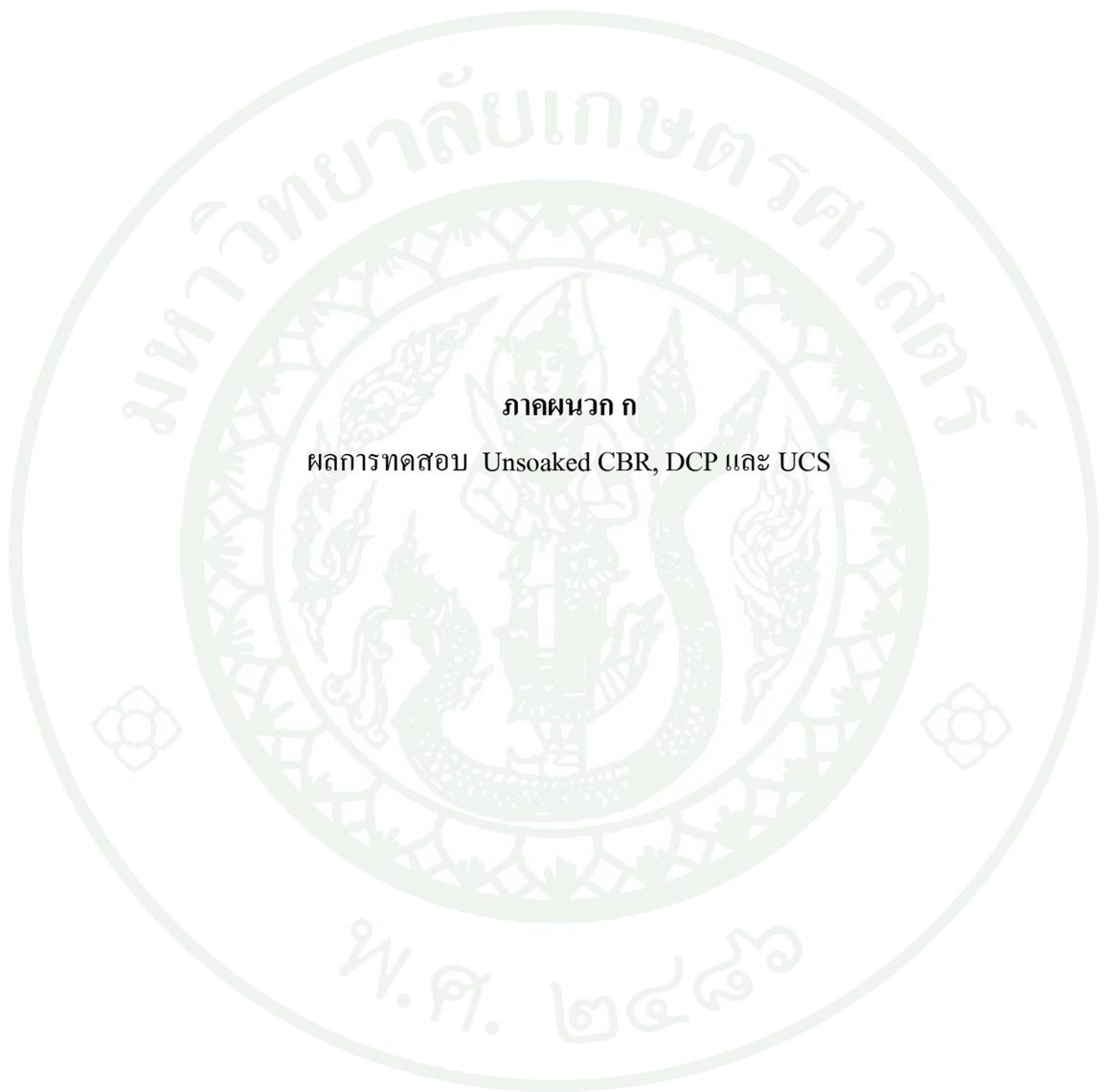
Siekmeier, J.A., T. Burnham, and D. Beberg. 1998. **“Mn/DOT’s New Base Compaction
Specification Based on the Dynamic Cone Penetrometer,”** 46th Geotechnical
Engineering Conference, University of Minnesota.

Terrel, R.L., Barenberg, E.J., Mitchell, J.M. and Thomson, M.R. (1979). **Soil Stabilization in
Pavement Structure A User’s Manual Mixture Design Consideration** . Vol. 2.
Washing. D.C. Government Printing Office.

TRRL, Overseas Road Note. 1983. แหล่งที่มา: <http://www.transport-links.org> transport links
/ file area /document store /307_ORN%2021.pdf, June 15, 2009.

Van, V., D.J. 1969. **“Rapid Determination of CBR with the Portable Dynamic Cone
Penetrometer,”** The Rhodesign Engineer, No.105, September 1969.





ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบ Unsoaked CBR, DCP และ UCS

ตารางผนวกที่ ก1 ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR และ DPI วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1ปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement	Age	Energy	Water	Dry	Unsoaked	DPI	W/C
	(%)	(days)	(t-m/m ³)	Content	Density	CBR	(mm/blow)	
				(%)	(gm/cm ³)	(%)		
1	2	2	277.5	6.5	2.163	62.0	3.3	3.5
2	4	2	277.5	6.5	2.137	114.7	2.6	1.9
3	6	2	277.5	7.0	2.144	136.7	2.5	1.2
4	8	2	277.5	6.9	2.009	149.3	2.2	1.0
5	10	2	277.5	6.8	2.160	160.0	1.7	0.7
6	2	3	277.5	7.1	1.948	68.7	3.2	3.6
7	4	3	277.5	7.2	2.079	121.0	2.3	1.9
8	6	3	277.5	7.7	2.109	145.0	1.9	1.3
9	8	3	277.5	7.1	2.108	163.0	1.5	1.0
10	10	3	277.5	7.4	2.087	174.0	1.5	0.7
11	2	2	277.5	11.6	2.163	58.0	3.5	4.6
12	4	2	277.5	11.5	2.127	53.3	4.1	2.5
13	6	2	277.5	11.5	2.152	123.3	2.5	1.6
14	8	2	277.5	12.6	2.059	137.3	2.4	1.3
15	10	2	277.5	11.8	2.171	126.7	2.6	0.9
16	2	3	277.5	12.5	1.901	61.3	3.4	4.7
17	4	3	277.5	11.5	1.933	106.0	3.0	2.5
18	6	3	277.5	11.9	2.037	133.3	2.3	1.7
19	8	3	277.5	11.4	2.063	153.3	2.1	1.3
20	10	3	277.5	11.4	1.979	160.0	2.0	0.9

หมายเหตุ Items 1-10 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)

Items 11-20 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)

ตารางผนวกที่ ก2 ผลทดสอบค่า Unsoaked CBR และ DPI วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement	Age	Energy	Water	Dry	Unsoaked	DPI	W/C
	(%)	(days)	(t-m/m ³)	Content (%)	Density (gm/cm ³)	CBR (%)	(mm/blow)	
1	2	2	277.5	7.9	2.023	50.0	5.4	3.9
2	4	2	277.5	7.9	2.064	80.0	3.6	2.0
3	6	2	277.5	8.1	1.985	102.0	2.9	1.4
4	8	2	277.5	7.5	2.026	168.0	2.0	1.0
5	10	2	277.5	7.8	1.988	196.0	1.4	0.8
6	2	3	277.5	8.5	2.060	70.0	4.2	4.1
7	4	3	277.5	8.3	2.079	100.7	2.8	2.0
8	6	3	277.5	7.6	1.992	110.7	2.3	1.3
9	8	3	277.5	8.5	2.058	180.0	1.3	1.1
10	10	3	277.5	8.1	2.009	205.3	1.0	0.8
11	2	2	277.5	10.9	1.957	37.7	9.4	4.9
12	4	2	277.5	10.7	1.911	46.7	8.1	2.5
13	6	2	277.5	10.6	1.933	106.7	4.0	1.8
14	8	2	277.5	10.4	1.945	180.0	1.9	1.3
15	10	2	277.5	10.6	1.933	168.7	2.2	1.0
16	2	3	277.5	11.2	1.992	42.0	9.2	5.1
17	4	3	277.5	11.6	1.935	51.3	6.9	2.5
18	6	3	277.5	11.0	1.944	100.0	4.4	1.6
19	8	3	277.5	10.9	1.969	188.7	1.7	1.3
20	10	3	277.5	11.0	1.936	172.7	2.4	1.0

หมายเหตุ Items 1-10 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)

Items 11-20 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)

ตารางผนวกที่ ก3 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement (%)	Age (days)	Energy (t-m/m ³)	Water Content		Dry Density (gm/cm ³)	UCS (ksc)		W/C
				(%)	(gm/cm ³)		S1	S2	
1	2	2	277.5	6.5	2.163	4.1	3.7	3.5	
2	4	2	277.5	6.5	2.137	12.2	10.3	1.9	
3	6	2	277.5	7.0	2.144	14.7	13.6	1.2	
4	8	2	277.5	6.9	2.009	19.6	20.9	1.0	
5	10	2	277.5	6.8	2.160	25.4	24.6	0.7	
6	2	3	277.5	7.1	1.948	5.0	4.9	3.6	
7	4	3	277.5	7.2	2.079	12.8	13.0	1.9	
8	6	3	277.5	7.7	2.109	17.0	16.0	1.3	
9	8	3	277.5	7.1	2.108	23.0	24.0	1.0	
10	10	3	277.5	7.4	2.087	26.9	27.0	0.7	
11	2	2	277.5	11.5	2.163	3.3	3.0	4.6	
12	4	2	277.5	11.4	2.127	9.8	8.0	2.5	
13	6	2	277.5	11.3	2.152	11.8	10.9	1.6	
14	8	2	277.5	11.4	2.059	15.7	16.7	1.3	
15	10	2	277.5	11.3	2.171	20.6	19.7	0.9	
16	2	3	277.5	12.5	1.901	4.0	4.0	4.7	
17	4	3	277.5	11.5	1.933	10.2	10.4	2.5	
18	6	3	277.5	11.9	2.037	13.6	12.8	1.7	
19	8	3	277.5	11.4	2.063	18.4	19.2	1.3	
20	10	3	277.5	11.4	1.979	21.5	21.6	0.9	

หมายเหตุ Items 1-10 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)

Items 11-20 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)

S1 ตัวอย่างที่ 1

S2 ตัวอย่างที่ 2

ตารางผนวกที่ ก4 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (UCS) วัสดุหินผุ แหล่งที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	Cement	Age	Energy	Water		Dry Density	UCS		W/C
				Content	(%)		(ksc)	S2	
	(%)	(days)	(t-m/m ³)	(%)	(gm/cm ³)	S1	S2		
1	2	2	277.5	7.9	2.023	4.3	3.9	3.9	
2	4	2	277.5	7.9	2.064	7.7	8.1	2.0	
3	6	2	277.5	8.1	1.985	10.8	9.8	1.4	
4	8	2	277.5	7.5	2.026	13.8	14.3	1.0	
5	10	2	277.5	7.8	1.988	15.8	16.2	0.9	
6	2	3	277.5	8.5	2.060	6.5	5.9	4.1	
7	4	3	277.5	8.3	2.079	11.6	12.2	2.0	
8	6	3	277.5	7.6	1.992	16.2	14.7	1.3	
9	8	3	277.5	8.5	2.058	20.7	21.5	1.0	
10	10	3	277.5	8.1	2.009	23.7	24.3	0.8	
11	2	2	277.5	10.9	1.957	3.5	3.2	4.9	
12	4	2	277.5	10.7	1.911	6.4	5.7	2.5	
13	6	2	277.5	10.6	1.933	7.1	6.7	1.8	
14	8	2	277.5	10.4	1.945	9.6	9.1	1.3	
15	10	2	277.5	10.6	1.933	12.2	11.7	1.0	
16	2	3	277.5	11.2	1.992	5.3	4.8	5.1	
17	4	3	277.5	11.6	1.935	9.6	8.6	2.5	
18	6	3	277.5	11.0	1.944	10.7	10.1	1.6	
19	8	3	277.5	10.9	1.969	14.4	13.7	1.3	
20	10	3	277.5	11.0	1.935	18.3	17.6	1.0	

หมายเหตุ Items 1-10 ใช้ปริมาณน้ำ (1.0*OMC)
 Items 11-20 ใช้ปริมาณน้ำ (1.25*OMC)
 S1 ตัวอย่างที่ 1
 S2 ตัวอย่างที่ 2

ตารางผนวกที่ ก5 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 6 “ eq 0.1” วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR eq.0.1" (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.905	44.0	10.5	10	9.4
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.667	46.0	16.5	13.4	12.1
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.952	56.0	12.5	10.9	9.5
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.912	64.0	5.8	5.3	5.1
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.654	37.0	19	15.2	13.6
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.918	70.0	11	8.8	6.8
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.899	40.0	18.5	14.9	13.4
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.614	44.0	16.5	13.1	11.7
9	2.0	15	12	4	277.5	1.896	49.0	11.5	10.3	8.9
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.900	44.0	17	13.8	12.4
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.674	49.0	15.5	12.4	11.1
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.912	54.0	10.5	9.3	8
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.863	29.0	19.5	16.6	14.7
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.655	34.0	16	14	12.5
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.908	41.0	15.5	13.6	11.9
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.914	35.0	17.5	14.7	13.6
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.792	41.0	15.5	13.6	11.9
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.936	49.0	14.5	12.6	10.7

ตารางผนวกที่ ก6 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 6 “ eq 0.2” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR eq.0.2" (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.905	57.3	10.5	10	9.4
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.667	50	16.5	13.4	12.1
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.952	76.5	12.5	10.9	9.5
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.912	90.7	5.8	5.3	5.1
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.654	46.7	19	15.2	13.6
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.918	83.3	11	8.8	6.8
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.899	45.3	18.5	14.9	13.4
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.614	47.3	16.5	13.1	11.7
9	2.0	15	12	4	277.5	1.896	62	11.5	10.3	8.9
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.900	49.3	17	13.8	12.4
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.674	54	15.5	12.4	11.1
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.912	66.7	10.5	9.3	8
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.863	36.7	19.5	16.6	14.7
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.655	40.7	16	14	12.5
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.908	53.7	15.5	13.6	11.9
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.914	42	17.5	14.7	13.6
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.792	46.7	15.5	13.6	11.9
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.936	58	14.5	12.6	10.7

ตารางผนวกที่ ก7 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 6 “eq Max วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 และ 2 ปรับปรุง
คุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR (Max.) (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.905	57.3	10.5	10	9.4
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.667	50	16.5	13.4	12.1
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.952	76.5	12.5	10.9	9.5
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.912	90.7	5.8	5.3	5.1
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.654	46.7	19	15.2	13.6
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.918	83.3	11	8.8	6.8
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.899	45.3	18.5	14.9	13.4
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.614	47.3	16.5	13.1	11.7
9	2.0	15	12	4	277.5	1.896	62	11.5	10.3	8.9
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.900	49.3	17	13.8	12.4
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.674	54	15.5	12.4	11.1
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.912	66.7	10.5	9.3	8
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.863	36.7	19.5	16.6	14.7
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.655	40.7	16	14	12.5
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.908	53.7	15.5	13.6	11.9
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.914	42	17.5	14.7	13.6
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.792	46.7	15.5	13.6	11.9
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.936	58	14.5	12.6	10.7

ตารางผนวกที่ ก8 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 8 “eq 0.1” วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content	Content		(days)	(ft-lb/ft ³)	Density	CBR eq.0.1"	(0-25)	(0-50)	(0-75)
	(%)	(%)	(%)			(gm/cm ³)	(%)			
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.956	54.0	13	11.7	10.8
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.764	70.0	7.9	7.2	5.9
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.943	61.0	6.3	6.2	5.2
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.972	75.0	12	10.8	10
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.740	84.0	6.2	5.8	4.9
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.959	76.0	5.1	4.9	4.2
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.898	50.0	14	12.3	11.3
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.783	51.0	14.5	12.6	11.4
9	2.0	15	12	4	277.5	1.805	70.0	7.7	7.2	6.1
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.873	59.0	11	9.8	9.2
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.714	74.0	7.2	6.7	5.4
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.888	60.0	7	6.4	4.8
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.893	40.0	15	12.5	11.3
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.787	43.0	16	13.7	12.6
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.923	61.0	11.5	9.9	7.9
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.863	49.0	13.5	11.1	9.4
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.835	51.0	14.5	12.6	11.5
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.907	71.0	10.5	9.1	7.4

ตารางผนวกที่ ก9 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 8 “ eq 0.2” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR eq.0.2" (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.956	69.3	13	11.7	10.8
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.764	90.6	7.9	7.2	5.9
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.943	96.7	6.3	6.2	5.2
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.972	85.3	12	10.8	10
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.740	101.3	6.2	5.8	4.9
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.959	104.0	5.1	4.9	4.2
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.898	67.0	14	12.3	11.3
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.783	65.3	14.5	12.6	11.4
9	2.0	15	12	4	277.5	1.805	90.0	7.7	7.2	6.1
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.873	76.0	11	9.8	9.2
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.714	90.0	7.2	6.7	5.4
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.888	90.0	7	6.4	4.8
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.893	54.0	15	12.5	11.3
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.787	54.7	16	13.7	12.6
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.923	53.3	11.5	9.9	7.9
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.863	59.3	13.5	11.1	9.4
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.835	64.0	14.5	12.6	11.5
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.907	91.3	10.5	9.1	7.4

ตารางผนวกที่ ก10 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 8 “eq Max วัสดุหินผุ แหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content	Content				Density	CBR (Max.)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
	(%)	(%)	(%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	(gm/cm ³)	(%)			
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.956	69.3	13	11.7	10.8
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.764	90.6	7.9	7.2	5.9
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.943	96.7	6.3	6.2	5.2
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.972	85.3	12	10.8	10
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.740	101.3	6.2	5.8	4.9
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.959	104.0	5.1	4.9	4.2
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.898	67.0	14	12.3	11.3
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.783	65.3	14.5	12.6	11.4
9	2.0	15	12	4	277.5	1.805	90.0	7.7	7.2	6.1
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.873	76.0	11	9.8	9.2
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.714	90.0	7.2	6.7	5.4
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.888	90.0	7	6.4	4.8
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.893	54.0	15	12.5	11.3
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.787	54.7	16	13.7	12.6
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.923	53.3	11.5	9.9	7.9
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.863	59.3	13.5	11.1	9.4
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.835	64.0	14.5	12.6	11.5
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.907	91.3	10.5	9.1	7.4

ตารางผนวกที่ ก11 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 10" eq 0.1" วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR eq.0.1" (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.814	30.0	16.5	15.1	12.9
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.835	78.0	13	11	9
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.812	80.0	10.5	8.6	7.5
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.803	35.0	16	14.5	12.6
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.826	86.0	11.5	9.8	8.1
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.800	92.0	9	7.6	6.7
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.767	26.0	17	15.5	13.3
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.790	65.0	13.5	11.4	9.4
9	2.0	15	12	4	277.5	1.799	65.0	12.5	10.9	8.7
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.747	33.0	16	14.5	13
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.791	70.0	12.5	10.6	8.8
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.804	75.0	11.5	9.9	7.9
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.758	23.0	18	16.3	14.1
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.771	50.5	15	13	11.2
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.776	53.0	14.5	12.6	10.4
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.773	35.0	15.5	13.3	11
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.779	63.0	13.5	11.7	10.3
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.800	68.0	12.5	11.1	9.1

ตารางผนวกที่ ก12 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 10" eq 0.2" วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR eq.0.2" (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.814	38.0	16.5	15.1	12.9
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.835	90.0	13	11	9
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.812	93.3	10.5	8.6	7.5
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.803	42.7	16	14.5	12.6
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.826	96.7	11.5	9.8	8.1
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.800	101.3	9	7.6	6.7
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.767	35.3	17	15.5	13.3
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.790	80.7	13.5	11.4	9.4
9	2.0	15	12	4	277.5	1.799	84.0	12.5	10.9	8.7
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.747	39.3	16	14.5	13
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.791	92.7	12.5	10.6	8.8
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.804	89.3	11.5	9.9	7.9
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.758	30.0	18	16.3	14.1
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.771	68.7	15	13	11.2
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.776	71.3	14.5	12.6	10.4
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.773	46.0	15.5	13.3	11
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.779	76.7	13.5	11.7	10.3
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.800	78.0	12.5	11.1	9.1

ตารางผนวกที่ ก13 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 10 “eq Max วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR (Max.) (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.814	38.0	16.5	15.1	12.9
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.835	90.0	13	11	9
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.812	93.3	10.5	8.6	7.5
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.803	42.7	16	14.5	12.6
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.826	96.7	11.5	9.8	8.1
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.800	101.3	9	7.6	6.7
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.767	35.3	17	15.5	13.3
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.790	80.7	13.5	11.4	9.4
9	2.0	15	12	4	277.5	1.799	84.0	12.5	10.9	8.7
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.747	39.3	16	14.5	13
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.791	92.7	12.5	10.6	8.8
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.804	89.3	11.5	9.9	7.9
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.758	30.0	18	16.3	14.1
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.771	68.7	15	13	11.2
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.776	71.3	14.5	12.6	10.4
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.773	46.0	15.5	13.3	11
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.779	76.7	13.5	11.7	10.3
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.800	78.0	12.5	11.1	9.1

ตารางผนวกที่ ก14 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 12 “eq 0.1” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content (%)	Content (%)	Content (%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR eq.0.1" (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.912	40.0	18	16	13.6
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.864	39.0	17	14.8	12.7
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.826	49.0	15.5	13.2	11.1
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.905	38.0	16	13.8	11.9
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.878	48.0	15	12.8	10.8
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.820	58.0	13.5	11.4	9.1
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.864	31.0	19	16.8	14.7
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.814	31.0	18.5	15.8	13.2
9	2.0	15	12	4	277.5	1.804	42.0	16.5	14.1	12
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.851	39.0	17	14.5	12.4
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.865	40.0	16.7	14.1	12
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.843	48.0	14	12	10.3
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.815	25.0	19.5	17.3	15
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.802	28.0	19	16.3	14
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.761	37.0	17	14.5	12.3
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.828	30.0	18	15.5	13.5
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.808	30.5	17.5	14.9	12.8
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.772	41.0	16	13.7	11.7

ตารางผนวกที่ ก15 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 12 “ eq 0.2” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	(%)	Content (%)	(%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	Density (gm/cm ³)	CBR eq.0.2" (%)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.913	43.0	18	16	13.6
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.864	52.0	17	14.8	12.7
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.826	57.3	15.5	13.2	11.1
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.905	52.0	16	13.8	11.9
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.878	66.0	15	12.8	10.8
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.820	71.3	13.5	11.4	9.1
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.864	35.3	19	16.8	14.7
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.814	40.7	18.5	15.8	13.2
9	2.0	15	12	4	277.5	1.804	50.7	16.5	14.1	12
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.851	40.3	17	14.5	12.4
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.865	45.3	16.7	14.1	12
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.843	54.7	14	12	10.3
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.815	31.3	19.5	17.3	15
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.802	34.0	19	16.3	14
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.761	46.7	17	14.5	12.3
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.828	33.3	18	15.5	13.5
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.808	36.7	17.5	14.9	12.8
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.772	50.0	16	13.7	11.7

