

อิทธิพลของขนาดแบบบดอัดและปริมาณกรวด  
ต่อผลการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

นายเอกชัย ม่านโคกสูง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2551

**INFLUENCE OF MOLD SIZE AND GRAVEL CONTENT  
ON LABORATORY COMPACTION TEST RESULTS**

**Ekachai Mann-koksung**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2008**

## อิทธิพลของขนาดแบบบอดี้และปริมาณกรดต่อผลการบอดี้ดัดในห้องปฏิบัติการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานำฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.สุทัศน์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อนุชิต อุชายภิกษาคติ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เอกชัย ม่านโคกสูง : อิทธิพลของขนาดแบบบดอัดและปริมาณกรวดต่อผลการบดอัดดิน  
ในห้องปฏิบัติการ (INFLUENCE OF MOLD SIZE AND GRAVEL CONTENT ON  
LABORATORY COMPACTION TEST RESULTS) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 69 หน้า.

การบดอัดดินเป็นวิธีพื้นฐานในการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างดิน  
ในทุก ๆ วันทั่วโลกมีการบดอัดดินเป็นจำนวนนับพันลูกบาศก์เมตร ซึ่งการทดสอบการบดอัดดิน  
แบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D 698 - 91) หรือสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D 1557 - 91)  
เป็นวิธีการทดสอบบดอัดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อใช้ในการควบคุมการบดอัดดินในสนาม  
อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จะต้องใช้เวลาและ  
แรงงานคนในการทดสอบบดอัดมาก การใช้ชุดทดสอบที่มีขนาดเล็กลงจึงเป็นสิ่งที่น่าพิจารณา  
เพื่อให้การพัฒนาชุดทดสอบขนาดเล็กเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษา  
อิทธิพลของคุณลักษณะชุดทดสอบที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการลดลงของขนาดของชุดทดสอบต่อ  
ผลทดสอบการบดอัดดิน ชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กที่เสนอมีคุณลักษณะของชุดทดสอบ  
ใกล้เคียงกับคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จึงทำให้ง่ายต่อการ  
นำไปใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ผลทดสอบการบดอัดด้วยชุดทดสอบการบดอัด  
ที่เสนอมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ อย่างไรก็ตามชุดทดสอบ  
การบดอัดที่เสนอสามารถใช้ทดสอบการบดอัดได้เฉพาะกับดินที่ไม่มีกรวดปน และเพื่อให้ชุด  
ทดสอบการบดอัดที่เสนอสามารถใช้ได้กับดินปนกรวด วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของ  
กรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณกรวดจะเป็นตัวควบคุมการ  
ถ่ายทอดพลังงานการบดอัดไปสู่ส่วนละเอียด (Fine fraction) รวมทั้งคุณลักษณะการบดอัดของ  
ส่วนละเอียด เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดและพลังงานการบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่  
ส่วนละเอียด และนำไปใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม  
ของดินปนกรวด พบว่าคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวดที่ได้จากการประมาณสอดคล้องกับ  
ค่าที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

EKACHAI MAN-KOKSUNG : INFLUENCE OF MOLD SIZE AND  
GRAVEL CONTENT ON LABORATORY COMPACTION TEST  
RESULTS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. AVIRUT  
CHINKULKIJNIWAT, Dr.Eng., 69 PP.

PROCTOR TEST/SMALL COMPACTION APPARATUS /INFLUENCE OF  
GRAVEL/COMPACTION ENERGY

Compaction is a classical ground improvement method for earth structures. Everyday thousands of cubic meter of soil are compacted throughout the world. Proctor test (e.g. ASTM D698-91 and ASTM D1557-91) is widely used to characterize soil compatibility for proper control over the field compaction. However, this procedure is time consuming and labor expensive. Thus, a smaller compaction apparatus is considered. For effectively introducing a new smaller apparatus, influence of changing equipment characteristics due to a reducing size of compaction apparatus must be investigated. The proposed apparatus is similar to the standard Proctor apparatus and is easy to introduce into any soil mechanics laboratory. The maximum dry density and the optimum water content yielded from the proposed compaction apparatus are excellent agreement with those yielded from the standard Proctor procedure. However, the proposed apparatus is valid only for non-gravel soil. To extend the availability of the proposed apparatus, influence of gravels on standard Proctor test results are investigated. It is found that the gravel content play a major role in controlling the transmitted compaction energy and thus the compaction characteristic of the fine fraction. Relationship between the gravel content and the transmitted compaction energy is established. This relationship is employed to estimate the maximum dry density and the optimum water content of gravelly soil. Good

agreement is found for comparison between the estimated values and the corresponding values from standard Proctor test.