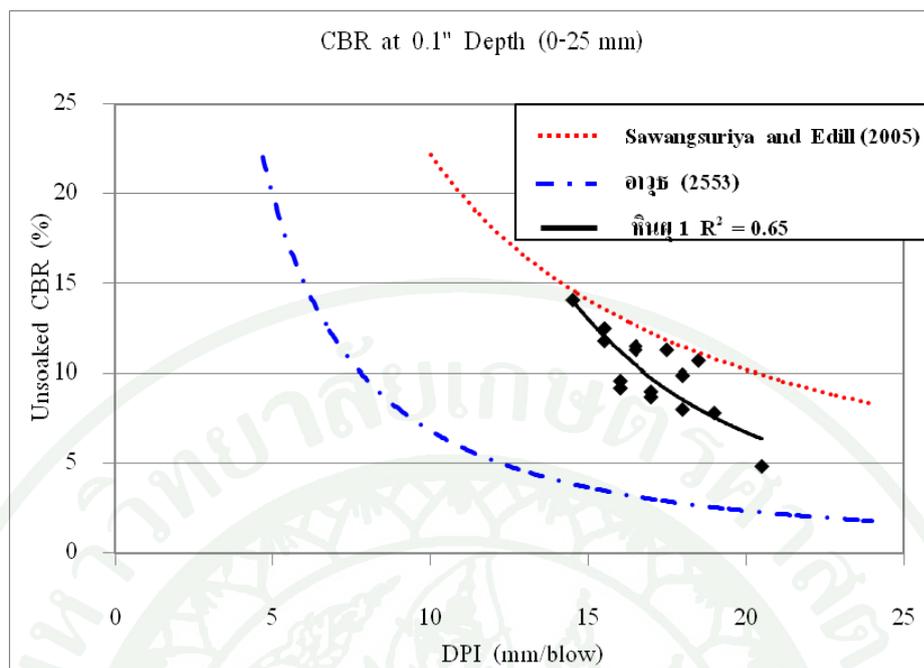
ตารางผนวกที่ ก16 ผลทดสอบ Unsoaked CBR Mold 12 “ eq Max ” วัสดุหินผุแหล่งที่ 1 และ 2
ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Items	OMC	Water	Cement	Age	Energy	Dry	Unsoaked	DPI (mm/blow)		
	Content	Content				Density	CBR (Max.)	(0-25)	(0-50)	(0-75)
	(%)	(%)	(%)	(days)	(ft-lb/ft ³)	(gm/cm ³)	(%)			
1	1.8	12.7	4	4	277.5	1.913	43.0	18.0	16.0	13.6
2	1.8	12.3	8	4	277.5	1.864	52.0	17.0	14.8	12.7
3	1.8	13.1	12	4	277.5	1.826	57.3	15.5	13.2	11.1
4	1.8	12.2	4	7	277.5	1.905	52.0	16.0	13.8	11.9
5	1.8	11.9	8	7	277.5	1.878	66.0	15.0	12.8	10.8
6	1.8	12.8	12	7	277.5	1.820	71.3	13.5	11.4	9.1
7	2.0	14.8	4	4	277.5	1.864	35.3	19.0	16.8	14.7
8	2.0	14.4	8	4	277.5	1.814	40.7	18.5	15.8	13.2
9	2.0	15	12	4	277.5	1.804	50.7	16.5	14.1	12.0
10	2.0	15.6	4	7	277.5	1.851	40.3	17.0	14.5	12.4
11	2.0	15.2	8	7	277.5	1.865	45.3	16.7	14.1	12.0
12	2.0	15.4	12	7	277.5	1.843	54.7	14.0	12.0	10.3
13	2.2	16.2	4	4	277.5	1.815	31.3	19.5	17.3	15.0
14	2.2	16.5	8	4	277.5	1.802	34.0	19.0	16.3	14.0
15	2.2	17.1	12	4	277.5	1.761	46.7	17.0	14.5	12.3
16	2.2	16.4	4	7	277.5	1.828	33.3	18.0	15.5	13.5
17	2.2	16.7	8	7	277.5	1.808	36.7	17.5	14.9	12.8
18	2.2	16.8	12	7	277.5	1.772	50.0	16.0	13.7	11.7

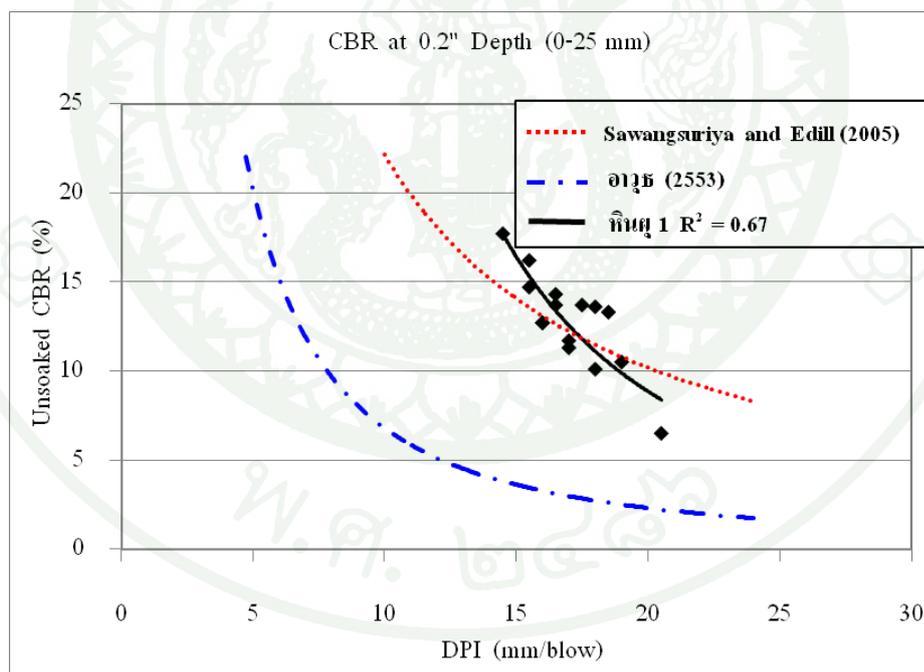


ภาคผนวก ข

ภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมต่างๆ วัสดุหินผุทั้งสองชนิด ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

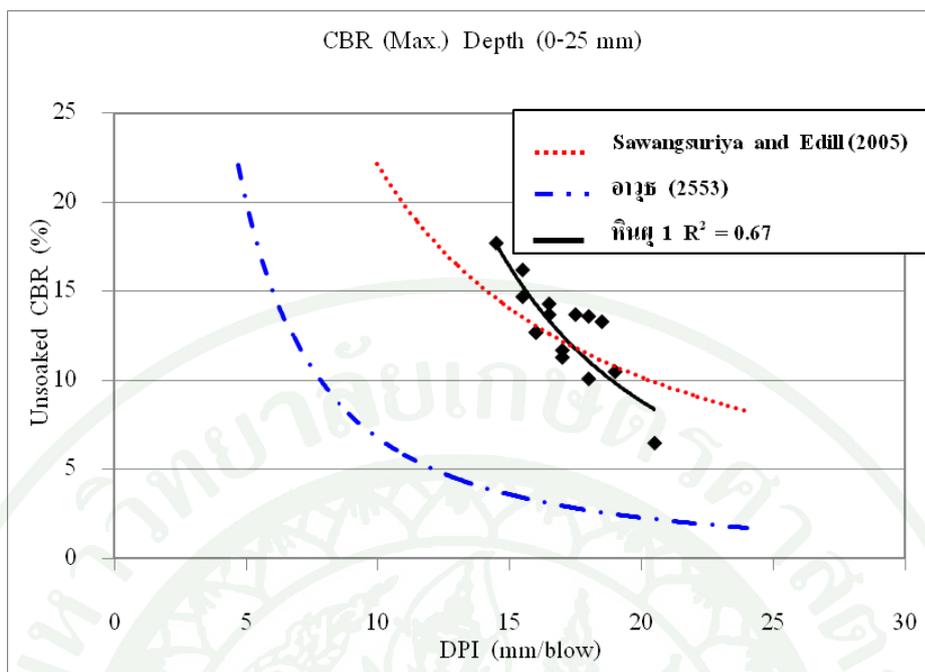


(ก)



(ข)

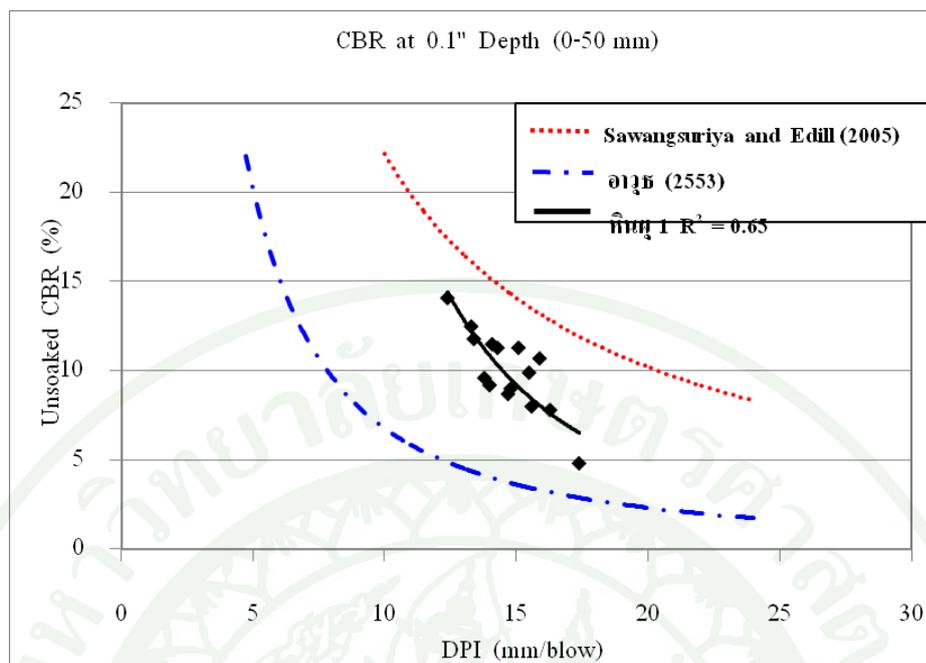
ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-25 mm
วัสดุหินผุชนิดที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



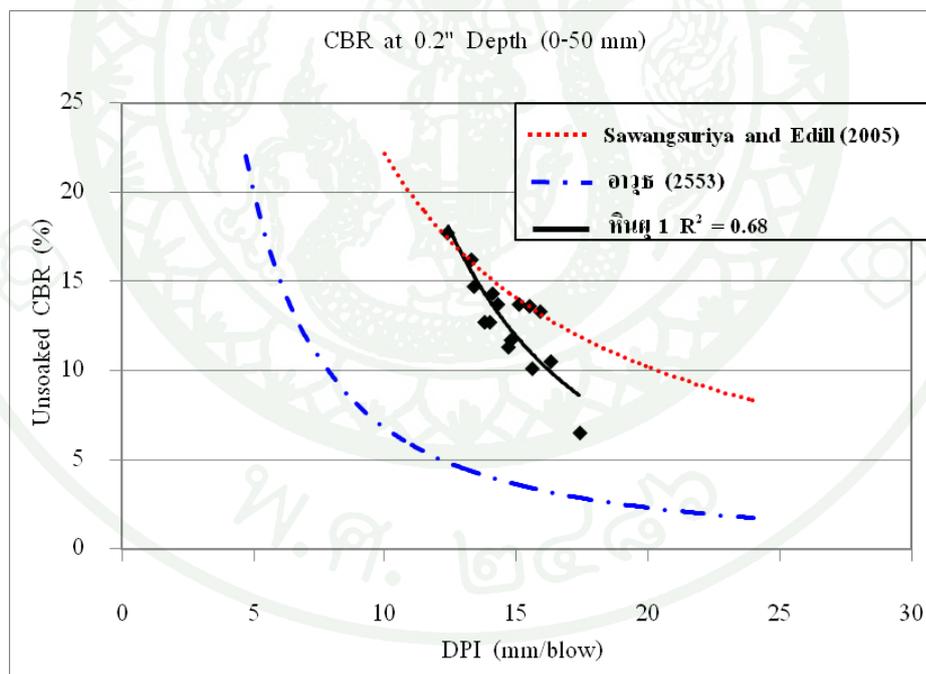
(ค)

ภาพผนวกที่ ข1 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

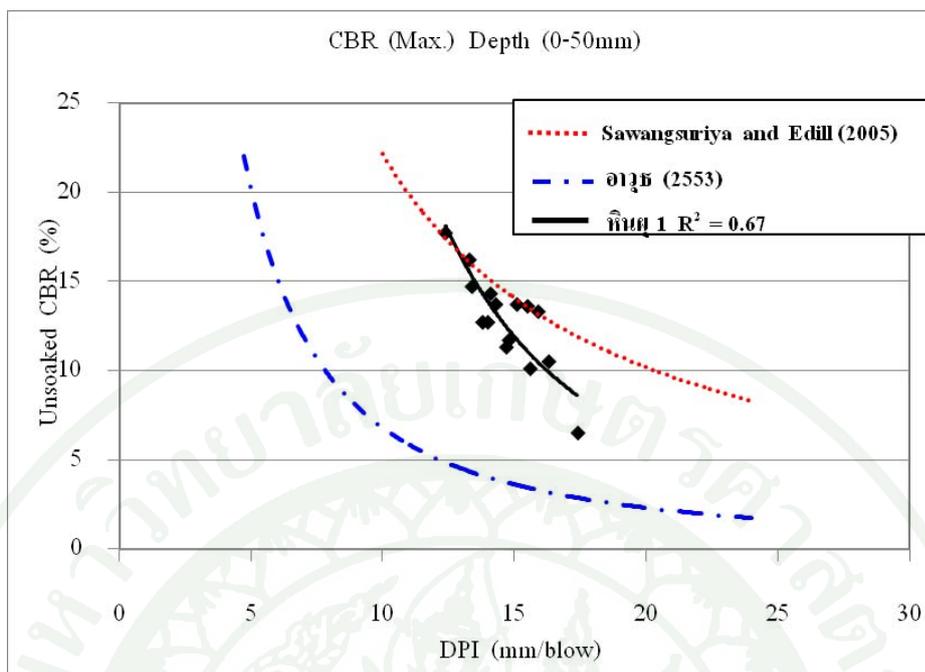


(ก)



(ข)

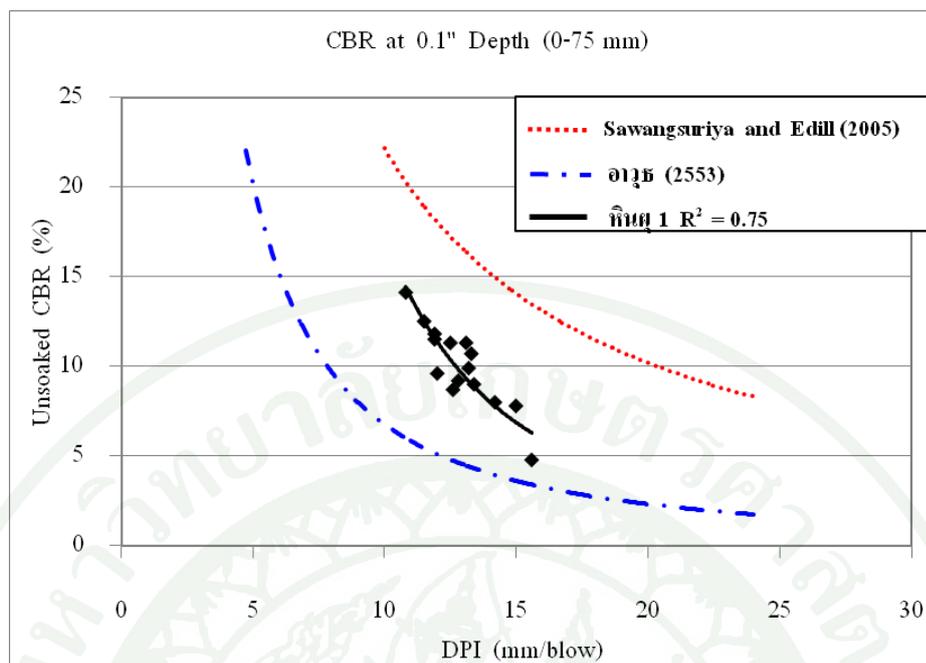
ภาพผนวกที่ ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-50 mm วัสดุหินผุชนิดที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



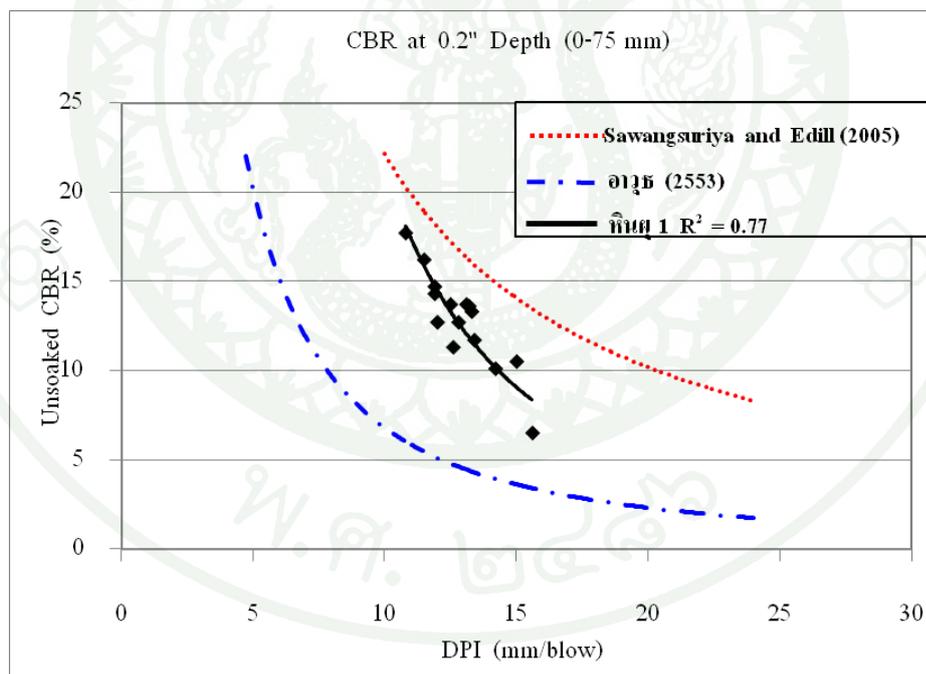
(ค)

ภาพผนวกที่ ๗2 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

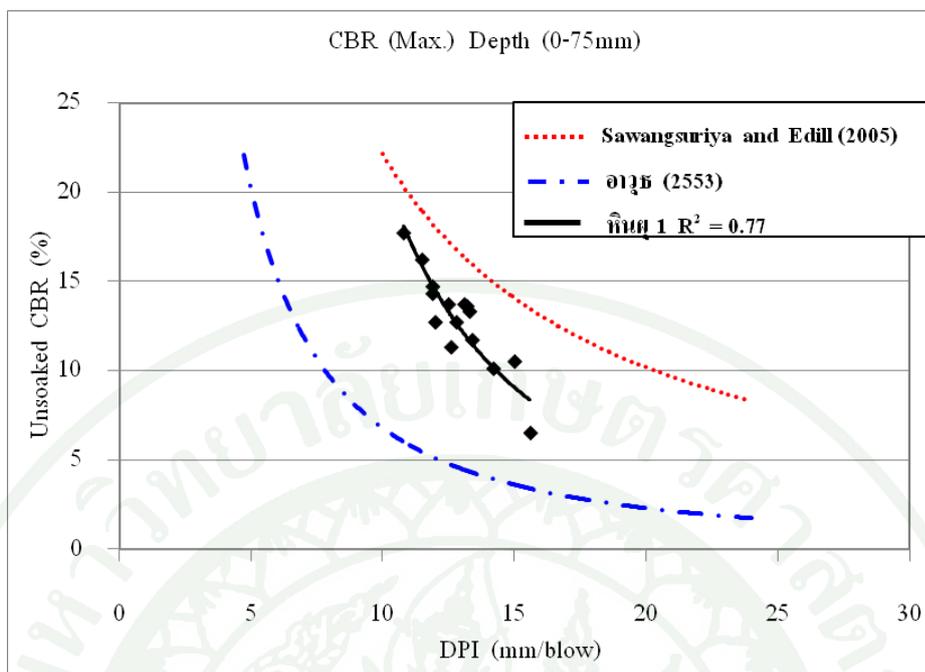


(ก)



(ข)

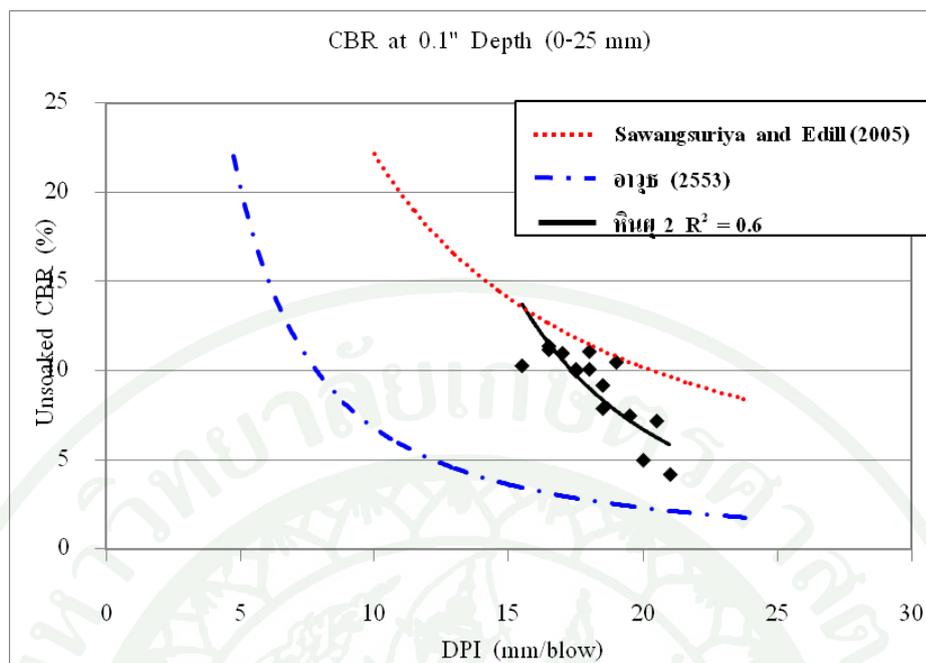
ภาพผนวกที่ ข3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-75 mm วัสดุหินผุชนิดที่ 1 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



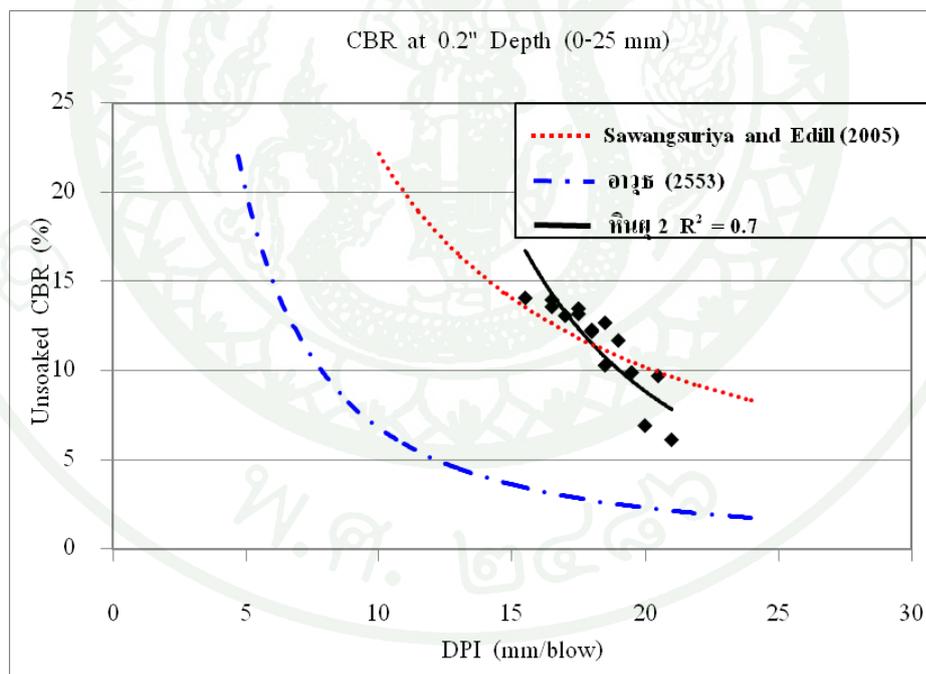
(ค)

ภาพผนวกที่ ๖3 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

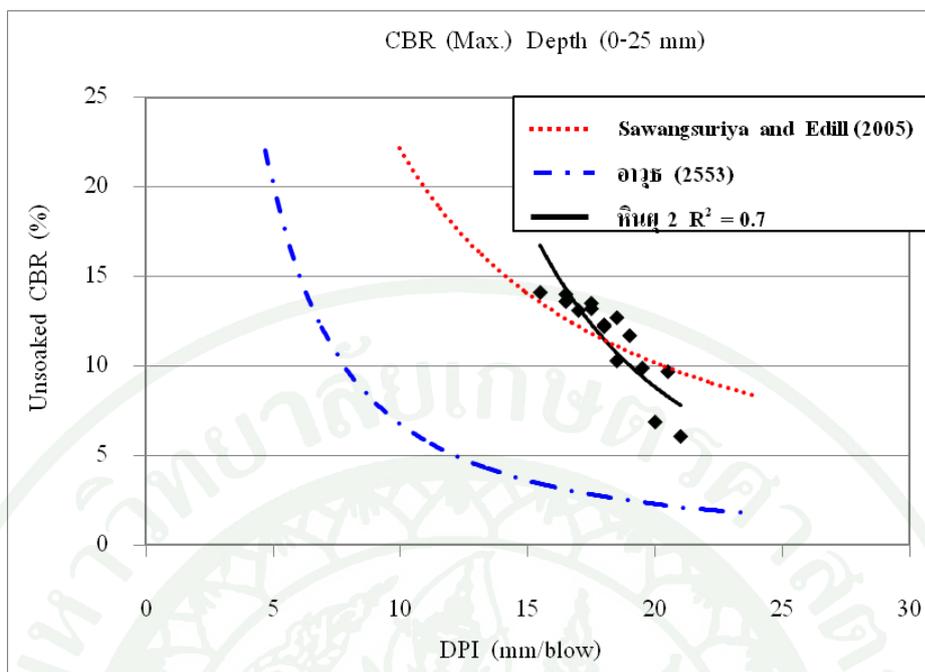


(ก)



(ข)

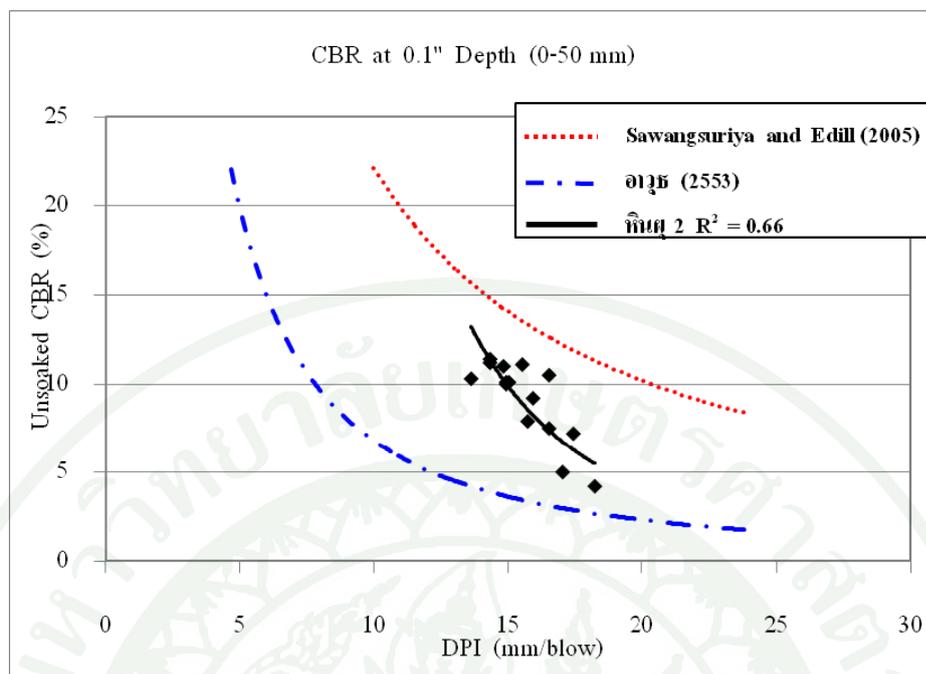
ภาพผนวกที่ ๔ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-25 mm วัสดุหินผุชนิดที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



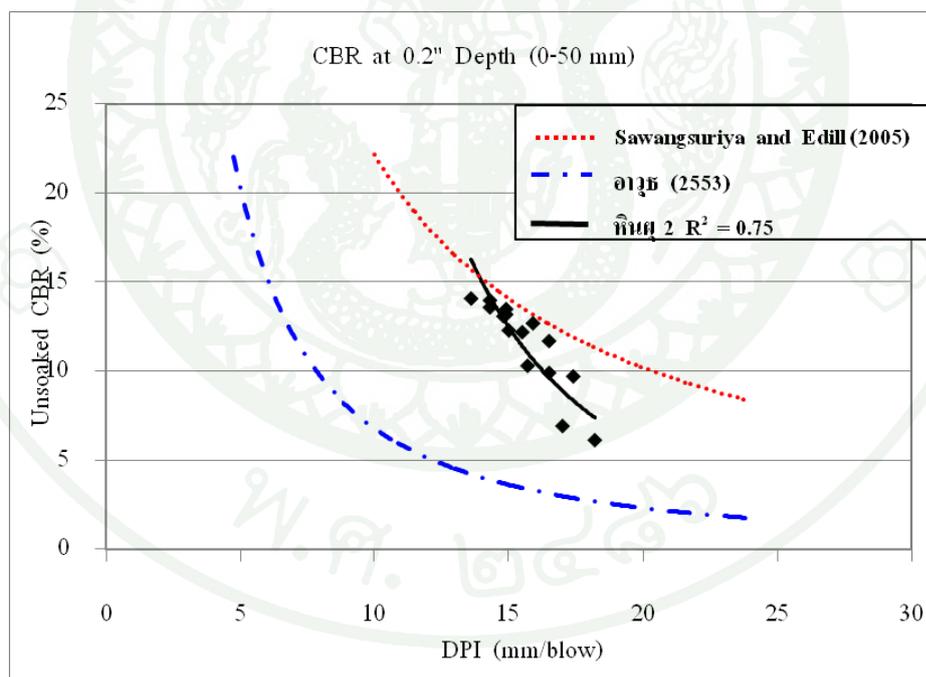
(ค)

ภาพผนวกที่ ๗4 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๕๖

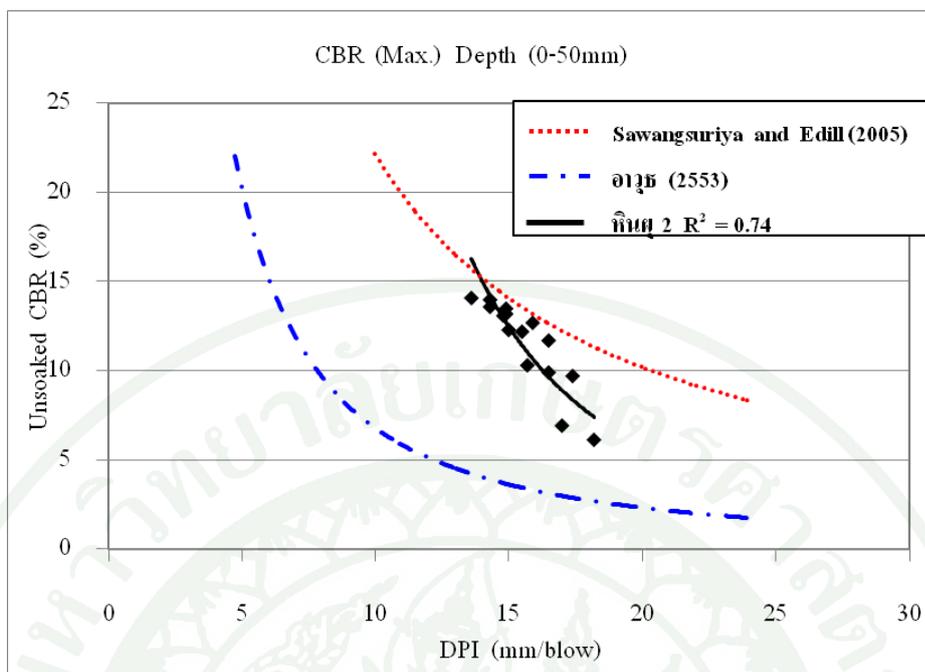


(ก)



(ข)

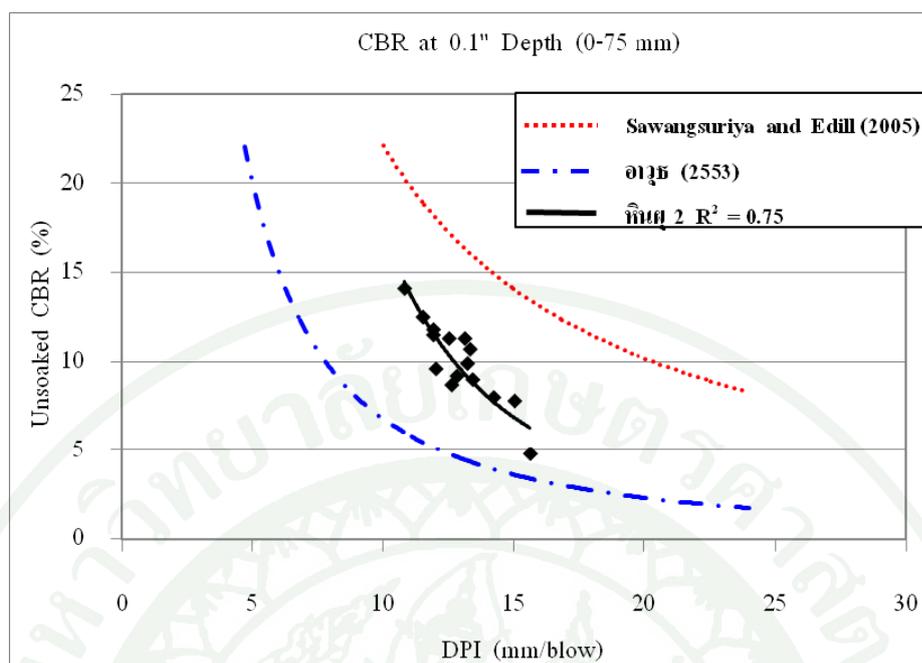
ภาพผนวกที่ ๕ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-50 mm
วัสดุหินผุชนิดที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



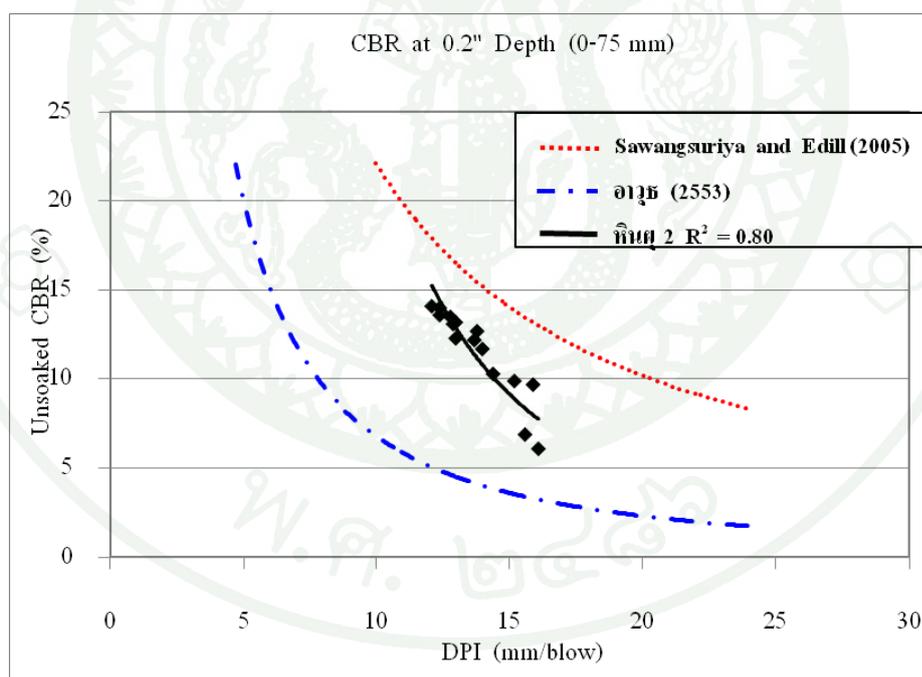
(ค)

ภาพผนวกที่ ๖5 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

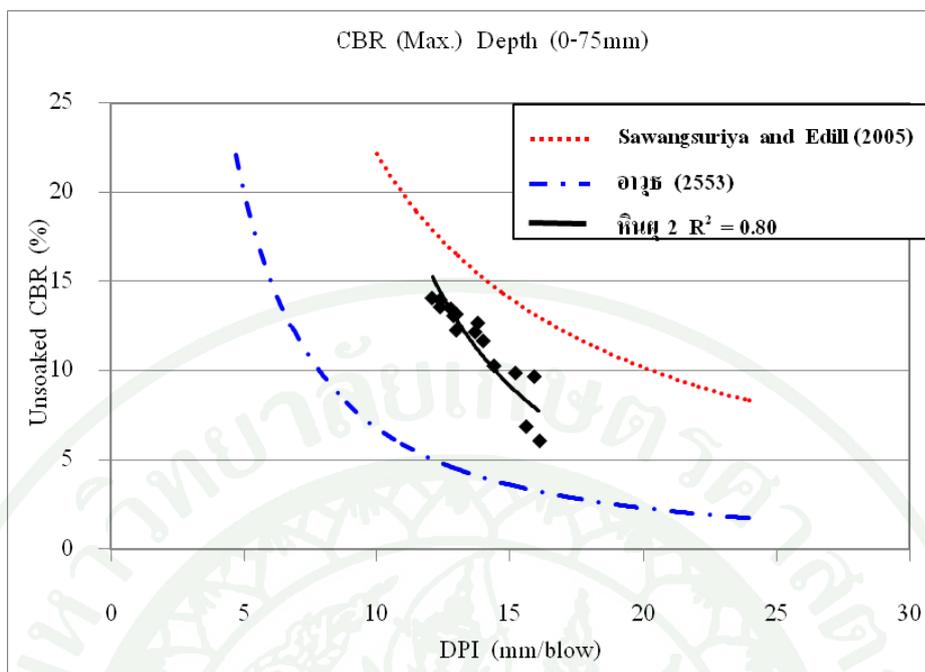


(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๖ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน 0-75 mm วัสดุหินผุชนิดที่ 2 ไม่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

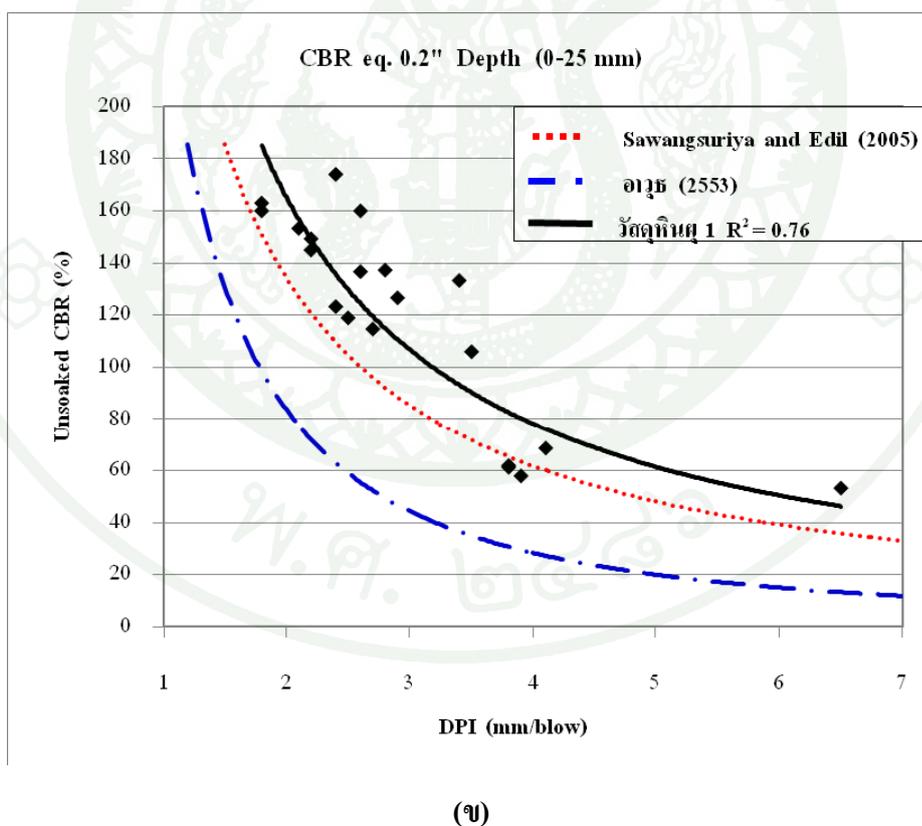
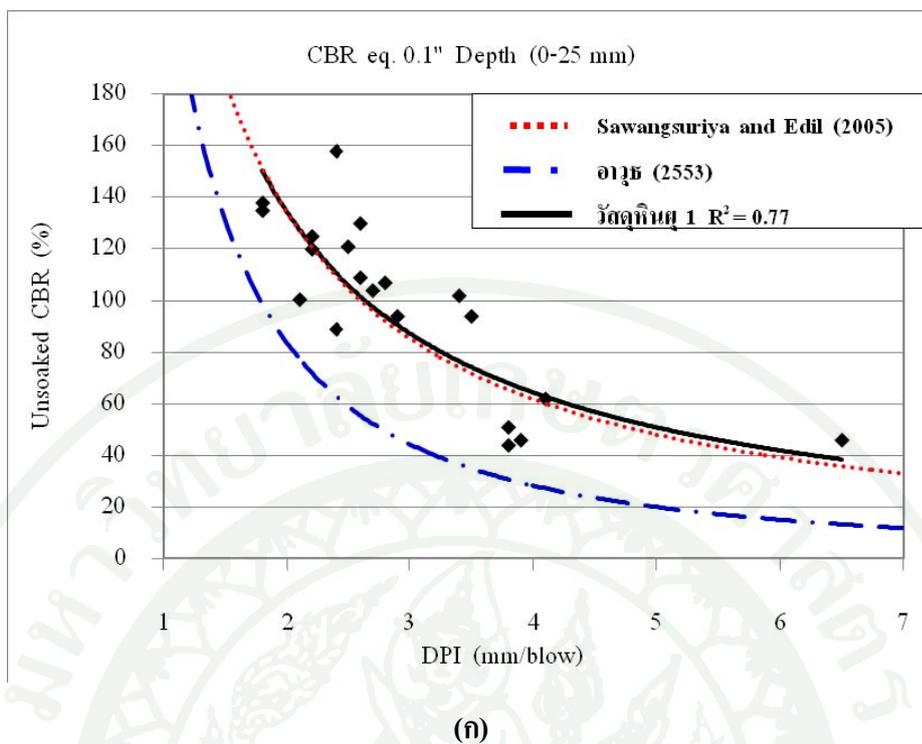


(ค)

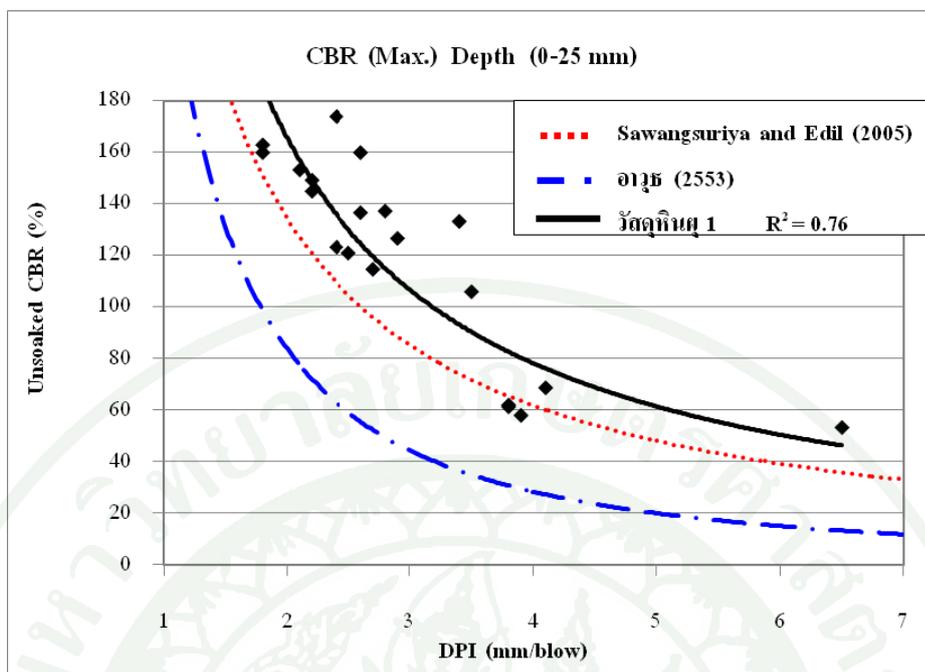
ภาพผนวกที่ ๖ (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖





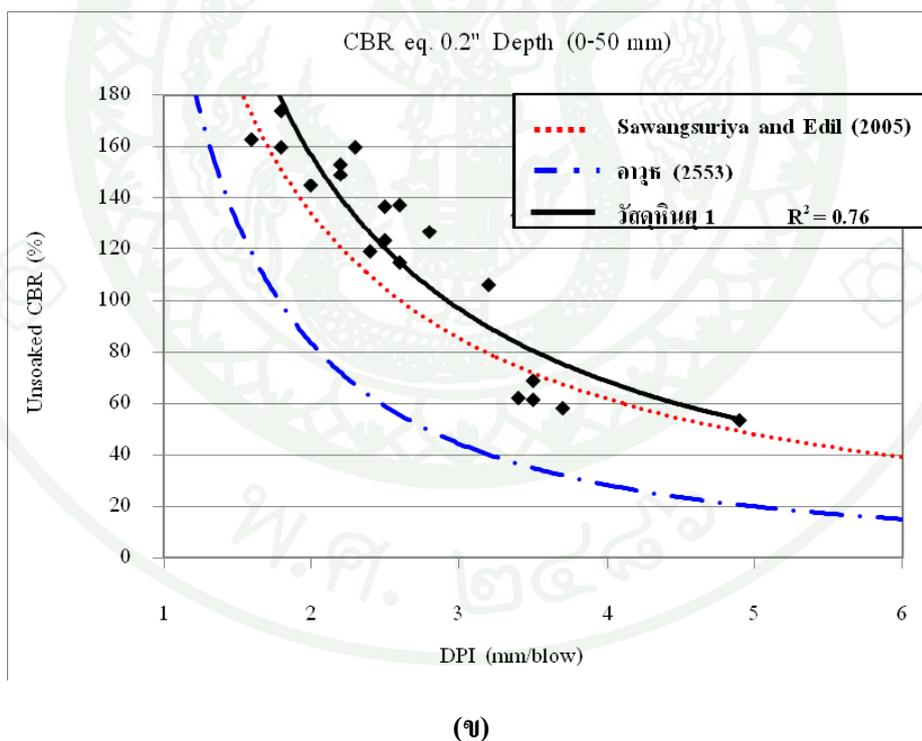
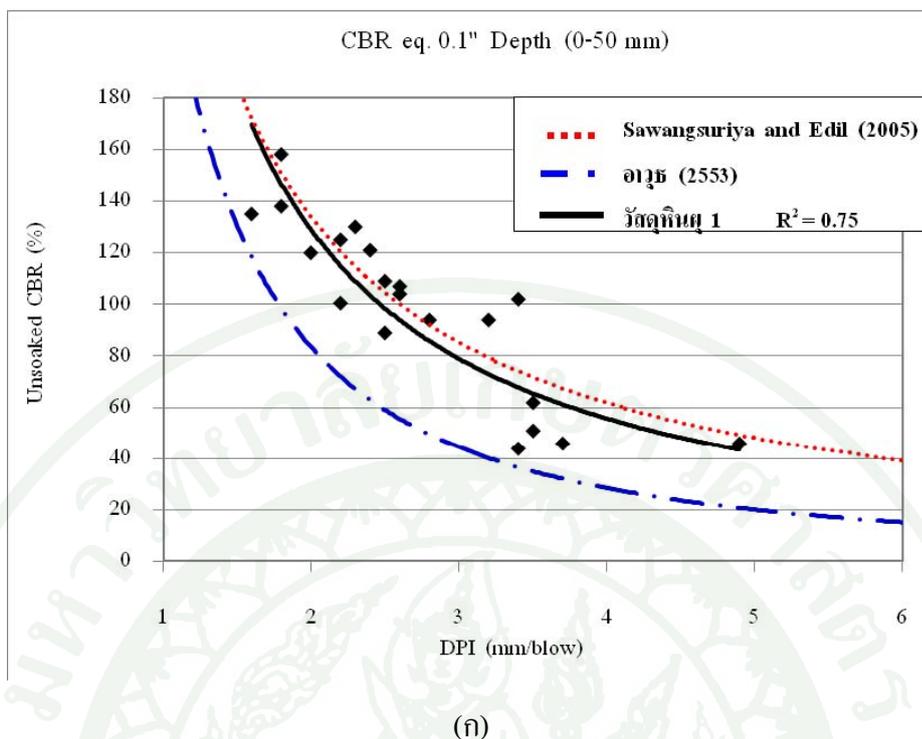
ภาพผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจม 0–25 mm วัสดุหินผุชนิดที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