School of Civil Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-advisor's Signature \_\_\_\_\_

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ

## บทที่

### 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 โครงร่างของวิทยานิพนธ์.....	2

### 2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ.....	3
2.2 การศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด.....	7
2.3 การศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัด.....	9

### 3 การศึกษาอิทธิพลการลดขนาดของแบบบดอัดดินและการพัฒนา

#### ชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก

3.1 บทนำ.....	15
3.2 การศึกษาอิทธิพลการลดขนาดของแบบบดอัดดิน.....	15
3.3 ชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก.....	20
3.4 ผลทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>4</b>	<b>อิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน</b>	
4.1	บทนำ.....	26
4.2	ตัวอย่างดินและวิธีการศึกษา.....	26
4.3	ผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	29
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดและปริมาณกรวด.....	50
4.5	การประมาณคุณลักษณะของดินปนกรวดด้วยชุดทดสอบการบดอัด ขนาดเล็ก.....	54
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดและคุณลักษณะการบดอัดของดิน.....	55
4.7	การประมาณคุณลักษณะการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ของดินปนกรวด.....	57
4.8	เปรียบเทียบผลการประมาณคุณลักษณะของดินปนกรวด.....	59
<b>5</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง</b>	
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	63
5.1.1	การศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัดและการพัฒนา ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก.....	63
5.1.2	การศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด และการถ่ายทอดพลังงานบดอัดไปสู่ดินเม็ดละเอียด ในการทดสอบบดอัดดินปนกรวด.....	63
5.1.3	การประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวด.....	64
5.2	ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อเนื่อง.....	64
	รายการอ้างอิง.....	65
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	68
	ประวัติผู้เขียน.....	69



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รายละเอียดวิธีการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพลีเอกเตอร์..... 8
3.1	คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....15
3.2	รายละเอียดการศึกษาผลกระทบเนื่องจากเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของ ชุดทดสอบต่อผลทดสอบการบดอัดดิน.....17
3.3	รายละเอียดการทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบมาตรฐานพลีเอกเตอร์ และชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก.....23
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....27
4.2	ตารางสรุปผลทดสอบการบดอัดในการศึกษาอิทธิพลของกรวด.....31
4.3	คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....60
4.4	ตัวอย่างดินและกรวดที่ใช้ทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพลีเอกเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณ.....61

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์และสูงกว่า มาตรฐานพลีอกเตอร์.....4
2.2	เส้นโค้งการบดอัด..... 5
2.3	เส้นโค้งการบดอัด Hogentogler(1956)..... 6
2.4	ผลทดสอบการบดอัดดินของ Garga and Madureira (1985) .....8
2.5	ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กของ Diaz-Zorita et al.(2001)..... 10
2.6	ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กของ Shidharan and Sivapullaiah (2005).....11
2.7	ผลการทดสอบบดอัดของ Diaz-Zorita et al.(2001).....13
2.8	อิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัดต่อผลการทดสอบบดอัดดิน (Aiban and Mohammed, 2002).....14
3.1	การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา.....16
3.2	ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำตัดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน..... 18
3.3	ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบมาตรฐานพลีอกเตอร์.....21
3.4	เส้นโค้งการบดอัดจากชุดทดสอบมาตรฐานและชุดทดสอบการบดอัด ขนาดเล็ก.....24
3.5	เปรียบเทียบผลทดสอบบดอัดที่ได้จากชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก และชุดทดสอบมาตรฐานพลีอกเตอร์..... 25
4.1	การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา..... 28
4.2	แผนการทดสอบของดินแต่ละประเภท..... 28
4.3	ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty sand 1.....33
4.4	ผลทดสอบการบดอัดของดิน Red clay.....34
4.5	ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty clay 2.....35
4.6	ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty sand 3.....36
4.7	ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty clay 3.....37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty sand 1 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	38
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Red clay ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	39
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty clay 2 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	40
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty sand 3 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	41
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty clay 3 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	42
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty sand 1 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	43
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Red clay ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	44
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty clay 2 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	45
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty sand 3 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	46
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ $\rho_{d\max}$ และ $w_{\text{opt}}$ ของดิน Silty clay 3 ผสมกรวดขนาดเล็ก.....	47
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\rho_{d\max}$ ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่.....	49
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง $w_{\text{opt}}$ ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่.....	49
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดและ $w'_{\text{opt}}$ ของดินผสมกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	
เส้นโค้งบดอัดของดินทั้ง 5 ประเภทที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานบดอัด 148.1 kJ/m <sup>3</sup> 197.5 kJ/m <sup>3</sup> 296.2 kJ/m <sup>3</sup> และ 592.5 kJ/m <sup>3</sup> .....	52
4.22	
ความสัมพันธ์ระหว่าง $w_{opt}$ กับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน.....	53
4.23	
แผนภาพการแปลงอิทธิพลของกรวดเป็นพลังงานบดอัด ที่ถ่ายเทต่อส่วนละเอียด.....	53
4.24	
ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดที่ถ่ายเทต่อส่วนละเอียด และปริมาณกรวด.....	54
4.25	
ความสัมพันธ์ระหว่าง $\rho_{d\ max}$ กับ $w_{opt}$ .....	56
4.26	
ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการบดอัดกับ $w_{opt}$ (Horpibulsuk et al., 2009).....	57
4.27	
แผนภาพการประมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด ของเม็ดดินในดินปนกรวด.....	58
4.28	
การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา.....	60
4.29	
เปรียบเทียบคุณลักษณะการบดอัดจากการประมาณและผลการทดสอบบดอัด แบบมาตรฐานพลีอกเตอร์.....	62