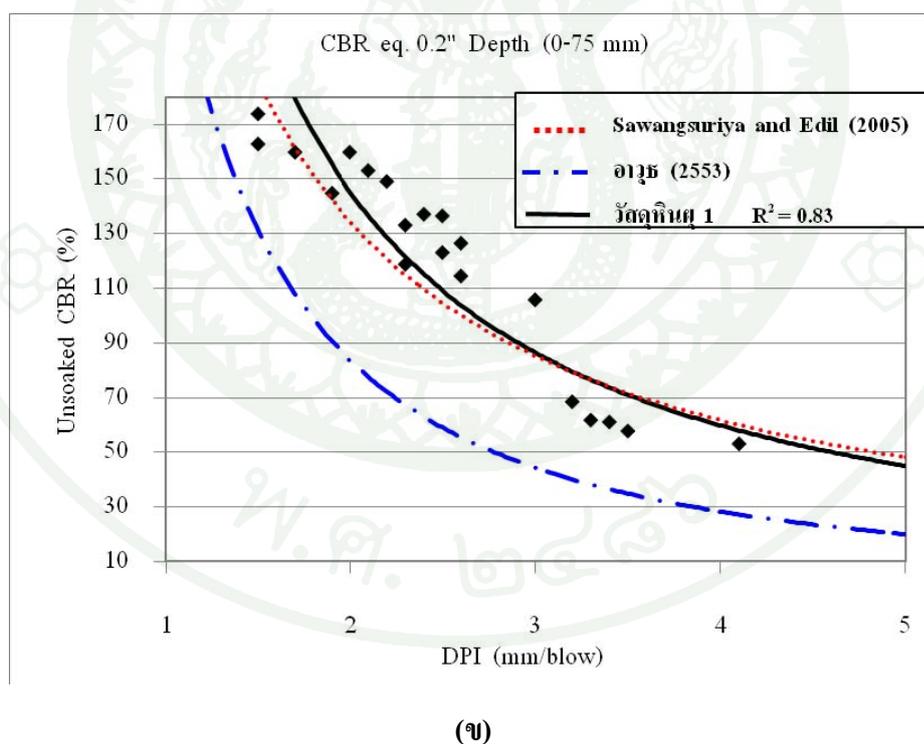
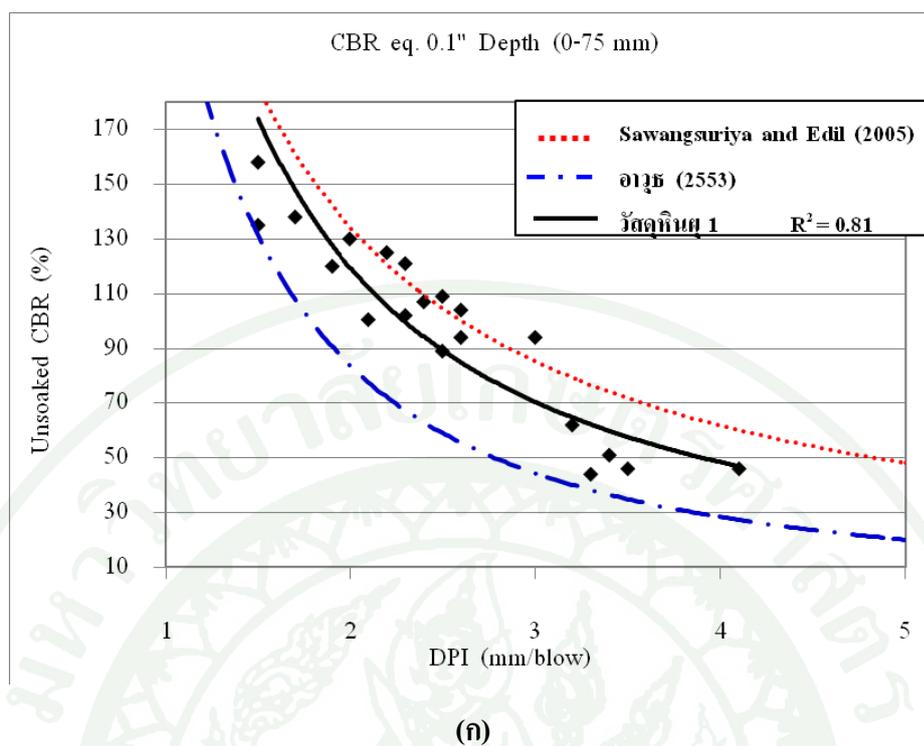
(ค)

ภาพผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

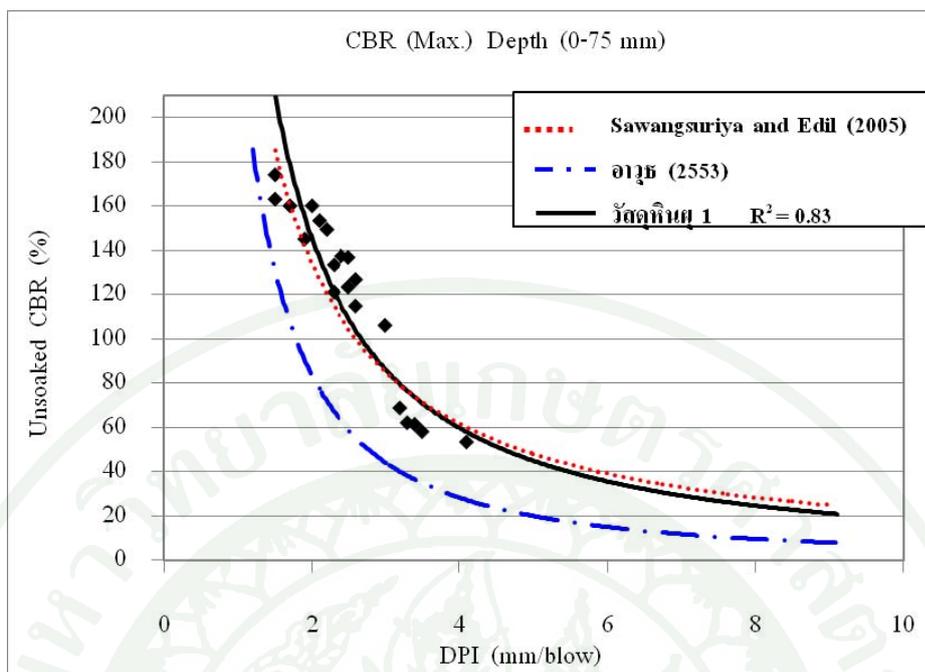
พ.ศ. ๒๕๖๖



ภาพผนวกที่ ๒ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-50 mm วัสดุหินผุชนิดที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



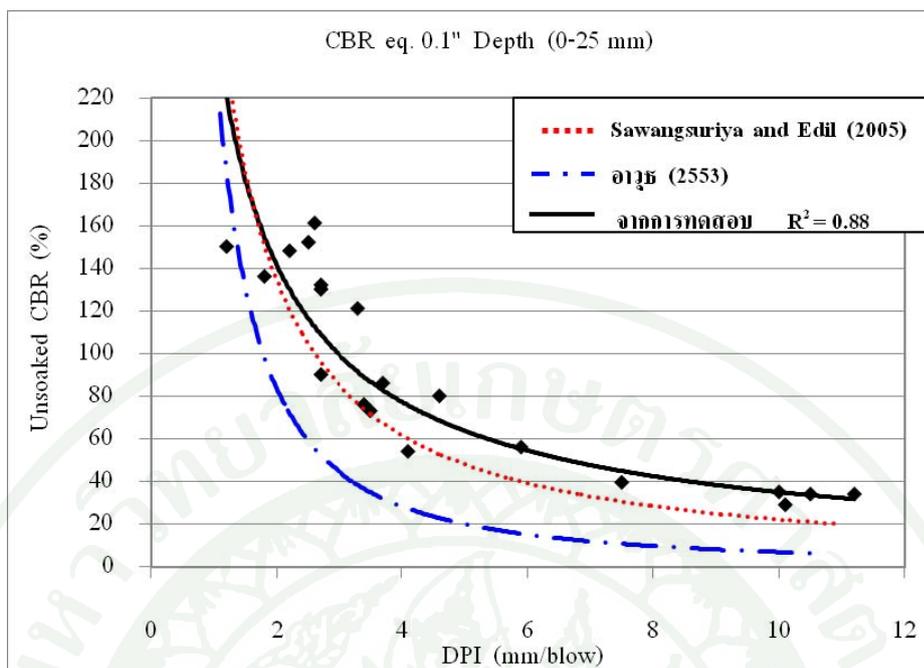
ภาพผนวกที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน 0-75 mm วัสดุหินผุชนิดที่ 1 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



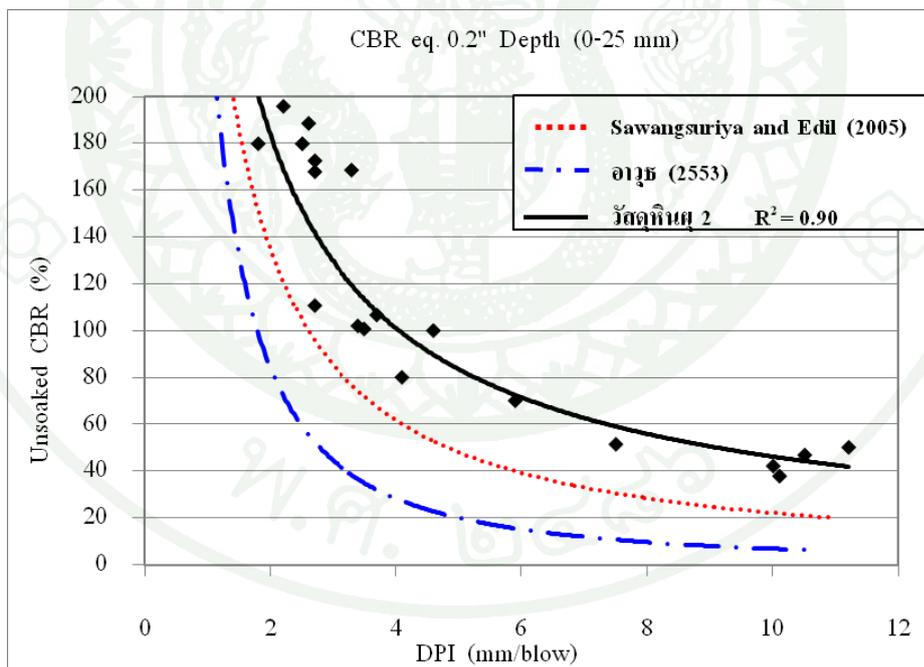
(ค)

ภาพผนวกที่ ค3 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

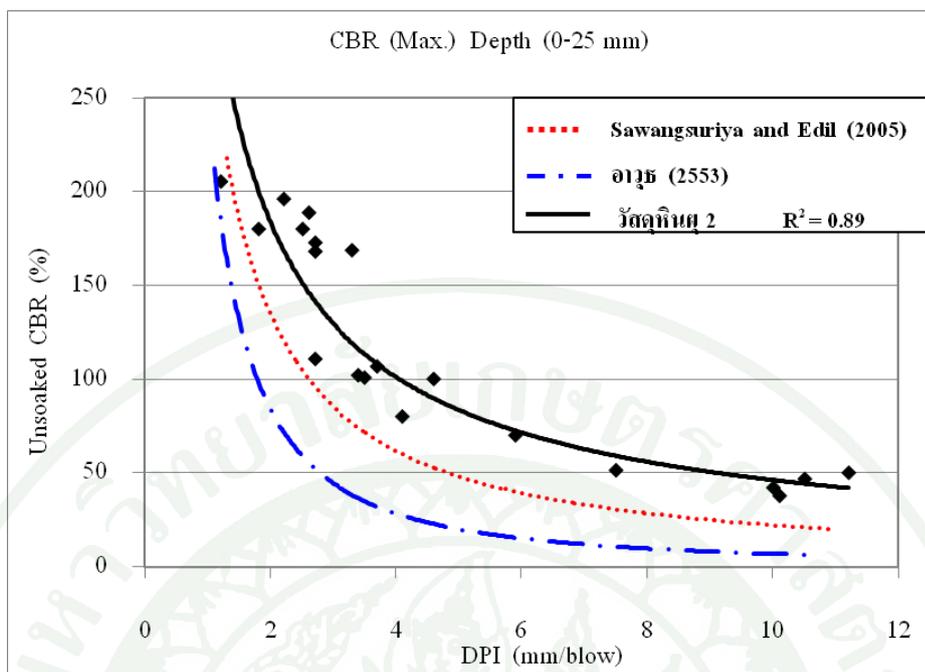


(ก)



(ง)

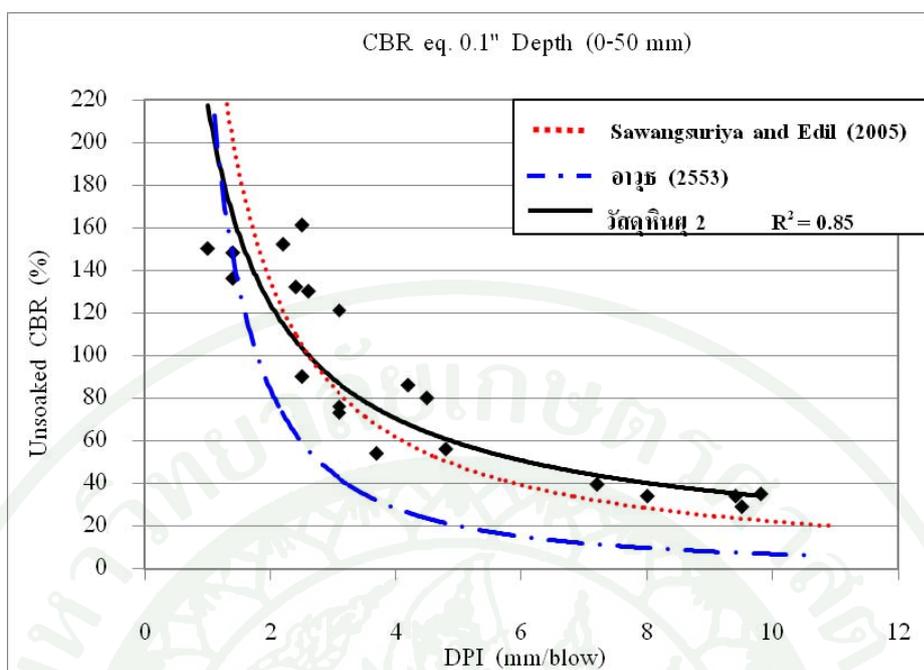
ภาพผนวกที่ ๓4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-25 mm
วัสดุหินผุชนิดที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



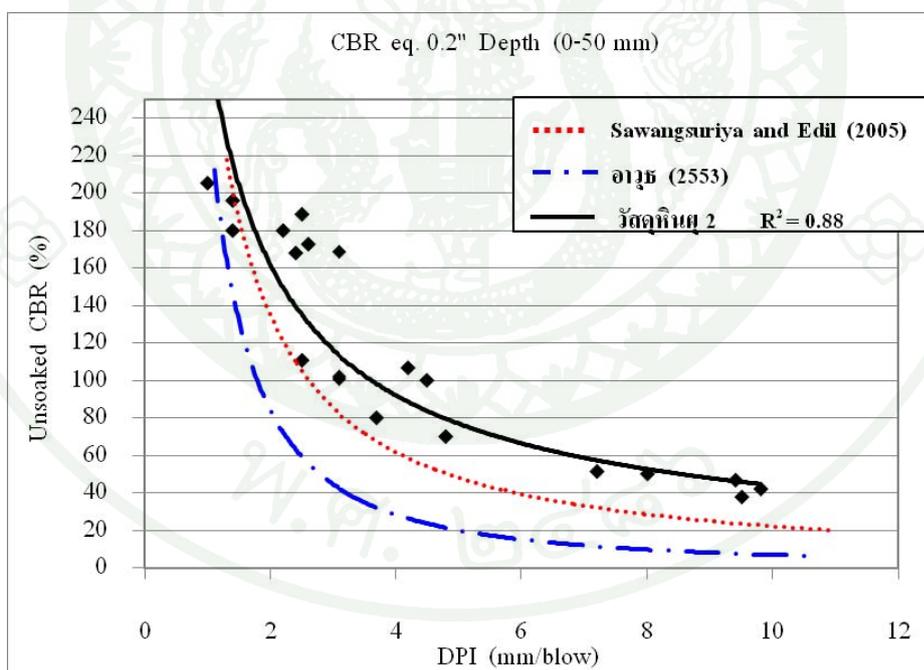
(ค)

ภาพผนวกที่ ค4 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

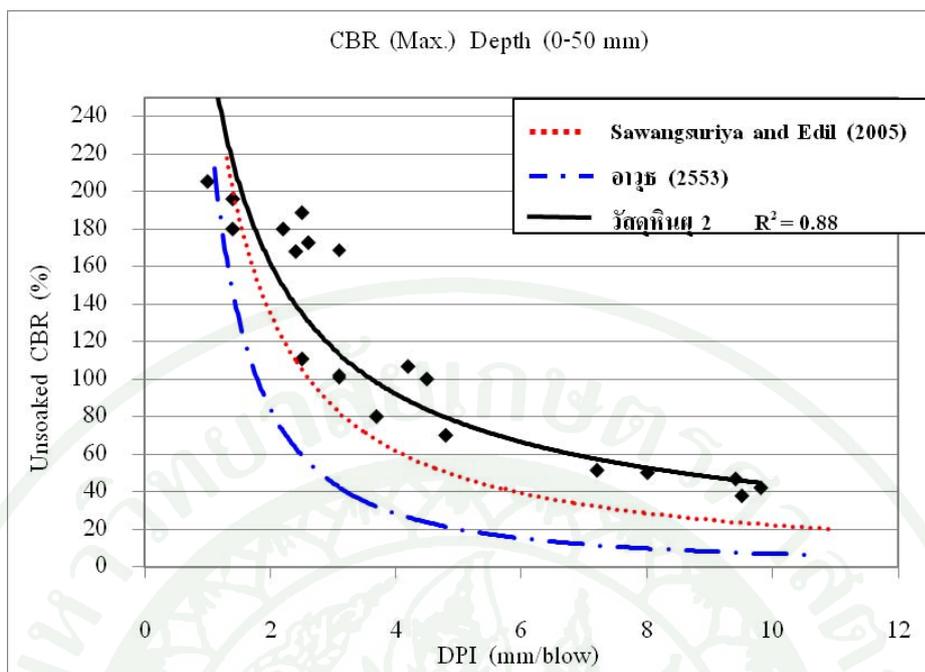


(ก)



(ง)

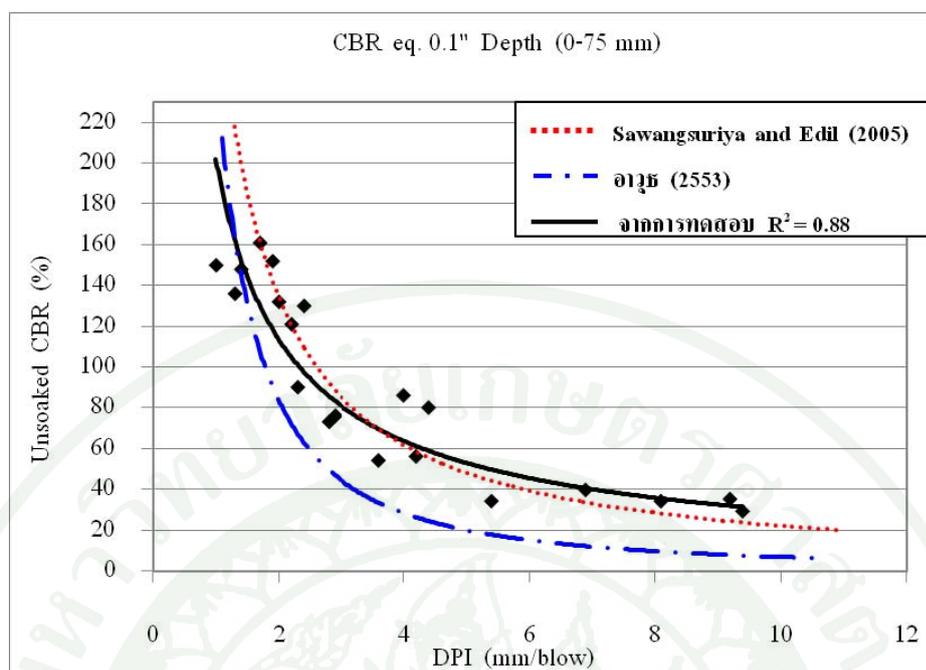
ภาพผนวกที่ ค5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน 0 – 50 mm
วัสดุหินผุชนิดที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



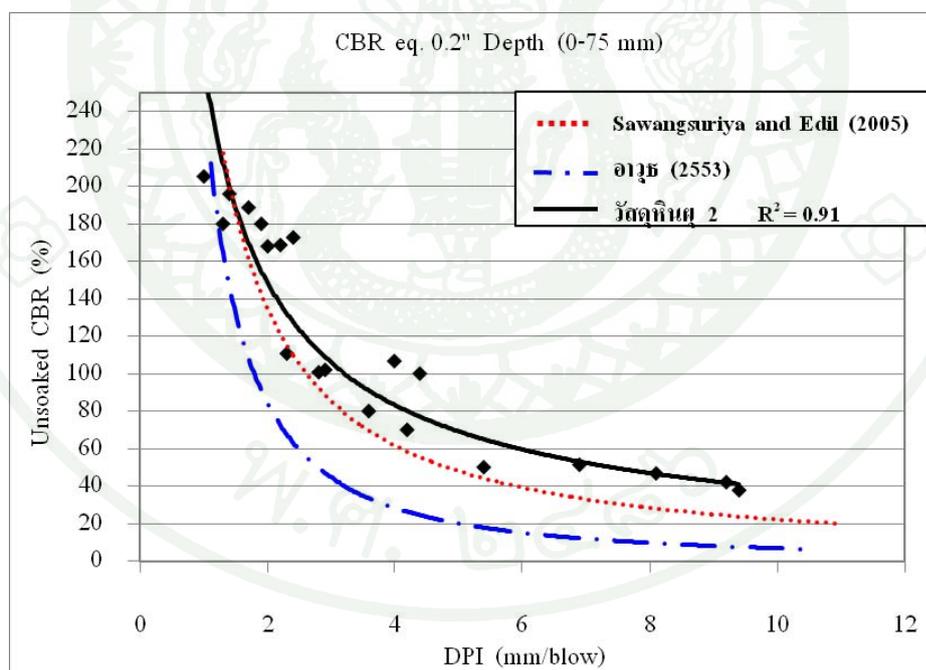
(ค)