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	สมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา
CH	=	ดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูง
CL	=	ดินเหนียวความเป็นพลาสติกต่ำ
DR	=	อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางก้อนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแบบบดอัดดิน [-]
E	=	พลังงานการบดอัด [ $\text{kJ}/\text{m}^3$ ]
$G_s$	=	ความถ่วงจำเพาะ [-]
LL	=	พิกัดเหลว [%]
NP	=	ไม่มีความเป็นพลาสติก [-]
PI	=	ดัชนีความเป็นพลาสติก [%]
PL	=	พิกัดพลาสติก [%]
$P_c$	=	เปอร์เซ็นต์กรวดที่ผสมในดิน [-]
$P_f$	=	สัดส่วนโดยน้ำหนักของส่วนละเอียดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด 4 [-]
$P_g$	=	สัดส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด [-]
SC	=	ดินเหนียวปนดินทราย
SM	=	ดินตะกอนปนดินทรายแป้ง
SP	=	ดินทรายมีขนาดละเอียดไม่ดี
$S_{wopt}$	=	ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ความชื้นเหมาะสม [%]
w	=	ความชื้นของดินบดอัด [%]
w'	=	ความชื้นของดินบดอัดคัดกรวด [%]
$w_{opt}$	=	ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัด [%]
$w'_{opt}$	=	ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวด [%]
$\rho_d$	=	ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด [ $\text{t}/\text{m}^3$ ]
$\rho'_d$	=	ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดคัดกรวด [ $\text{t}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{d\max}$	=	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด [ $\text{t}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{d\max f}$	=	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเม็ดดินที่ถูกบดอัดตามมาตรฐานพริกเตอร์ [ $\text{t}/\text{m}^3$ ]
$\rho_g$	=	ความหนาแน่นของกรวด [ $\text{t}/\text{m}^3$ ]

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในงานก่อสร้างโครงสร้างดิน จำเป็นต้องนำดินจากแหล่งดินที่เลือกแล้วมาทำการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยมักนิยมทำการทดสอบแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D698-91) หรือสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D1557-91) แต่เนื่องจากแบบมาตรฐานที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานการทดสอบยังมีขนาดใหญ่ทำให้ต้องใช้ปริมาณดินตัวอย่างในการทดสอบเป็นจำนวนมาก รวมทั้งการทดสอบยังใช้ระยะเวลาการทดสอบ และแรงงานคนมากซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการบดอัด ดังนั้นหากสามารถลดขนาดของแบบที่ใช้ในการทดสอบบดอัดดินได้จะสามารถลดปริมาณดินตัวอย่าง ลดระยะเวลาที่ใช้ทดสอบให้เร็วขึ้น และค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานคนในการทดสอบ ซึ่งการลดขนาดของแบบลงจำเป็นต้องทำการศึกษาอิทธิพลของการลดขนาดของแบบเพื่อนำผลการศึกษาไปใช้ในการปรับปรุงชุดทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการลดขนาดของแบบลงมีผลทำให้แบบบดอัดใช้ไต่กับดินเม็ดละเอียดเท่านั้น ดังเช่นผลการศึกษาของ Donaghe and Torrey (1994); Garga and Madureira (1985); Holtz and Lowitz (1957); Donaghe and Townsend (1976); Winter et al. (1998) จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาอิทธิพลของกรวดที่ส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบบดอัดดินด้วย อันจะนำไปสู่ข้อสรุปในการพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กลงให้ใช้ได้กับดินทุกประเภท

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอิทธิพลของการลดขนาดของแบบบดอัดต่อผลการทดสอบบดอัดดินและนำผลการศึกษาไปปรับปรุงและพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กลงที่สามารถใช้แทนชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์
2. ศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด และนำผลศึกษาที่ได้ไปศึกษาความเป็นไปได้ในการทดสอบบดอัดดินปนกรวดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กลง
3. เพื่อเสนอวิธีการใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กลงในการทดสอบกับดินทุกประเภท