ภาพผนวกที่ ๕ (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

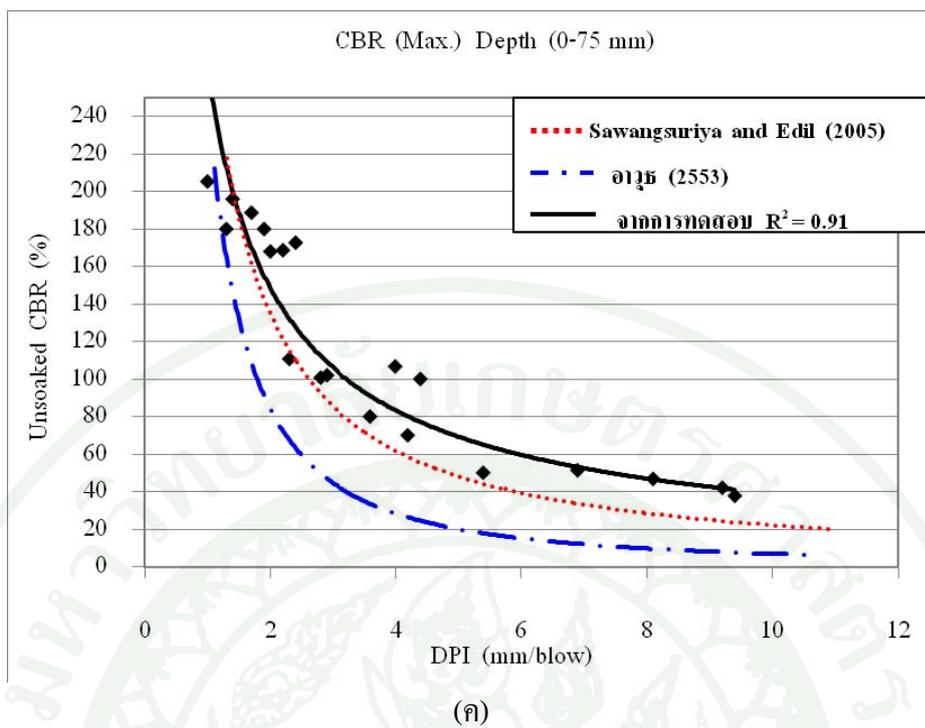


(ก)

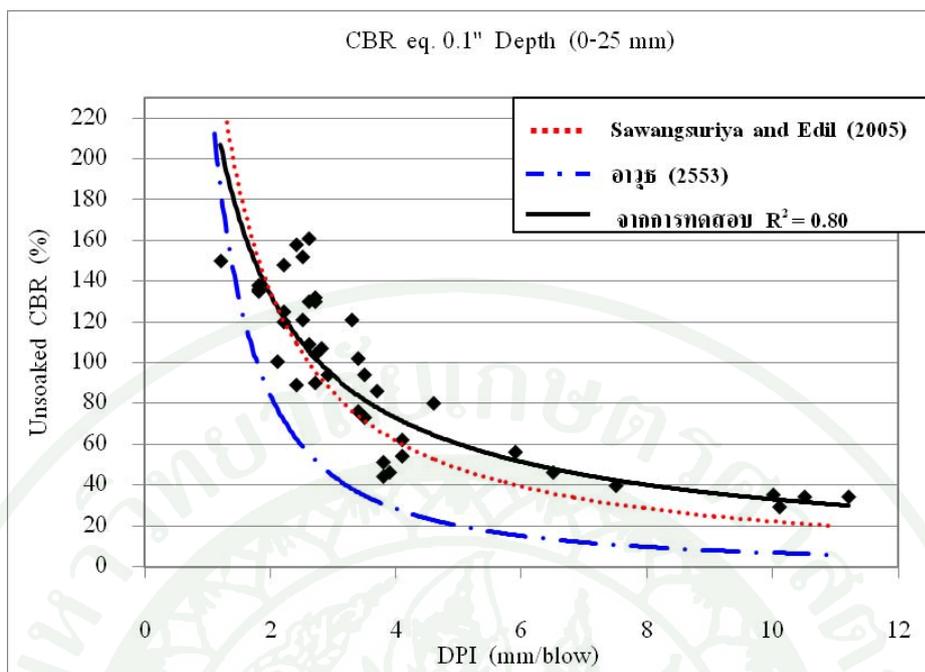


(ง)

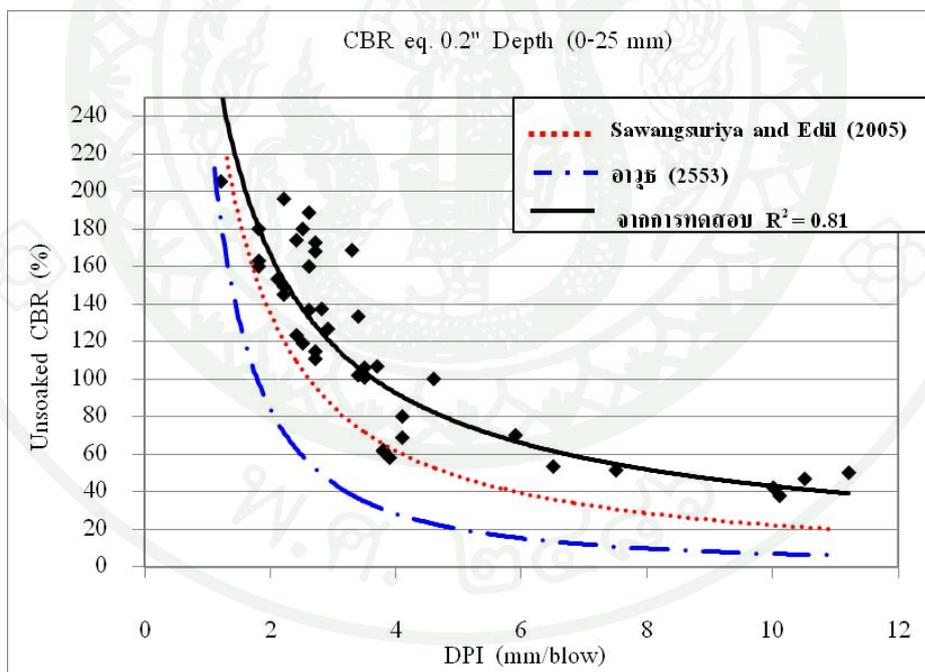
ภาพผนวกที่ ๑๖ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 75 mm
วัสดุหินผุชนิดที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



ภาพผนวกที่ ๓๖ (ต่อ)

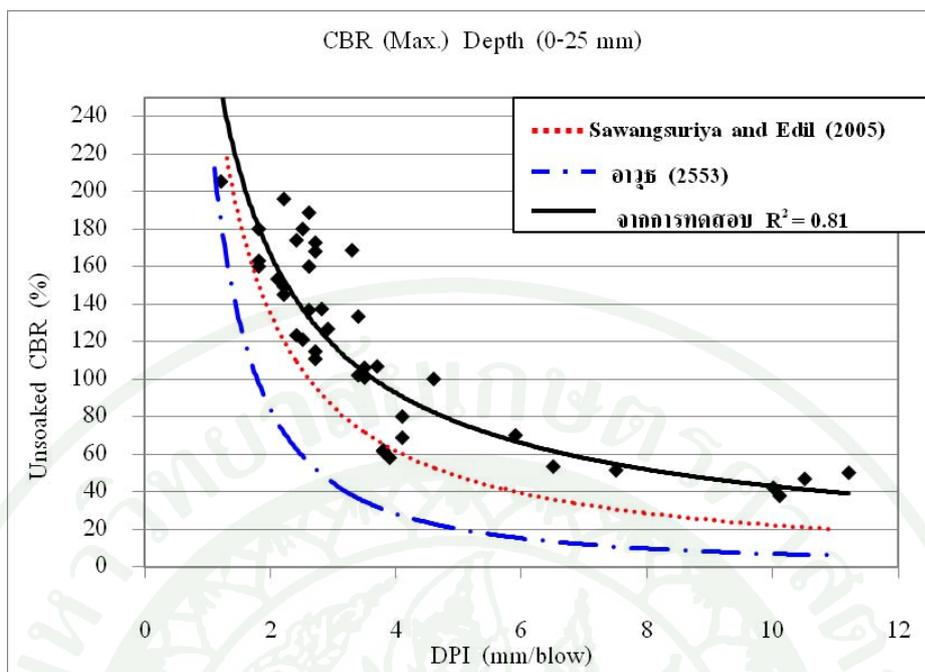


(ก)



(ข)

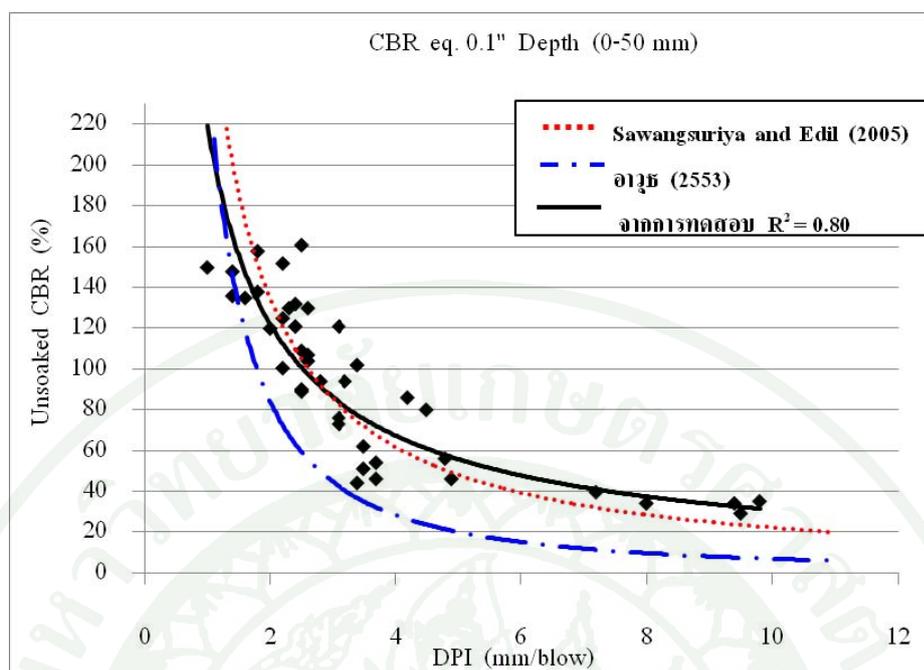
ภาพผนวกที่ ๗ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



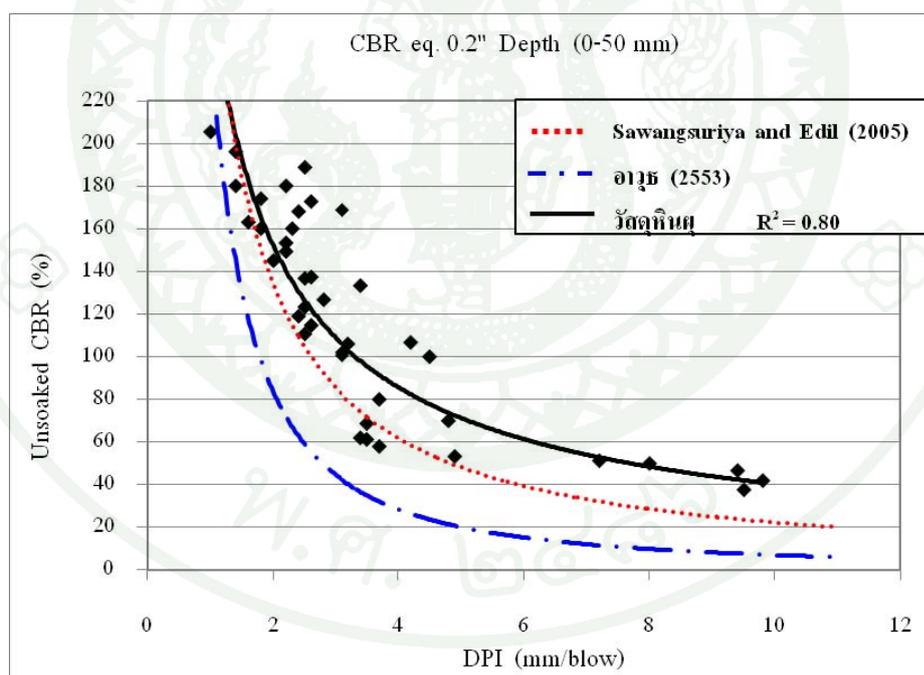
(ค)

ภาพผนวกที่ ค7 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

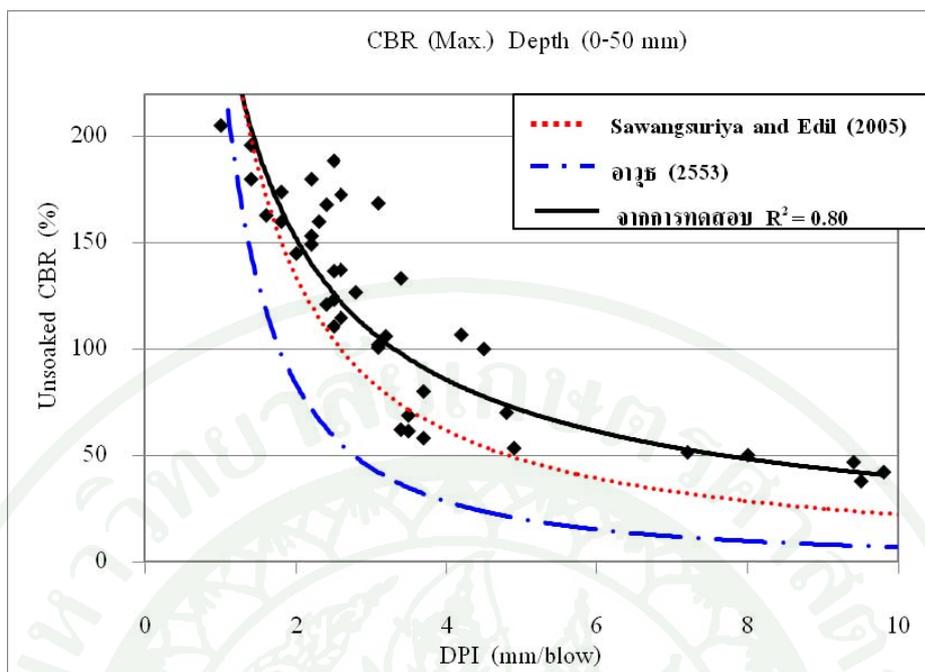


(ก)



(ข)

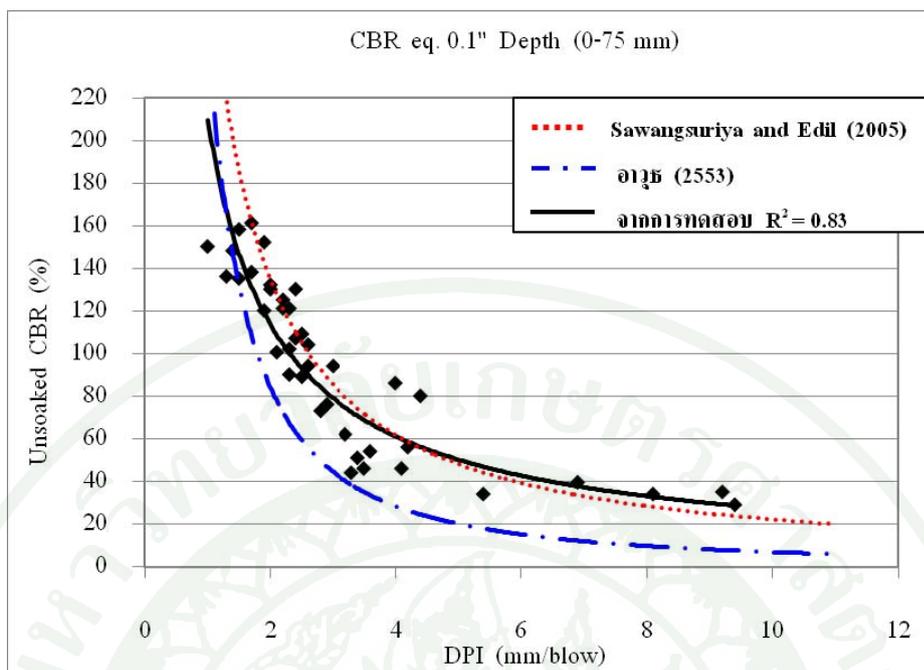
ภาพผนวกที่ ๑๘ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0-50 mm
วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



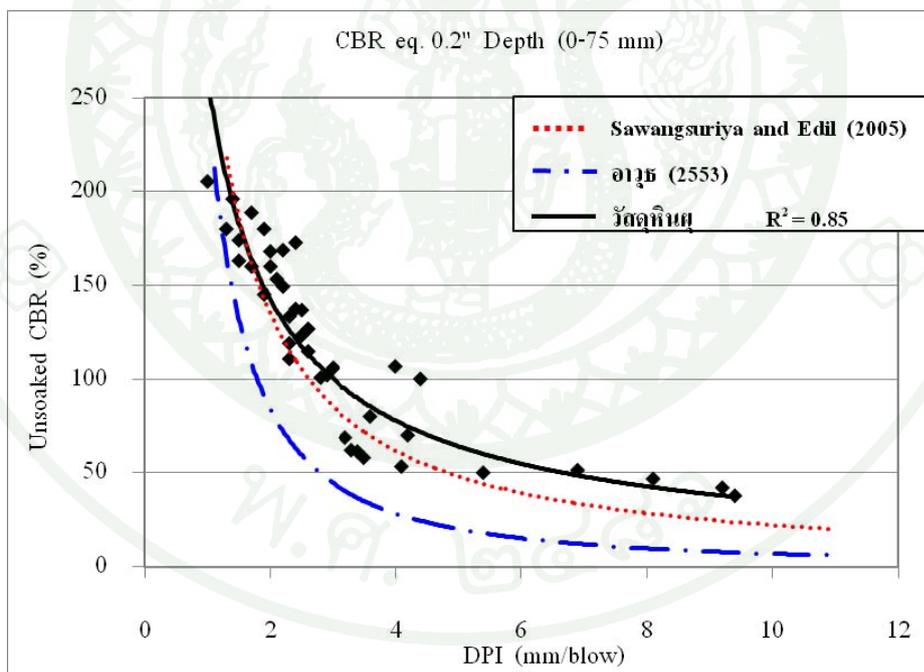
(ค)

ภาพผนวกที่ ๑๘ (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

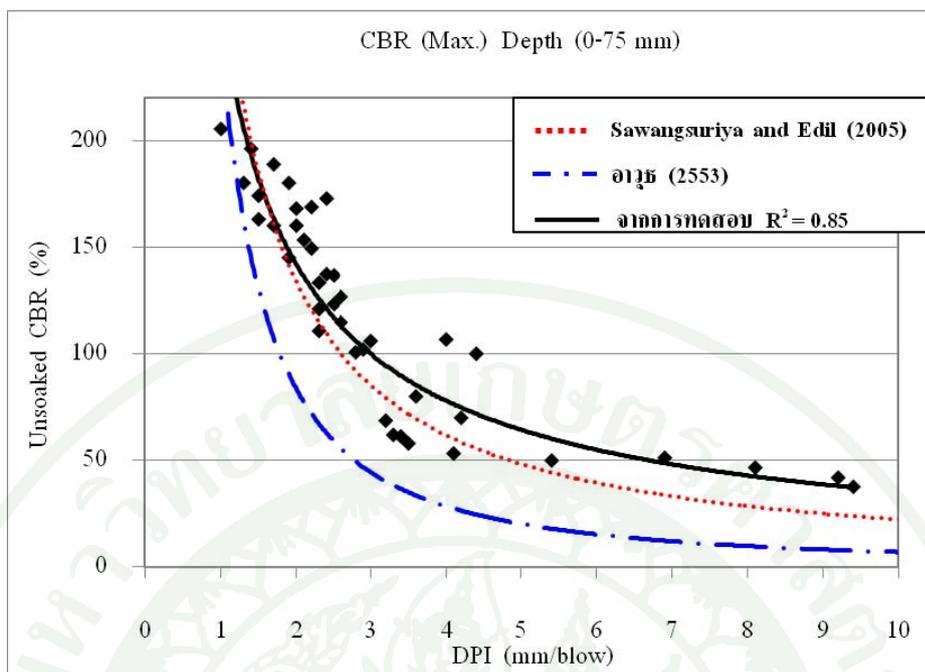


(ก)



(ข)

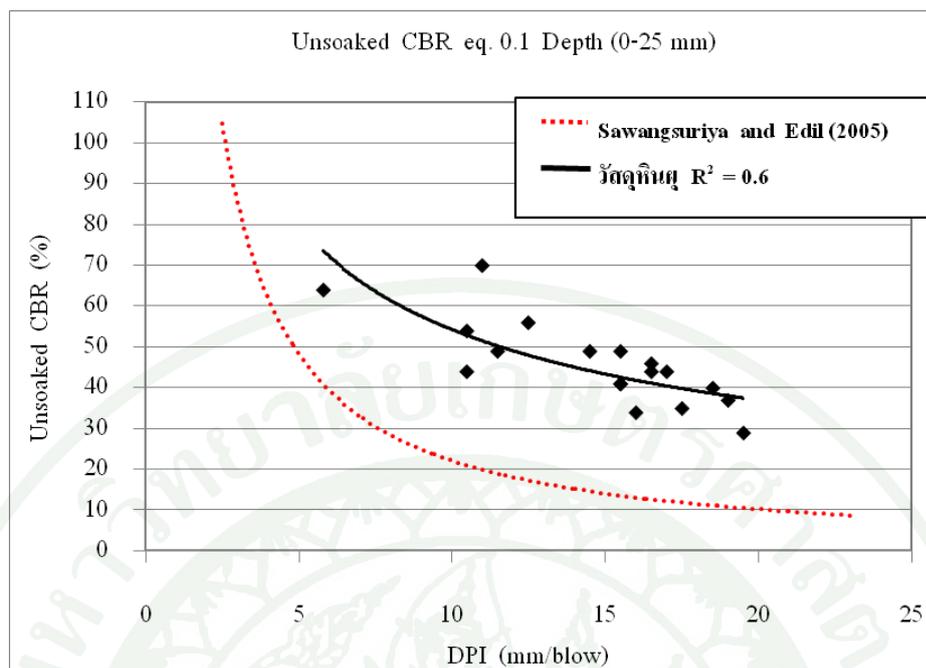
ภาพผนวกที่ ๙ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR และ DPI ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 75 mm วัตุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



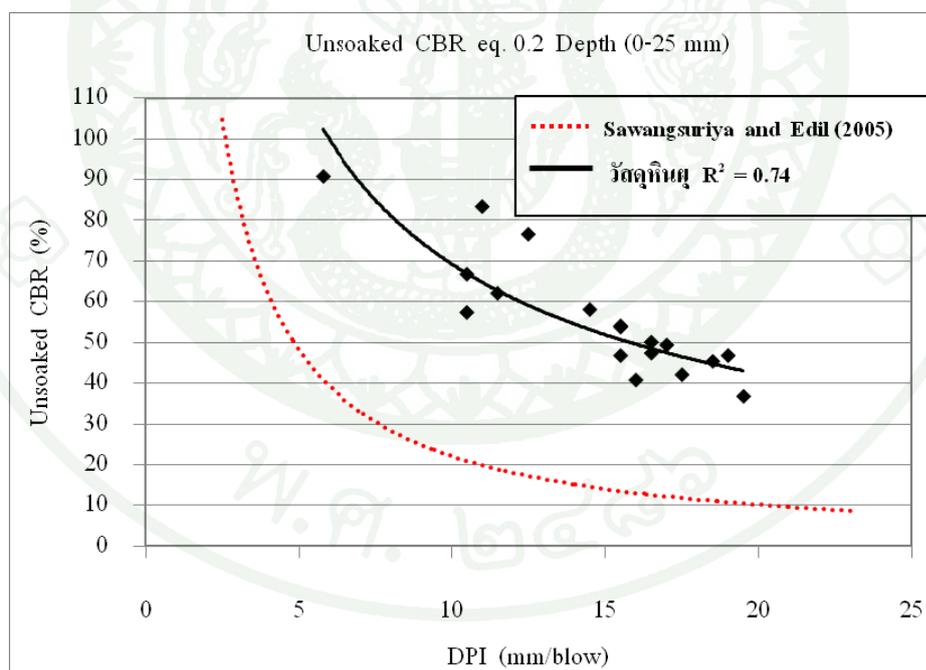
(ค)

ภาพผนวกที่ ๑๑ (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๕๖

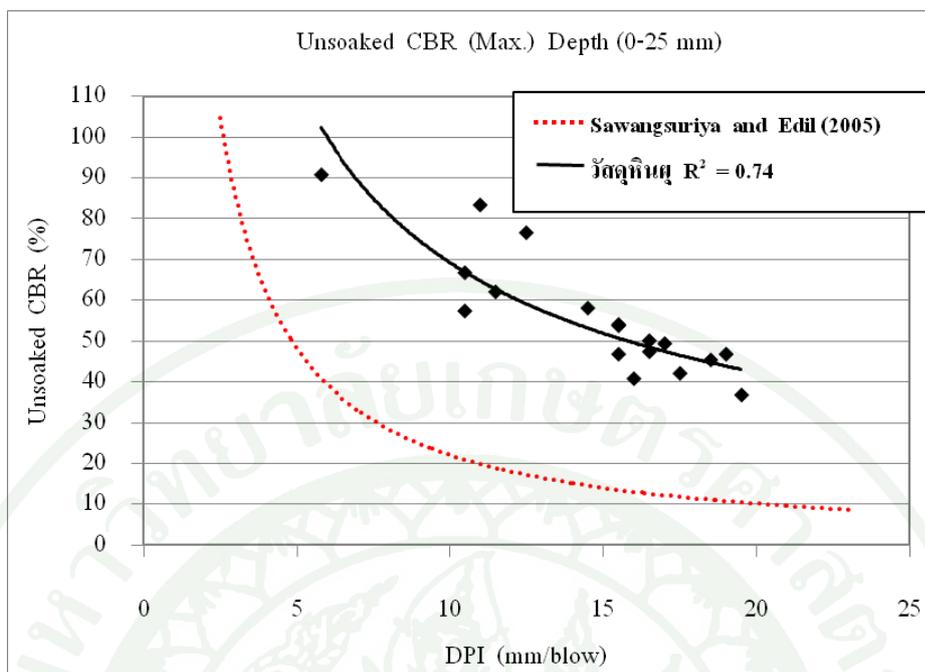


(ก)



(ข)

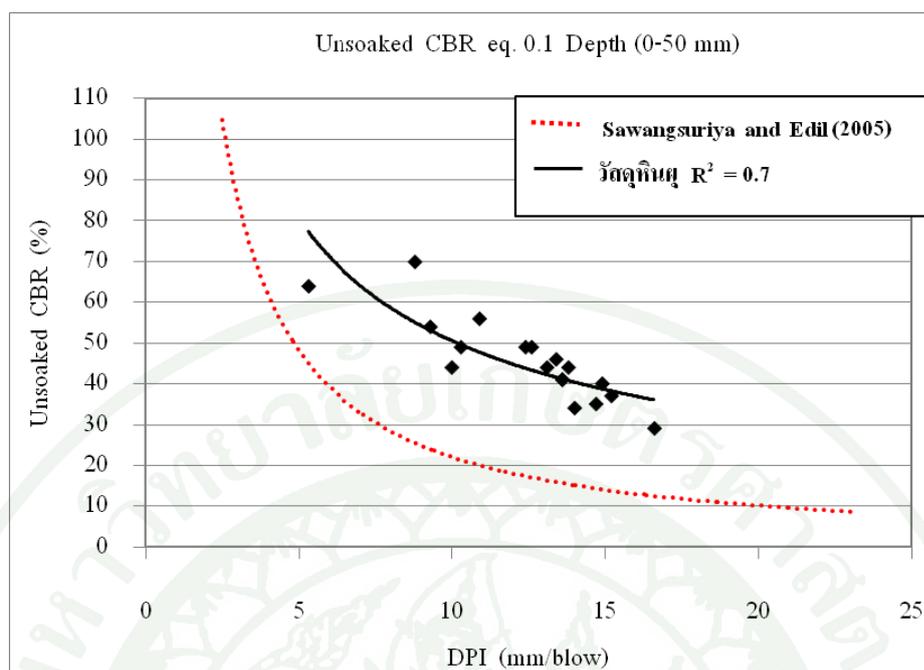
ภาพผนวกที่ ค10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 6" ที่ระยะการจมน 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



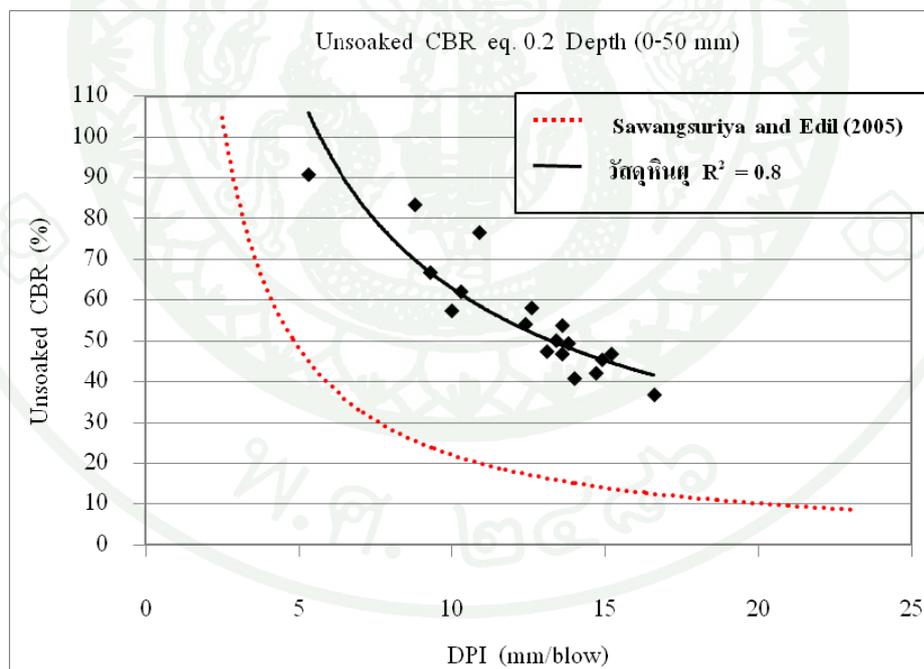
(ค)

ภาพผนวกที่ ค10 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

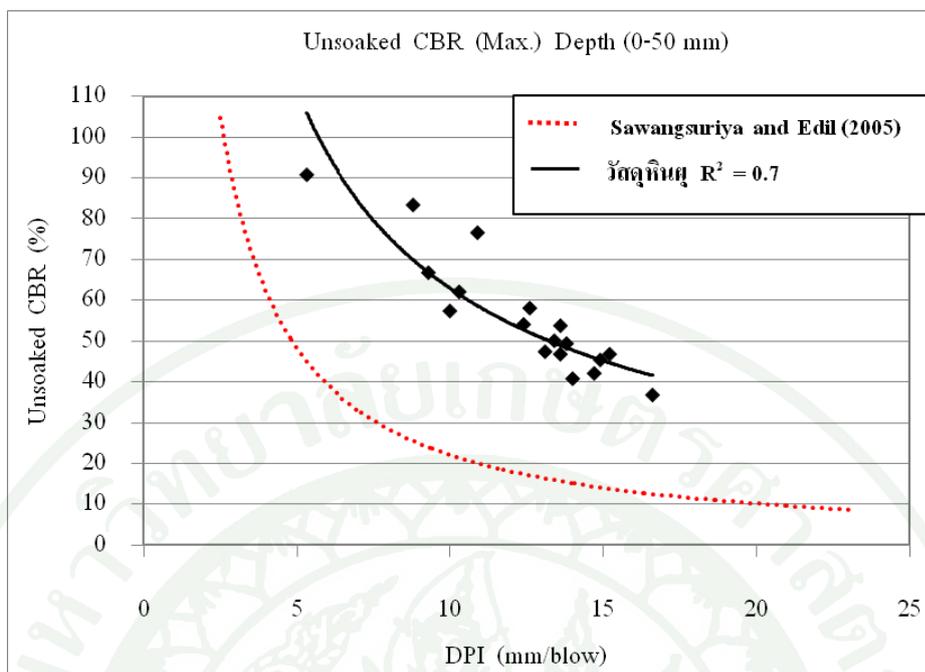


(ก)



(ข)

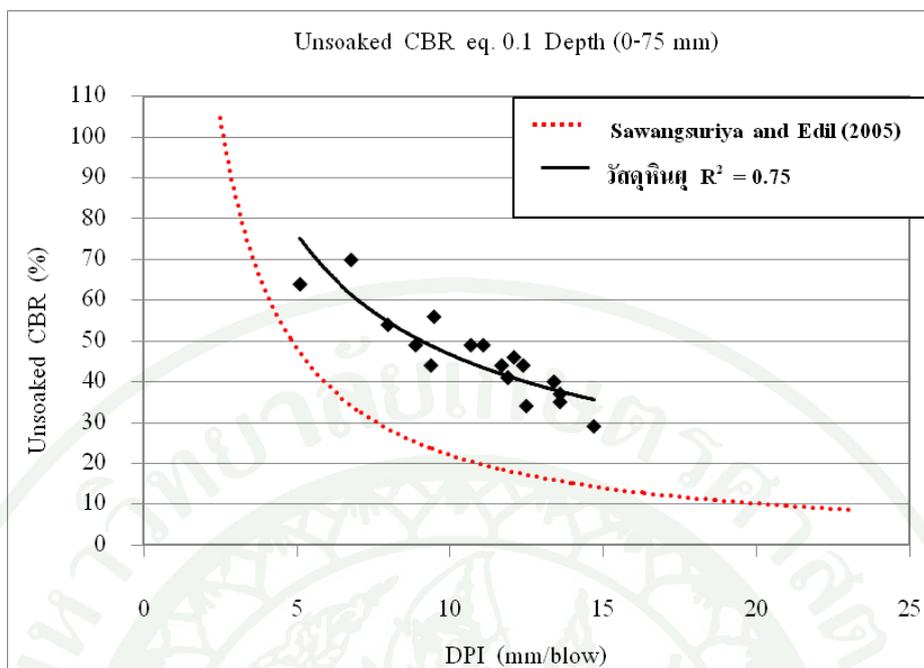
ภาพผนวกที่ ค11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 6" ที่ระยะการจมน 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



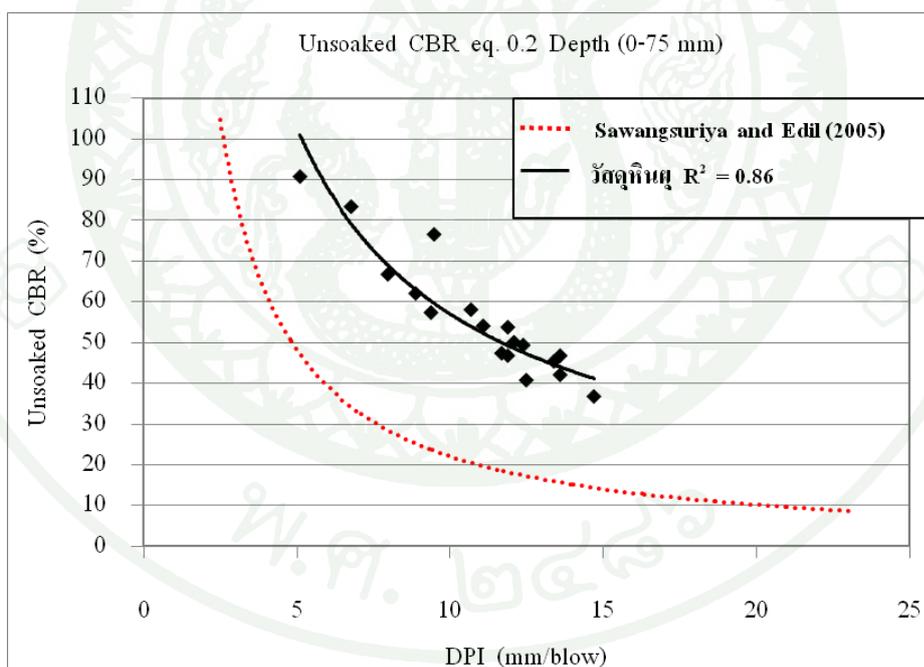
(ค)

ภาพผนวกที่ ค11 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

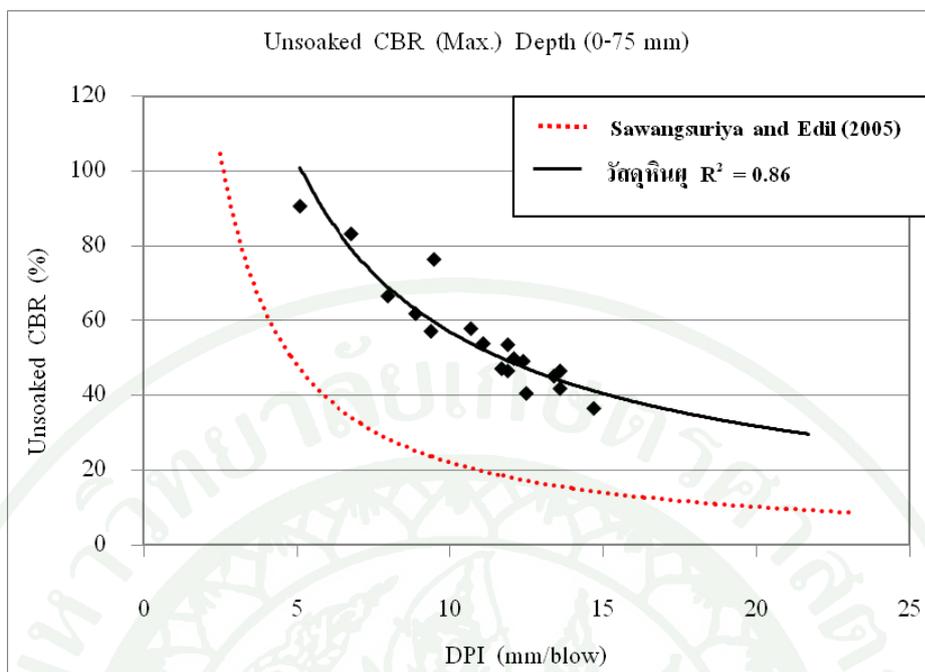


(ก)



(ข)

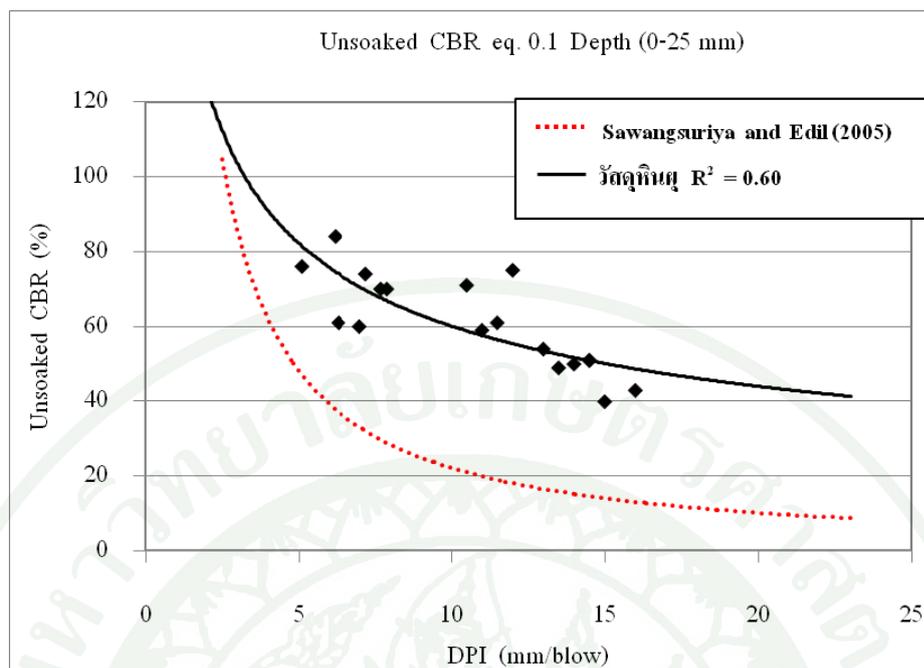
ภาพผนวกที่ ค12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 6” ที่ระยะการจมน 0 – 75 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



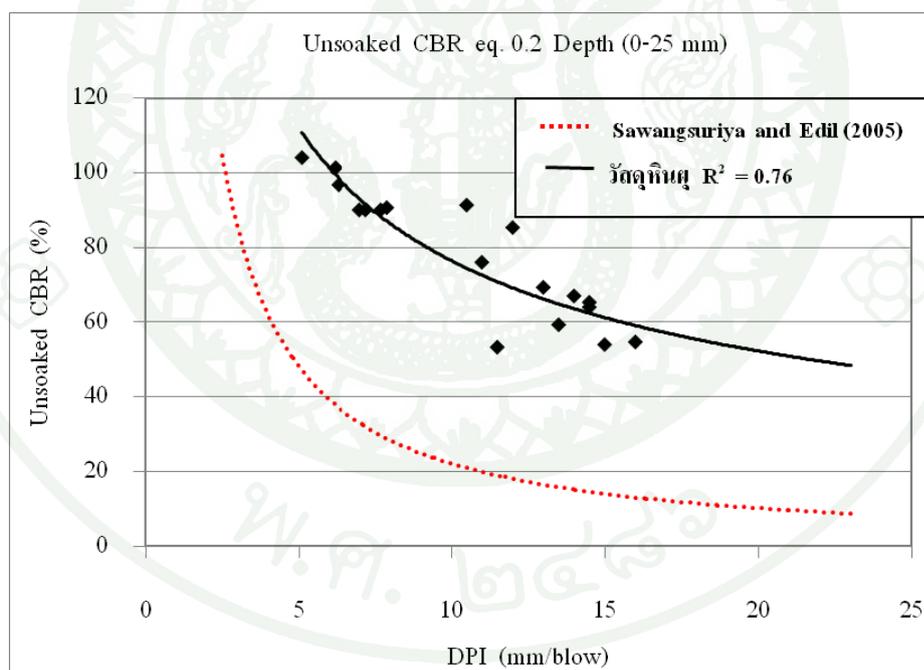
(ค)

ภาพผนวกที่ ค12 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

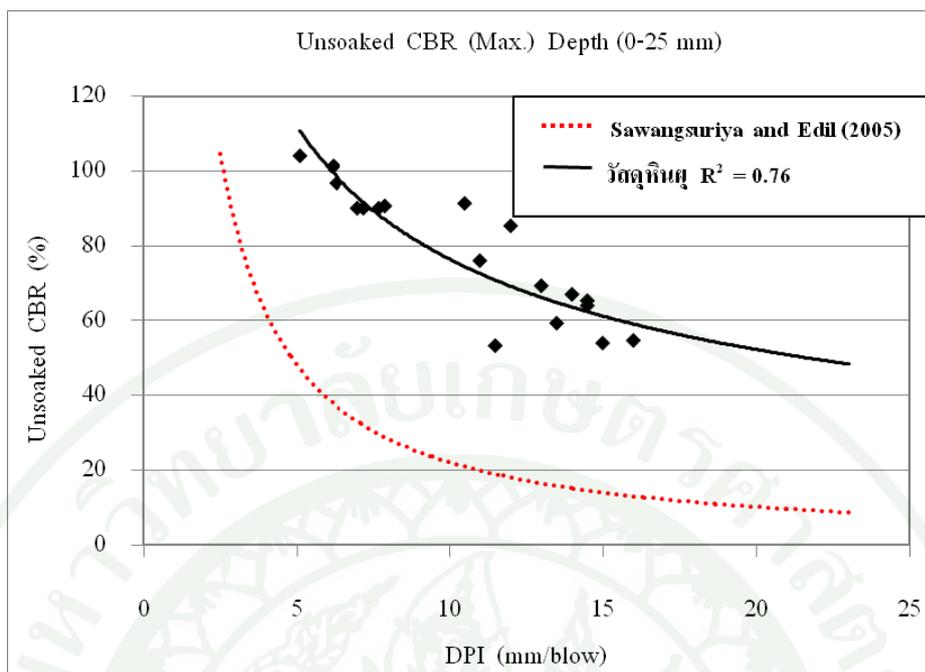


(ก)



(ข)

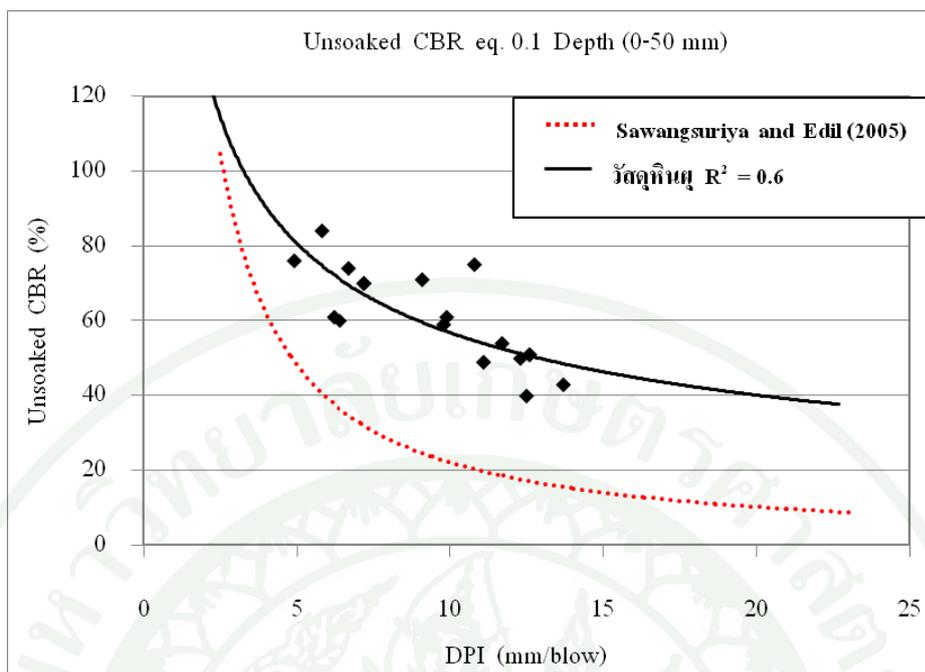
ภาพผนวกที่ ค13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 8” ที่ระยะการจมน 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



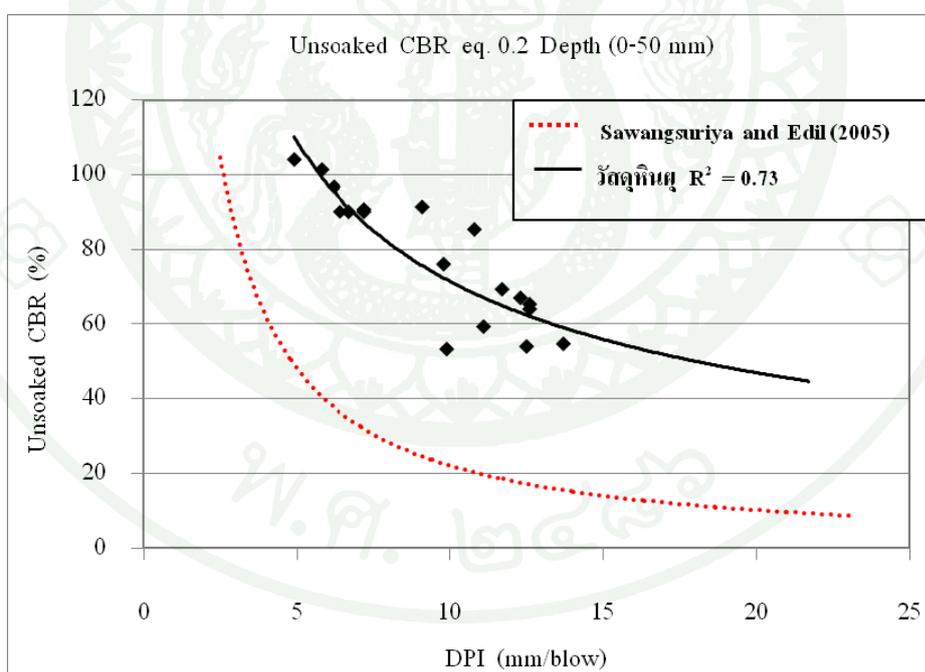
(ค)