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดิน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางก้อนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแบบบดอัดดิน (Diameter ratio:  $DR$ ) จำนวนของชั้นดินบดอัดในแบบ น้ำหนักก้อนบดอัดดิน และระยะตกของก้อนบดอัดดิน ต่อผลการทดสอบบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์

2. เสนอชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่สามารถใช้แทนชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์

3. ศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยใช้กรวด 2 ขนาด คือกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 (9.5 มิลลิเมตร) และกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ผสมในดิน 5 ประเภท ด้วยอัตราส่วนผสม 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายอิทธิพลของการลดขนาดของแบบบดอัดต่อผลการทดสอบบดอัดดิน และพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่สามารถใช้แทนชุดทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ได้

2. สามารถอธิบายอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด

3. สามารถเสนอวิธีการทดสอบบดอัดดินทุกประเภท โดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

### 1.5 โครงร่างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีทั้งสิ้น 5 บท โดยในบทที่ 1 จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และขอบเขตรวมทั้งประโยชน์ที่จะได้รับ โดยได้ทำการเรียบเรียงบทสรุปของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ในบทที่ 2 สำหรับบทที่ 3 จะเป็นการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบต่อผลการทดสอบบดอัดดินและนำเสนอชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก ซึ่งสามารถใช้แทนชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ในบทที่ 4 จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ หลังจากนั้นจะนำผลการศึกษามาประยุกต์เพื่อนำเสนอวิธีการประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวด และในบทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะของการวิจัยต่อเนื่อง

## บทที่ 2

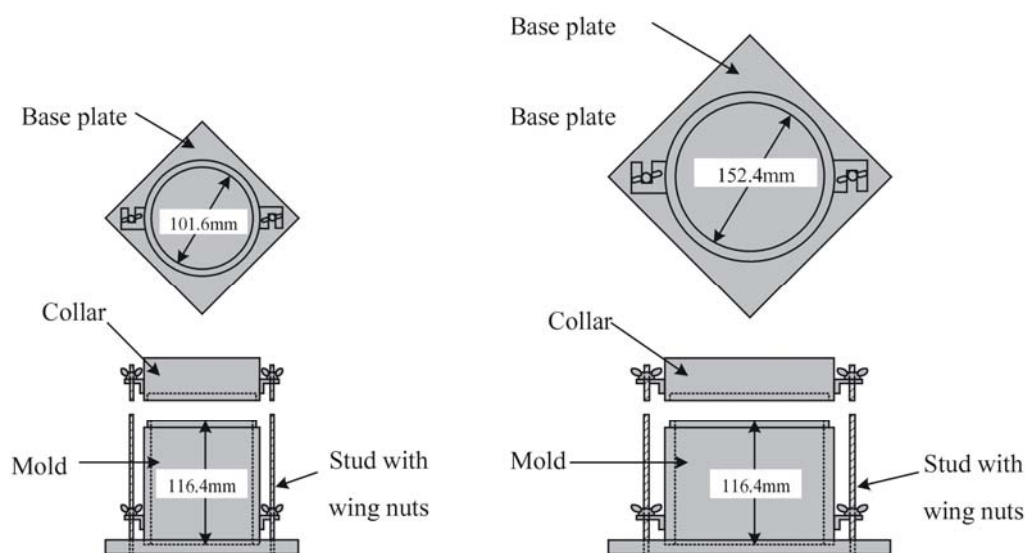
### ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