ภาพผนวกที่ ค13 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

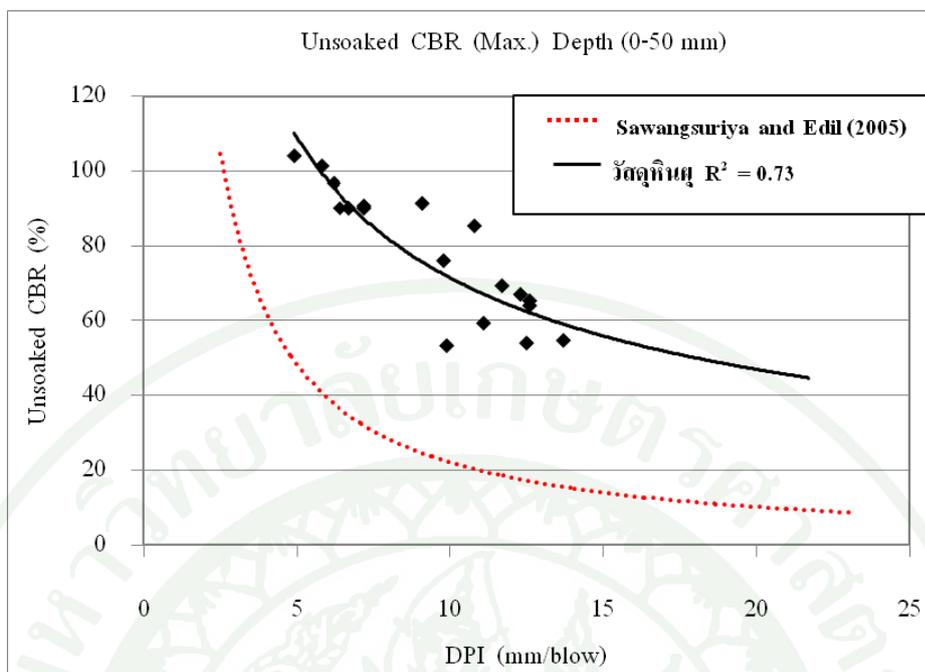


(ก)



(ข)

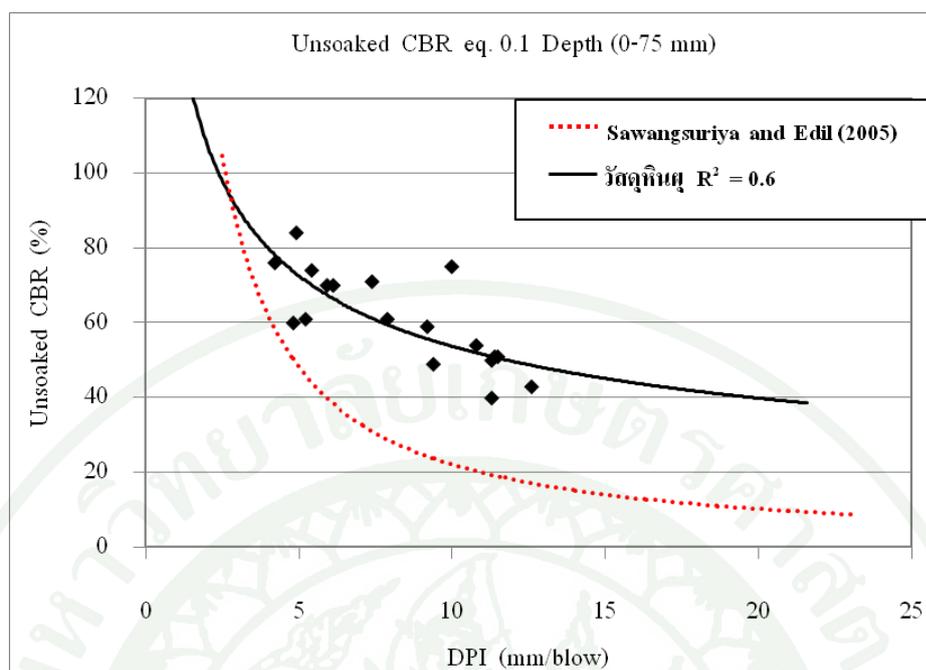
ภาพผนวกที่ ค14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 8” ที่ระยะการจมน 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



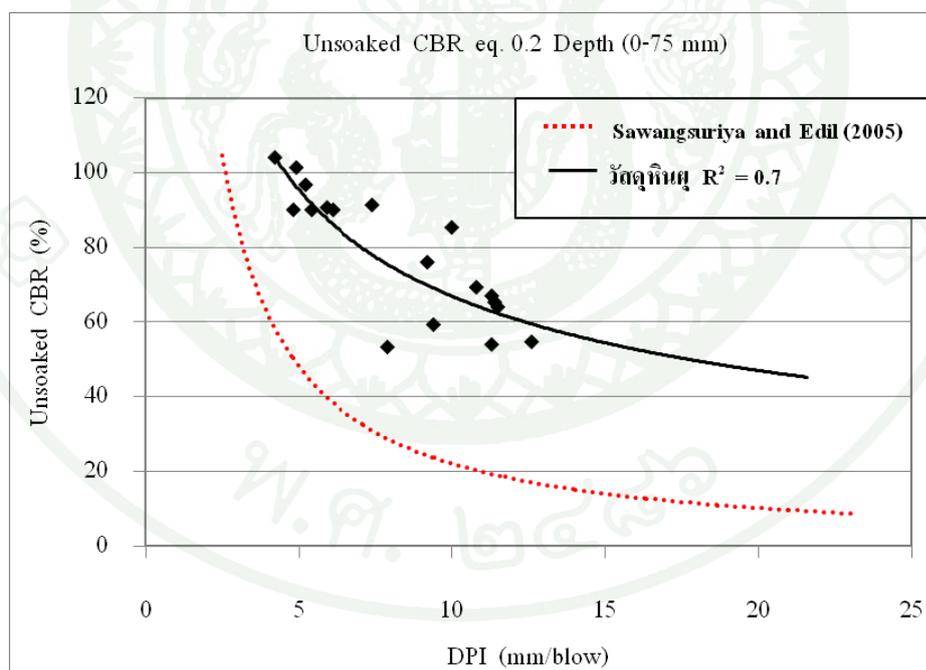
(ค)

ภาพผนวกที่ ค14 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

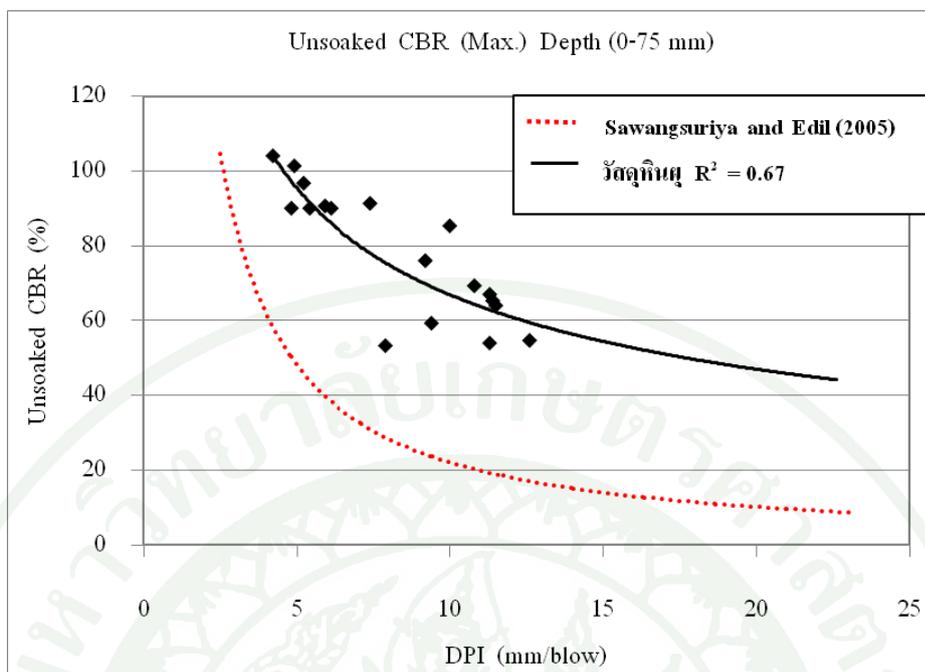


(ก)



(ข)

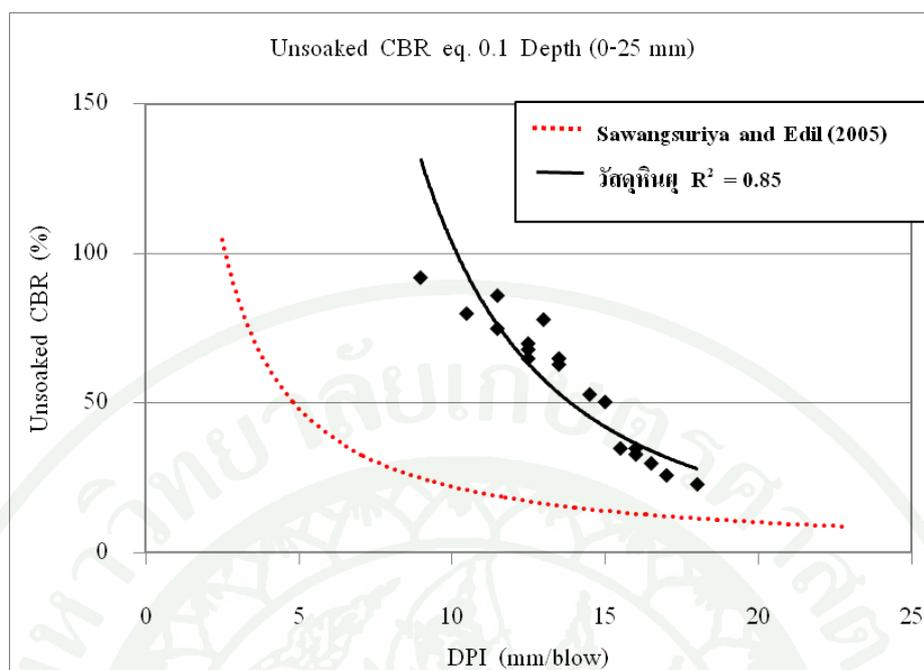
ภาพผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 8” ที่ระยะการจมน้ำ 0 – 75 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



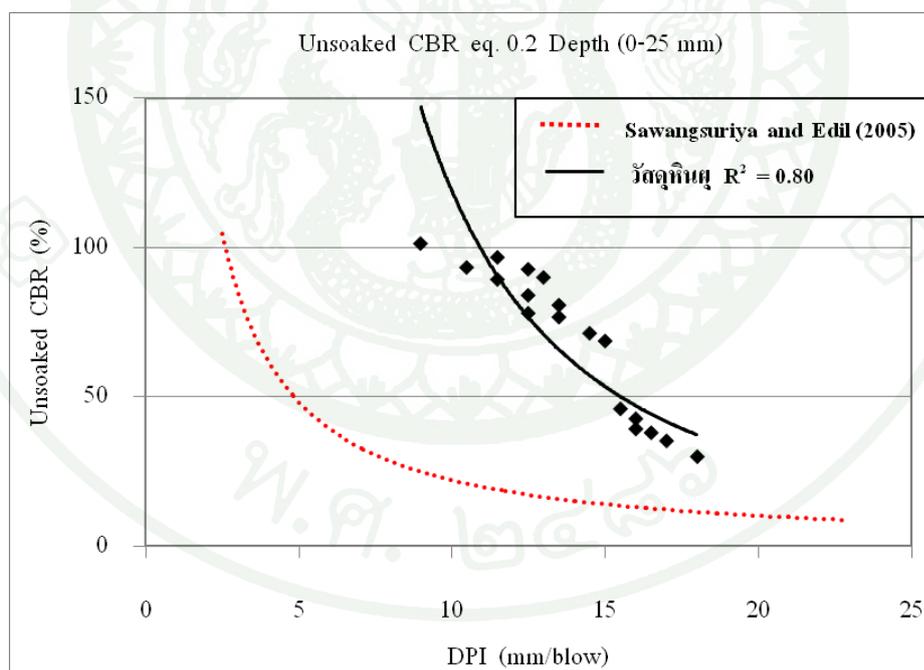
(ค)

ภาพผนวกที่ ค15 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

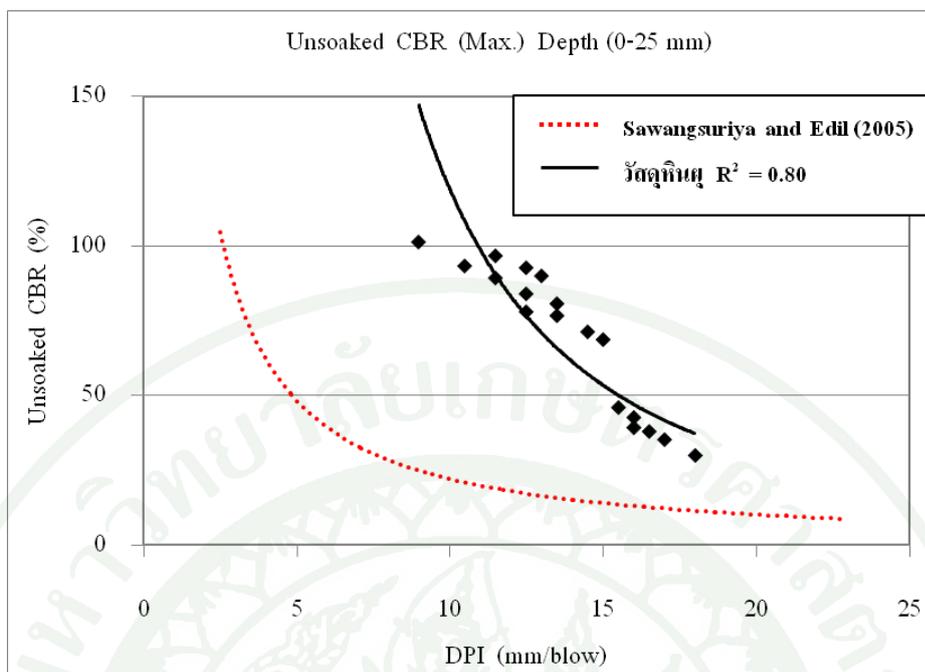


(ก)



(ข)

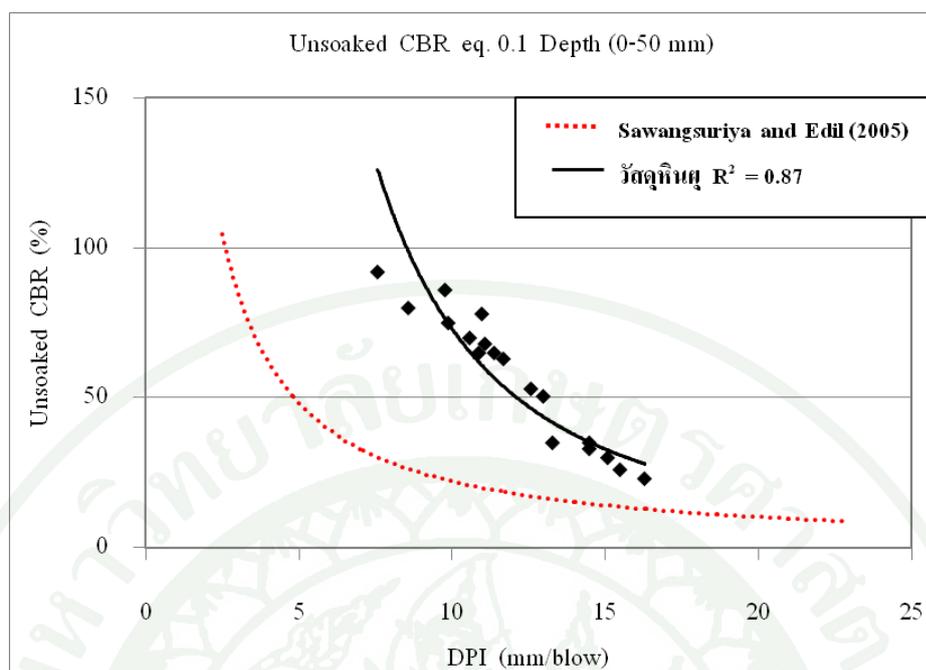
ภาพผนวกที่ ค16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 10” ที่ระยะการจมนม 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



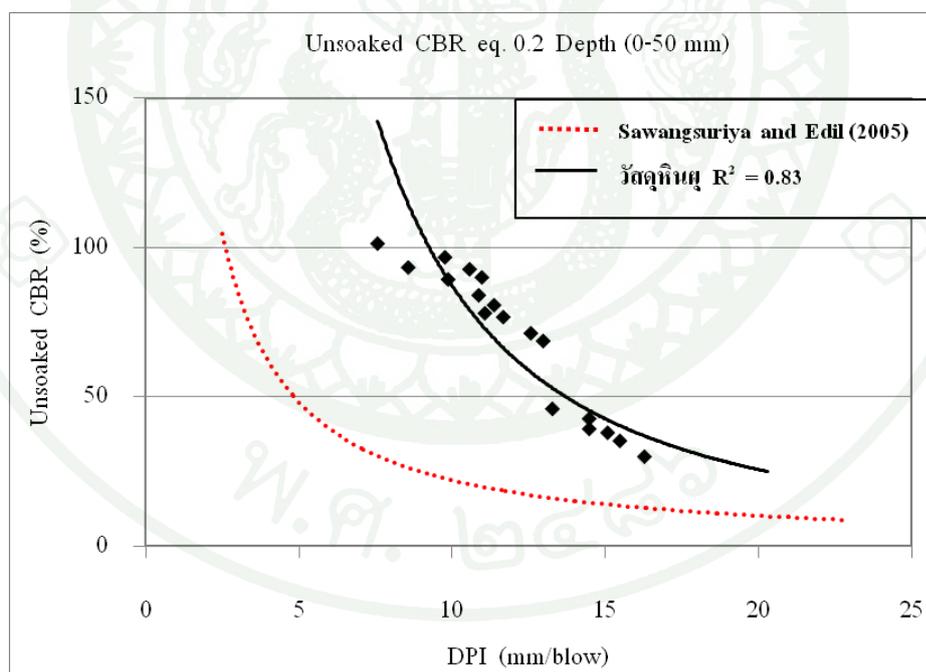
(ค)

ภาพผนวกที่ ค16 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

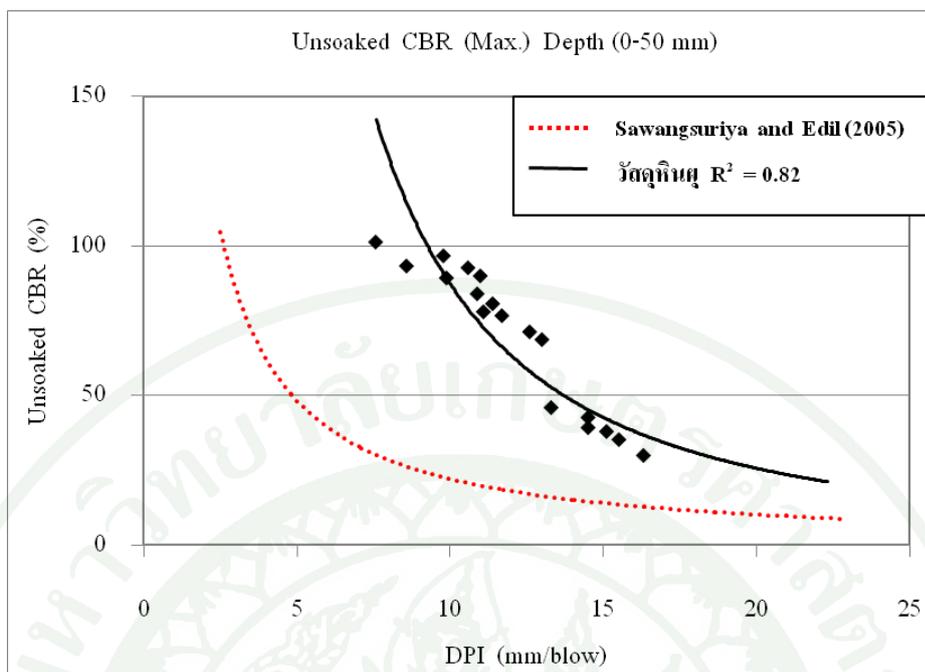


(ก)



(ข)

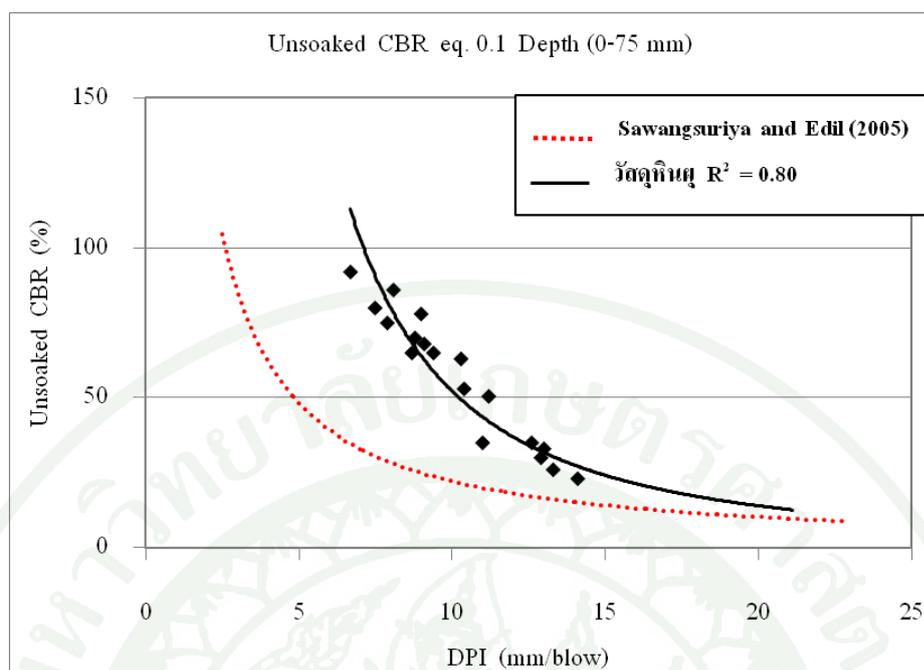
ภาพผนวกที่ ค17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 10” ที่ระยะการจมนม 0 – 50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