การบดอัดดินเป็นวิธีพื้นฐานในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นเพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างดิน เป็นที่ทราบดีว่าการบดอัดดินในการก่อสร้างโครงสร้างดินในสนามจะทำการควบคุมการบดอัดโดยผลการทดสอบบดอัดในห้องปฏิบัติการ มาตรฐานการทดสอบบดอัดในห้องปฏิบัติการของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยแบ่งเป็นการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D 698-91) และการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D 1557-91) การบดอัดทั้งสองประเภทจะทำการบดอัดดินลงในแบบทรงกระบอก (Mold) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร หรือแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร โดยแบบทั้งสองมีความสูง 116.4 มิลลิเมตร ในการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์แบบบดอัดจะถูกประกอบเข้ากับแผ่นฐาน (Base plate) และปลอก (Collar) ดังแสดงในรูปที่ 2.1ก สำหรับการทดสอบในแบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร จะใช้ดินตัวอย่างประมาณ 4 กิโลกรัมและนำไปผสมกับน้ำที่ความชื้นต่าง ๆ แล้วจึงทำการบดอัดด้วยค้อนมาตรฐานซึ่งมีน้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม (5.5 ปอนด์) และมีระยะตกอิสระของค้อน 304.8 มิลลิเมตร (12 นิ้ว) โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.1ข ในการบดอัดจะทำการบดอัดดินเป็นจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง เมื่อบดอัดครบจนครบทุกชั้นแล้วจะถอดปลอกออกจากแบบบดอัด แล้วใช้บรรทัดเหล็กปาดส่วนที่สูงเกินปากแบบบดอัดออก และอุดแต่งผิวให้เรียบเสมอกับปากแบบบดอัด แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นรวม จากนั้นดันดินตัวอย่างออกจากแบบบดอัดแล้วผ่ากลางตามแนวตั้งและเก็บตัวอย่างดินตามแนวผ่านนี้ประมาณ 100 กรัม ไปชั่งน้ำหนักและเข้าอบในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหาความชื้นบดอัดในดิน และสำหรับการทดสอบการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร จะมีขั้นตอนการทดสอบการบดอัดเช่นเดียวกัน และดินจะถูกบดอัดด้วยค้อนมาตรฐานขนาดเดียวกันกับการทดสอบการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร แต่จะใช้ดินตัวอย่างประมาณ 6 กิโลกรัม โดยจะทำการบดอัดดินเป็นจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง ในการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ ดินจะถูกบดอัดตามขั้นตอนเช่นเดียวกันกับการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ และทำการทดสอบการบดอัดดินในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร หรือแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตรเช่นเดียวกัน

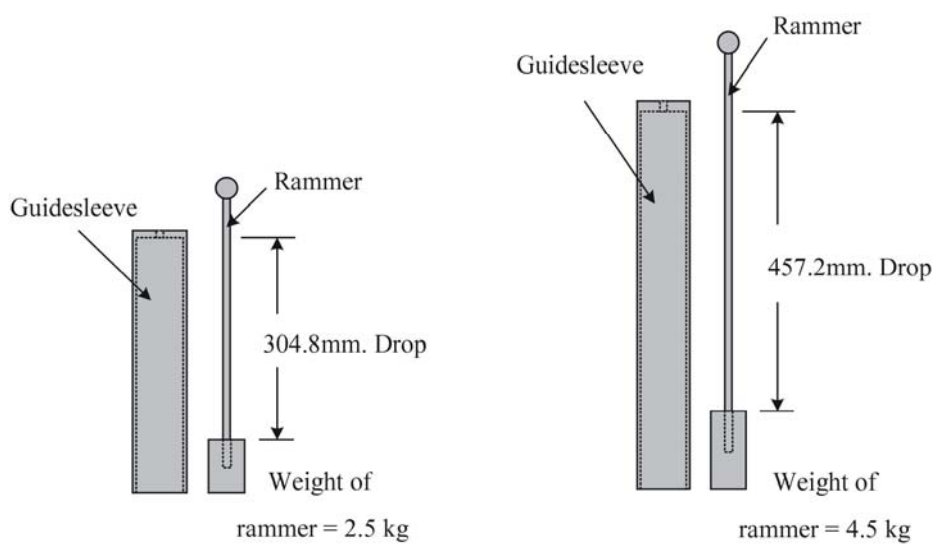


แต่จะทำการบดอัดดินด้วยก้อนมาตรฐานที่มีน้ำหนัก 4.5 กิโลกรัม (10 ปอนด์) และมีระยะตกอิสระของก้อน 457.2 มิลลิเมตร (18 นิ้ว) โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.1 สำหรับการทดสอบในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร จะทำการบดอัดดินเป็นจำนวน 5 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง และสำหรับการทดสอบการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร ดินจะถูกบดอัดด้วยก้อนมาตรฐานขนาดเดียวกันกับการทดสอบการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร โดยจะทำการบดอัดดินเป็นจำนวน 5 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง โดยผลทดสอบการบดอัดจะแสดงในรูปของความสัมพัทธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (Dry density) และความชื้นในดิน (Water content) แสดงดังรูปที่ 2.2



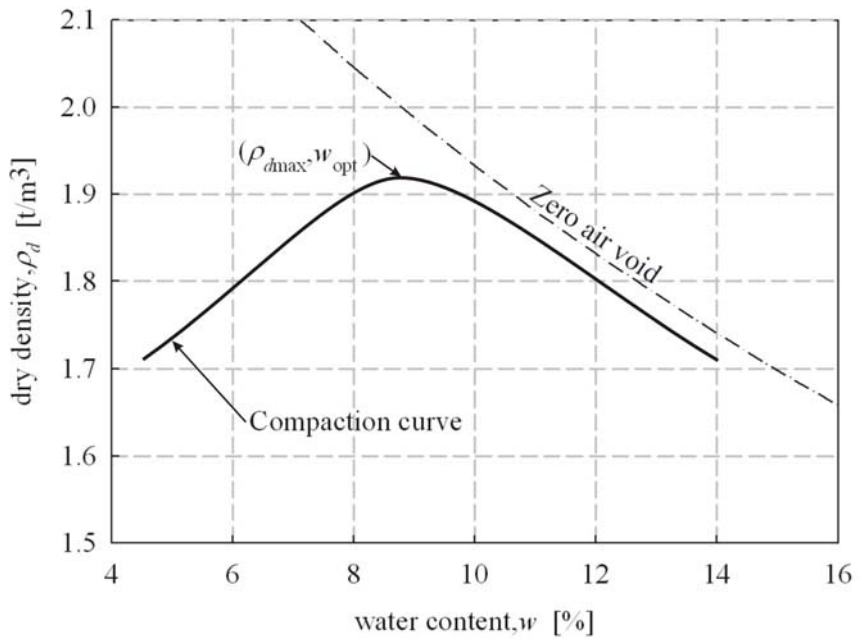
(ก) แบบสำหรับบดอัดดิน

รูปที่ 2.1 ชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีเอกเตอร์และสูงกว่ามาตรฐานพลีเอกเตอร์



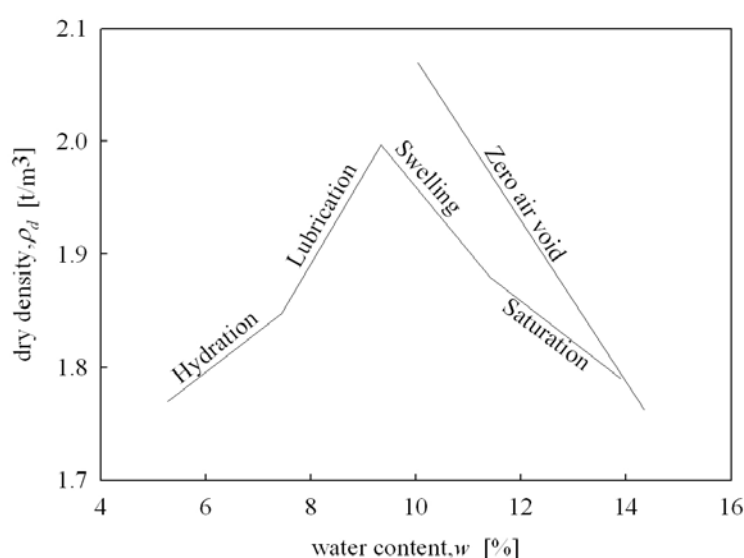
(จ) ค้อนบดอัด

รูปที่ 2.1 ชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีเอกเตอร์และสูงกว่ามาตรฐานพลีเอกเตอร์ (ต่อ)



รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการบดอัด

Proctor (1933) ; Hogentogler (1936); Hilf (1956); Olson (1963) ได้พยายามอธิบายการที่เส้นโค้งบดอัด (Compaction curve) แสดงลักษณะที่ความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้นแล้วกลับลดลงเมื่อความชื้นถึงระดับหนึ่ง เช่นที่แสดงดังรูปที่ 2.2 สามารถสรุปได้ว่าสาเหตุดังกล่าวเกิดจากพฤติกรรมที่ค่อนข้างซับซ้อนทั้งจากความดันคาพิลลารี (Capillary pressure) หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ความซึมผ่านได้ (Permeability) ความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore pressure) ซึ่งในปี 1936 Proctor สรุปว่าความชื้นในดินเกี่ยวข้องกับ ความดันคาพิลลารีเป็นเหตุให้ดินที่บดอัดทางด้านแห้งมีกำลังสูงกว่าดินที่บดอัดทางด้านเปียก ในปี 1956 Hogentogler ได้แบ่งเส้นโค้งการบดอัดเป็นสี่ช่วงแสดงดังรูปที่ 2.2 คือ (1) Hydration เป็นช่วงที่น้ำถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อดินและบางส่วนเกาะเป็นฟิล์มบางๆระหว่างเม็ดดินซึ่งทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างเม็ดดิน (2) Lubrication การเพิ่มน้ำในดินในช่วงนี้เป็นการเพิ่มความหนาฟิล์มของน้ำที่เกาะระหว่างเม็ดดิน ทำให้น้ำไปทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวหล่อลื่นช่วยให้เม็ดดินสามารถจัดเรียงตัวได้แน่นขึ้น (3) Swelling เป็นช่วงที่ Hogentogler เชื่อว่าเมื่อเลขค่าสูงสุดของช่วง Lubrication แล้วการเพิ่มน้ำจะไม่ช่วยลดปริมาตรของช่องว่างอากาศในเนื้อดิน (4) Saturation ซึ่ง Hogentogler อธิบายว่าเป็นช่วงที่โพรงอากาศถูกแทนที่ด้วยน้ำทั้งหมดดังนั้นเส้นโค้งการบดอัดจึงวิ่งเข้าสู่เส้นโพรงอากาศเป็นศูนย์ ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยที่พยายามอธิบายลักษณะของเส้นโค้งการบดอัด เช่น Hilf (1956) ใช้ทฤษฎีของความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในการอธิบายเส้นโค้งการบดอัด และ Olson (1963) ใช้แนวคิดของหน่วยแรงประสิทธิผลในการอธิบายเส้นโค้งการบดอัด เป็นต้น