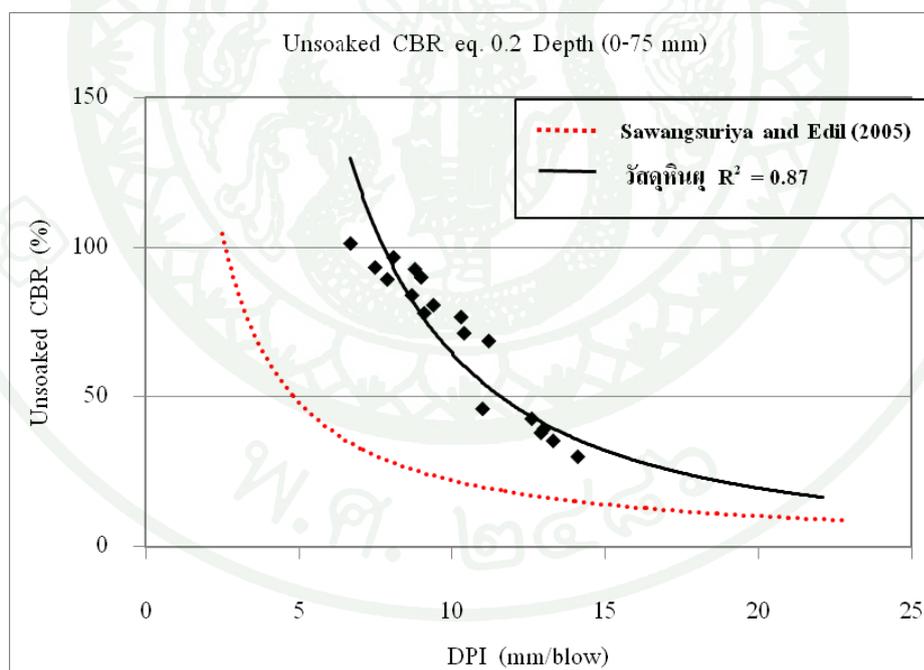
(ค)

ภาพผนวกที่ ค17 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

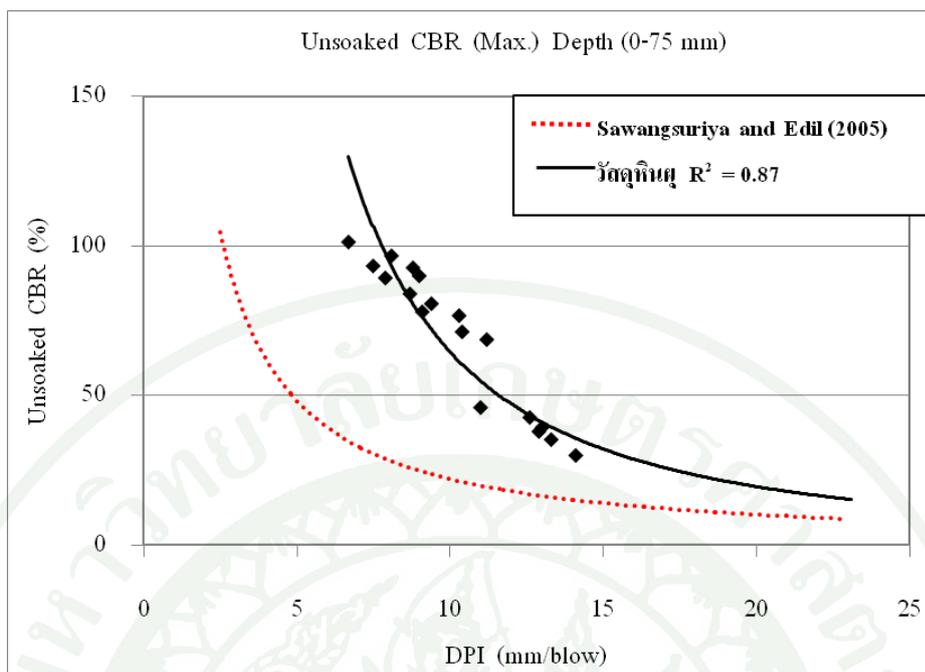


(ก)



(ข)

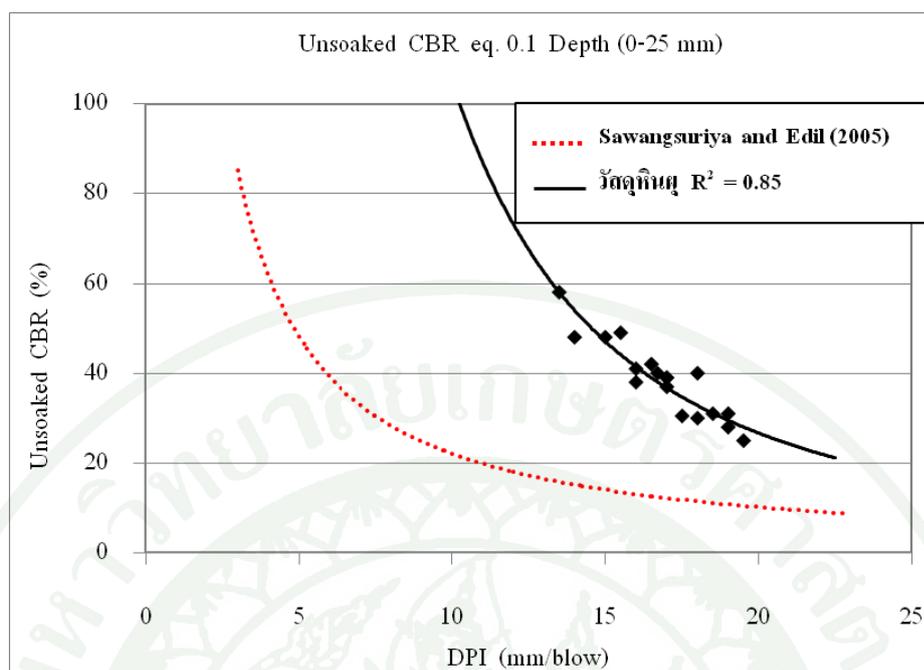
ภาพผนวกที่ ค18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 10” ที่ระยะการจมน้ำ 0-75 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



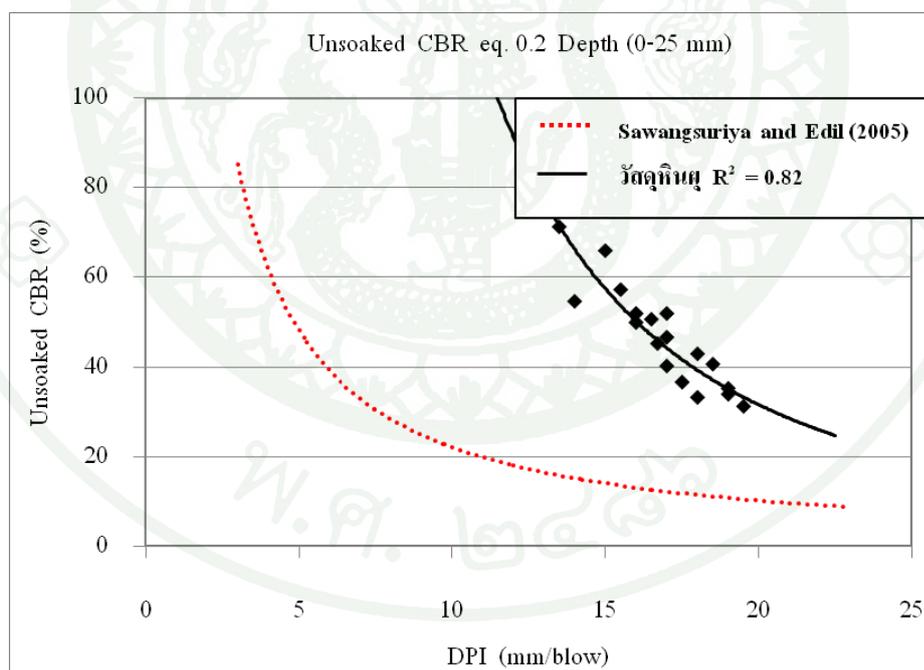
(ค)

ภาพผนวกที่ ค18 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

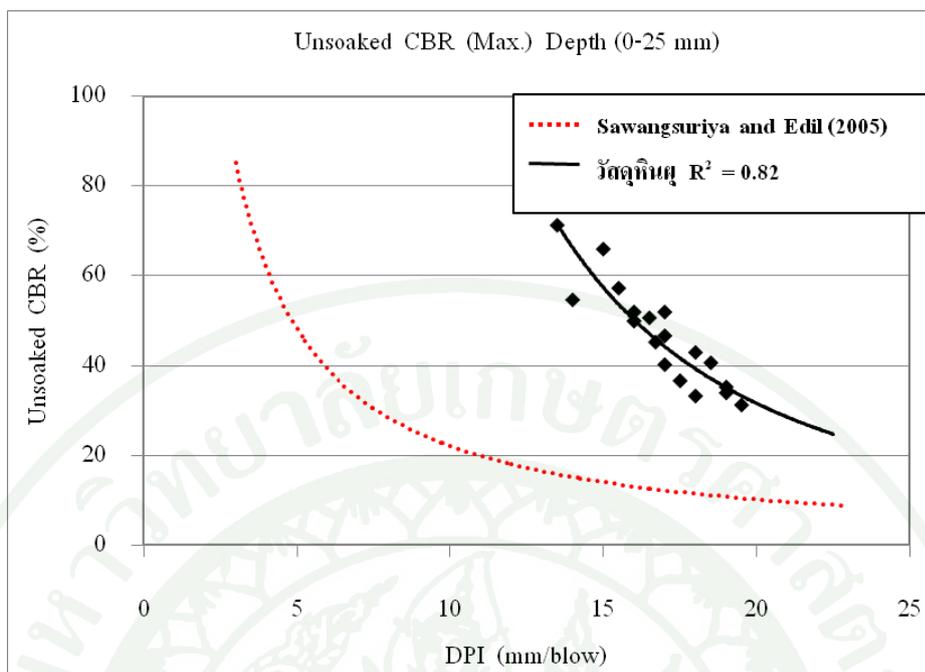


(ก)



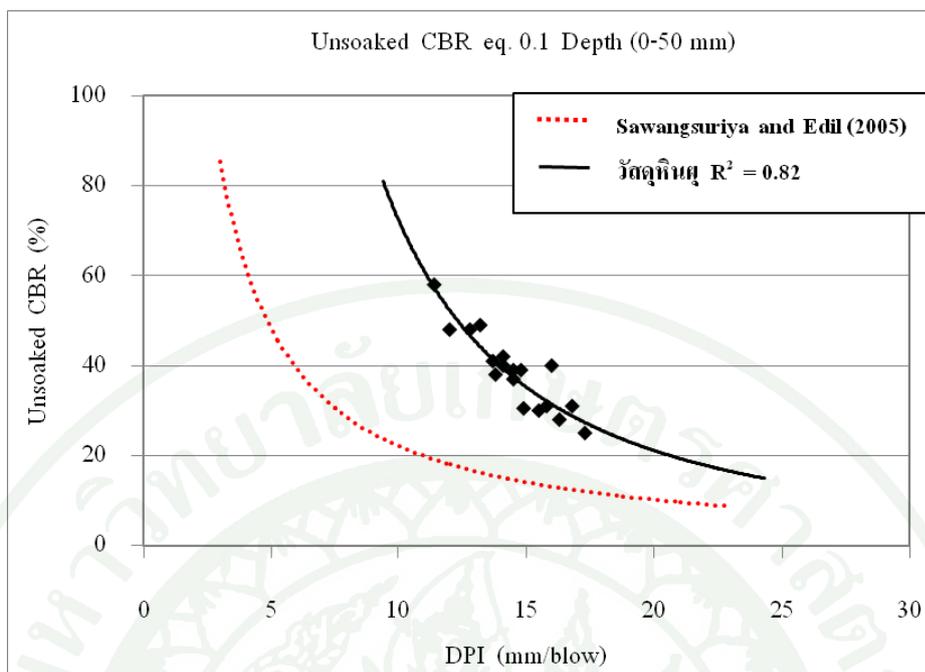
(ข)

ภาพผนวกที่ ค19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 12” ที่ระยะการจมนม 0 – 25 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

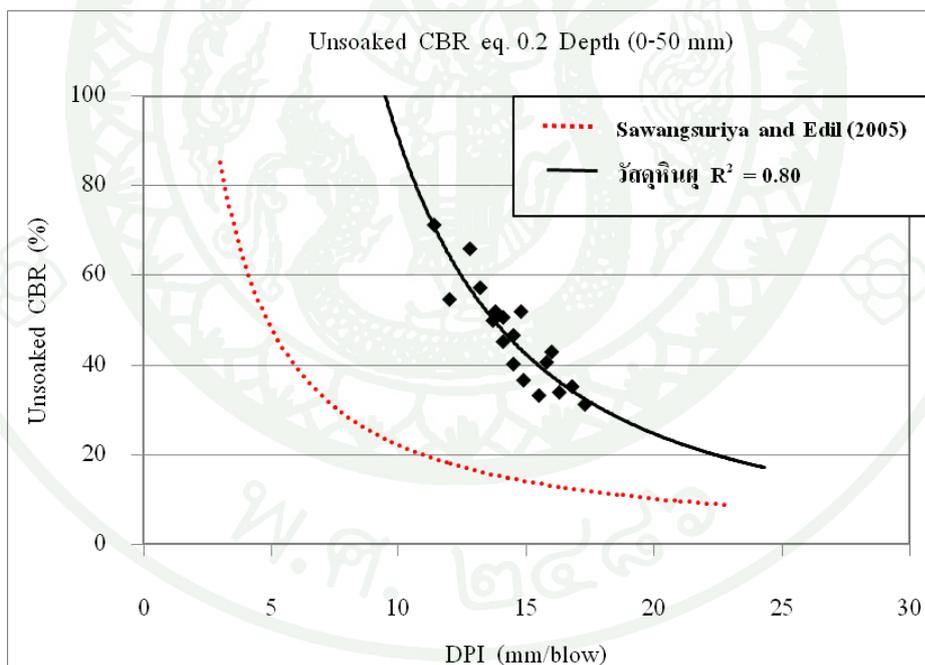


(ค)

ภาพผนวกที่ ค19 (ต่อ)

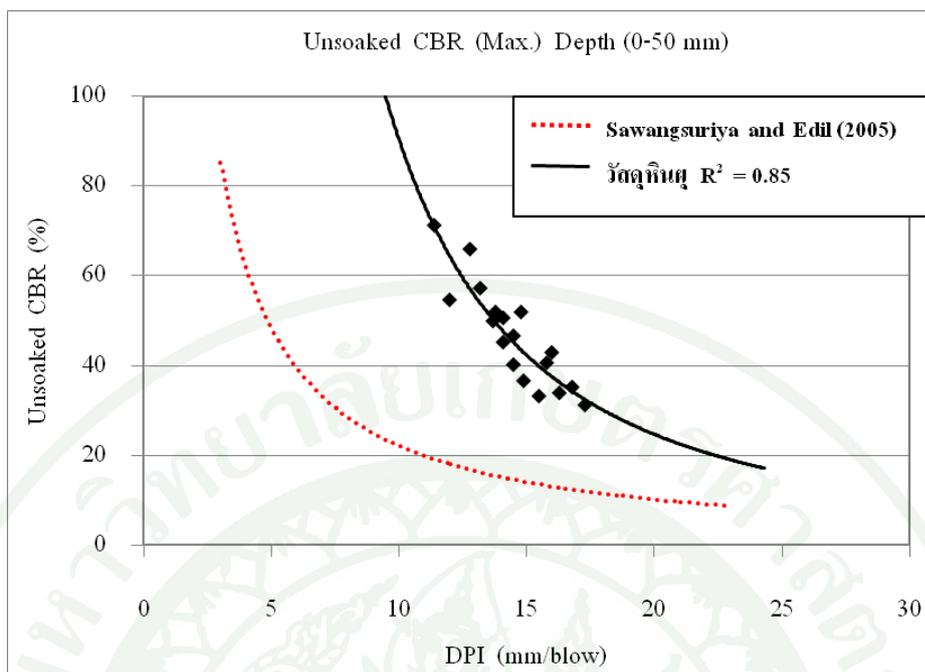


(ก)



(ข)

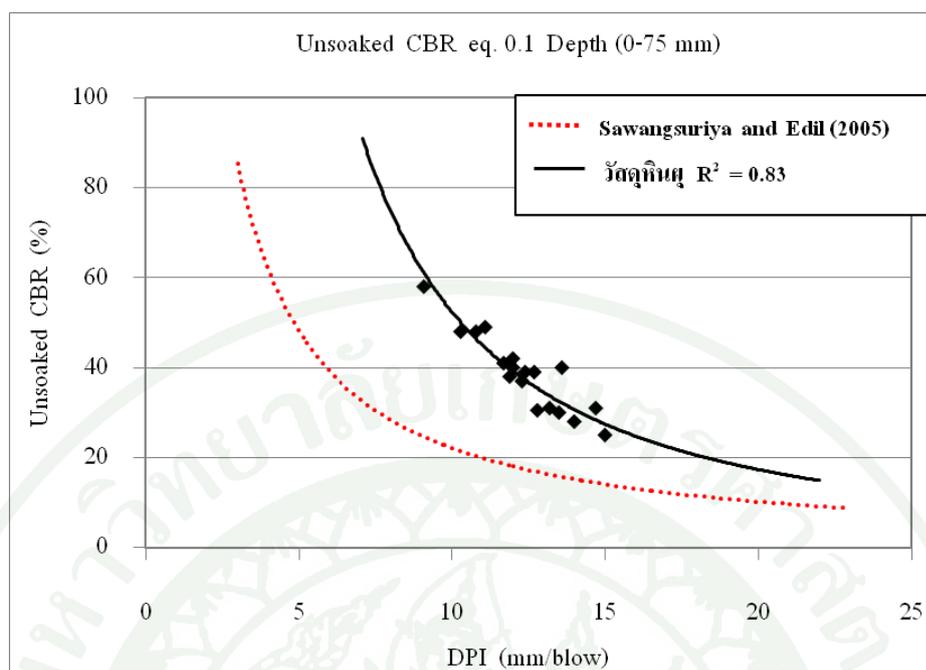
ภาพผนวกที่ ค20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 12” ที่ระยะการจมน 0-50 mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



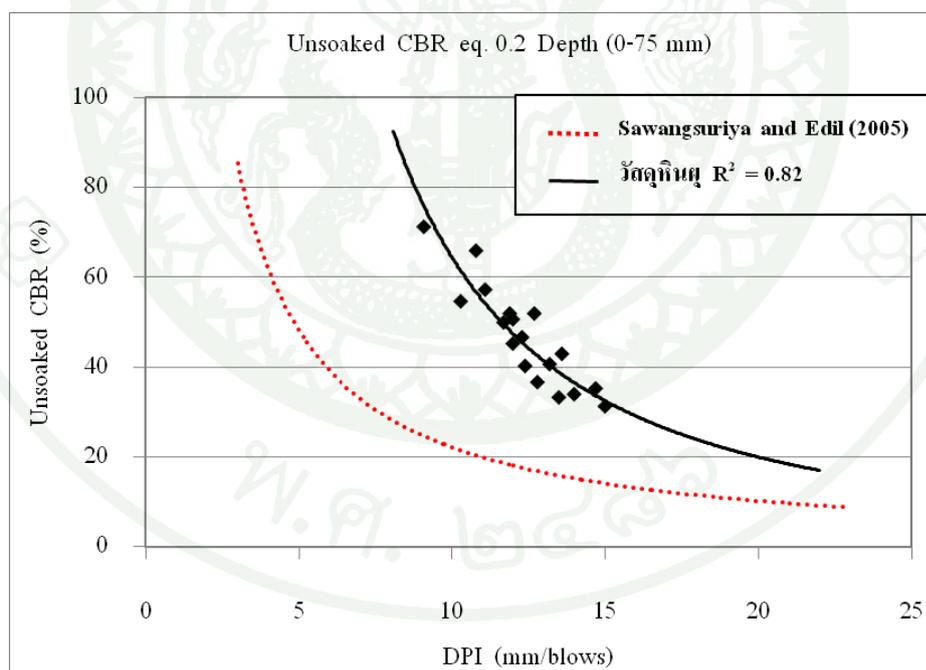
(ค)

ภาพผนวกที่ ค20 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖

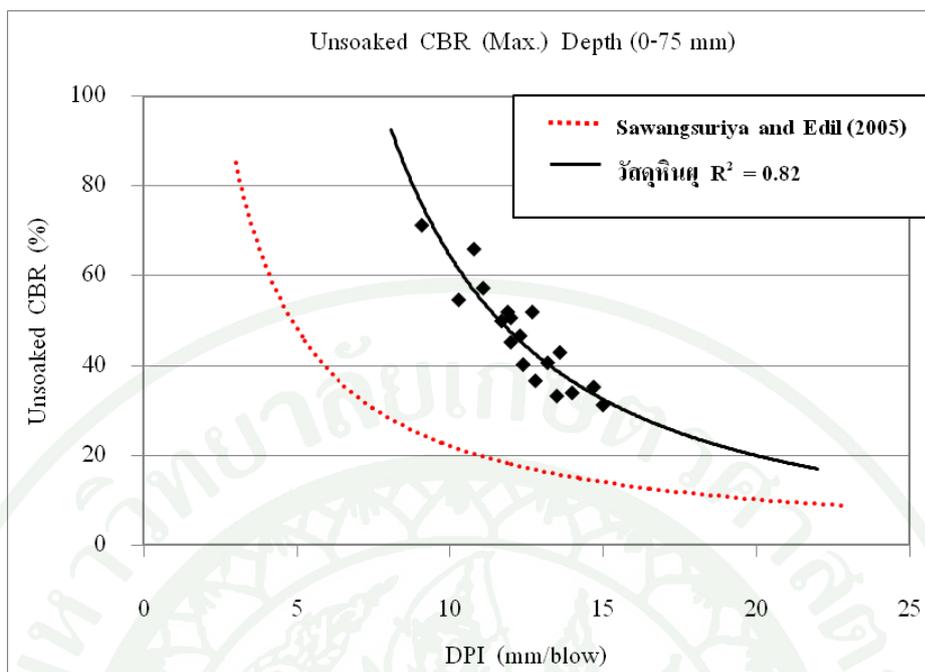


(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ค21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unsoaked CBR ขนาด Mold 12” ที่ระยะการจมน้ำ 0–75mm วัสดุหินผุ ชนิดที่ 1 และ 2 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



(ค)

ภาพผนวกที่ ค21 (ต่อ)

พ.ศ. ๒๕๖๖



การคำนวณการปรับเทียบขนาดท่อนเหล็กกลมตันหัวกด CBR

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

$$Y = \frac{X}{1.95} x$$

เมื่อ Y = ระยะปรับแก้ที่นำมาใช้อ้างอิงสำหรับอ่านค่าแรงกด

X = ระยะการจมใดๆ ของท่อนเหล็กกลมตัน

= ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 1 ตารางนิ้ว

= ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 3 ตารางนิ้ว

โดยที่ X = เทียบเท่าและระยะการจมที่ 0.1 นิ้ว

= ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 1 ตารางนิ้ว มีค่าเท่าและ 1.13 นิ้ว

= ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนเหล็กกลมตันที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 3 ตารางนิ้ว มีค่าเท่าและ 1.95 นิ้ว

จะได้
$$Y = \frac{0.1}{1.95} x 1.13$$

$$Y = 0.058 \text{ นิ้ว}$$

ดังนั้น ท่อนเหล็กกลมตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว ที่ระยะการจม 0.058 นิ้ว มีค่าเทียบเท่าและท่อนเหล็กกลมตันขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว ที่ระยะการจม 0.1 นิ้ว

การคำนวณพลังงานที่ใช้บดทับ

พลังงานที่ใช้บดทับเป็นตัวแปรสำคัญมากในการทดสอบ การบดทับในงานวิจัยนี้ใช้การบดทับแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Proctor) การบดทับวัสดุตัวอย่างในห้องทดสอบจะต้องคำนึงถึงขนาดแบบทดสอบ น้ำหนักค้อนที่ใช้ ระยะยกของค้อน จำนวนชั้นดินที่บดทับและความหนาของชั้นดินในการบดทับแต่ละชั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

แบบทดสอบ (Mold CBR) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว

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

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

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

แบบทดสอบ (Mold UCS) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

โดยที่	B	=	จำนวนชั้น 5 ชั้น
	N	=	จำนวนครั้งที่ตอก 25 ครั้ง
	W	=	น้ำหนักก้อน 4.53×10^{-3} ton
	H	=	ระยะยกก้อน 0.46 m
	V	=	ปริมาตรของตัวอย่างในแบบทดสอบ 9.4×10^{-4} m ³

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

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

ดังนั้น พลังงานที่ใช้กดทับมีค่าเท่ากับ 277.5 t-m/m^3