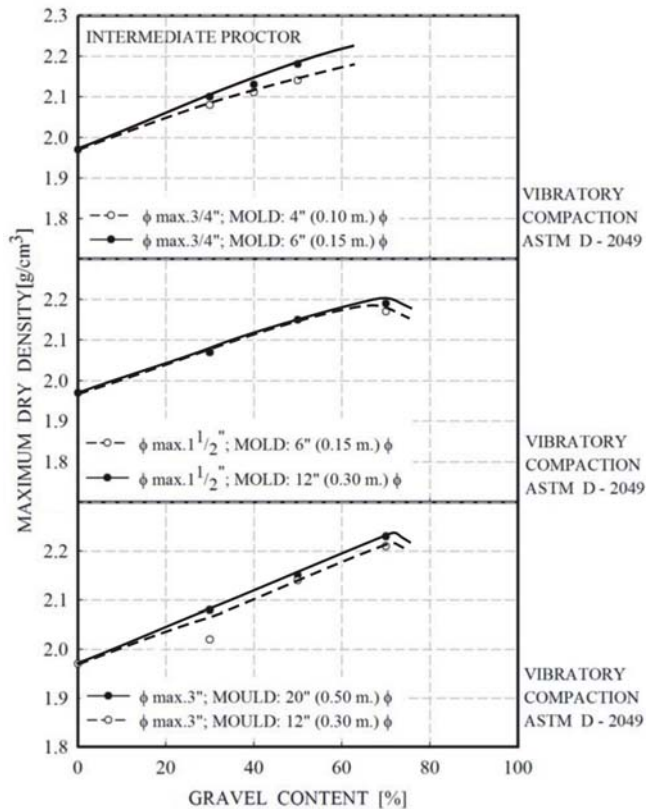
รูปที่ 2.3 เส้นโค้งการบดอัด Hogentogler (1956)

## 2.2 การศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน

การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์มีแบบบดอัดที่ใช้ในการทดสอบบดอัดอยู่ 2 ขนาดคือ แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร และแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร การเลือกใช้แบบบดอัดในการทดสอบการบดอัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของกรวดที่ผสมอยู่ในดินรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.1 โดยแบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร จะใช้ในการทดสอบการบดอัดดินตัวอย่างที่มีกรวดผสมอยู่ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ หากดินตัวอย่างมีกรวดผสมอยู่มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะใช้แบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตรในการทดสอบ จากข้อกำหนดตามมาตรฐานการทดสอบบดอัดชี้ให้เห็นว่ากรวดมีผลต่อการทดสอบบดอัดดิน Donaghe and Torrey (1994) พบว่า อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบบดอัดดินและขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินที่เหมาะสมจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 เท่า ขณะที่ Garga and Madureira (1985) ได้ทำการทดสอบบดอัดดินกรวดแม่น้ำ (River Terrace Gravel) พบว่า ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราส่วนระหว่างขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบบดอัดและขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินเพิ่มขึ้นถึง 8 เท่า แสดงดังรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ Garga and Madureira (1985) ยังพบว่ากรวดจะเริ่มมีอิทธิพลต่อการทดสอบบดอัดดิน เมื่อดินตัวอย่างมีกรวดผสมในปริมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป โดย Garga and Madureira (1985) อธิบายอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัดว่าเป็นเพราะพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด (Transmitted compaction energy) จะมีค่าลดลงเนื่องจากการขัดกันเองของกรวด ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวได้สอดคล้องกับ Holtz and Lowitz (1957); Johns (1954) ขณะที่ผลการศึกษาของ Donaghe and Townsend (1976) พบว่า กรวดจะเริ่มขัดกันเมื่อดินมีปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และ Winter et al. (1998) พบว่าถ้าดินตัวอย่างมีกรวดขนาดใหญ่กว่า 20 มิลลิเมตร ปนอยู่ในปริมาณมากกว่า 45 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ กรวดจะเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมการบดอัดของดิน ถึงแม้งานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นว่ากรวดมีอิทธิพลต่อผลทดสอบการบดอัดดินปนกรวดและส่งผลให้พลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดมีค่าลดลง แต่ก็ไม่มีงานวิจัยชิ้นใดที่ทำการศึกษากการถ่ายทอดพลังงานการบดอัดไปสู่ส่วนละเอียดในการทดสอบบดอัดดินปนกรวดอย่างจริงจัง

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดวิธีการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพลีเอกเตอร์

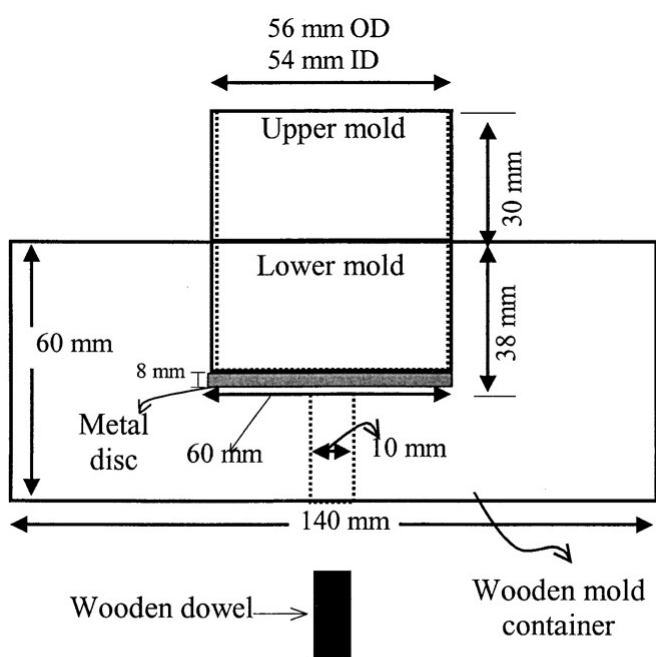
Samples	Method	Mold diameter [mm]	Ramer [weight]		No. of layer [No.]	No. of blow [No.]
			Weight [kg]	Drop height [mm]		
Soil with gravel 4.75-9.5 mm. dia. < 20%	A	101.6	2.5	304.8	3	25
Soil with gravel 4.75-9.5 mm. dia. > 20% and 9.5-19 mm. dia. ≤ 20%	B	101.6	2.5	304.8	3	25
	or C	or 152.4				or 56
Soil with gravel 9.5-19 mm. dia. > 20% and 9.5-19 mm. dia. ≤ 30%	C	152.4	2.5	304.8	3	56



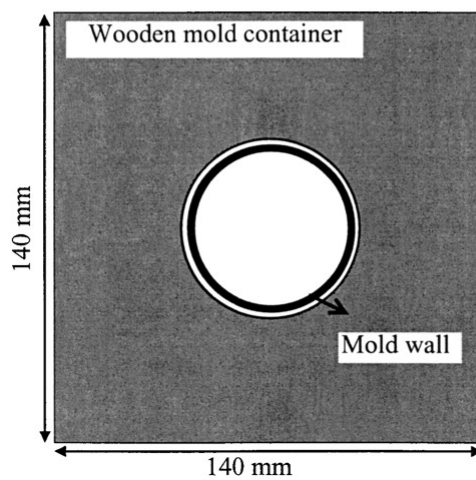
รูปที่ 2.4 ผลทดสอบการบดอัดดินของ Garga and Madureira (1985)

### 2.3 การศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัด

ปัจจุบันมีการบดอัดดินนํ้าพันลูกบาศก์เมตรในแต่ละวันทั่วโลก เนื่องมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจ และการเพิ่มขึ้นของจำนวนของประชากรโลก จึงมีการก่อสร้างสาธารณูปโภคให้เพียงพอับความต้องการ การก่อสร้างโครงสร้างดินเช่น ถนน เขื่อน จึงได้มีการก่อสร้างเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้ในการก่อสร้างโครงสร้างดินจำเป็นต้องใช้ผลทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการไปใช้ในการควบคุมการบดอัดในสนาม อย่างไรก็ตามการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ต้องใช้เวลาในการทดสอบมาก รวมทั้งปริมาณตัวอย่างดินที่จะต้องใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากแบบบดอัดยังมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เพื่อให้การทดสอบได้ผลการทดสอบที่รวดเร็วขึ้น และลดปริมาณดินตัวอย่างที่ใช้ ซึ่งจะช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ และแรงงานคนในการทดสอบ จึงมีการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินที่มีขนาดเล็กลง เช่น Diaz-Zorita et al. (2001); Shidharan and Sivapullaiah (2005) เป็นต้น อย่างไรก็ตามรูปแบบของชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาขึ้นจากทั้ง Diaz-Zorita et al. (2001); Shidharan and Sivapullaiah (2005) มีความแตกต่างจากรูปแบบชุดทดสอบแบบมาตรฐานหรือสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



SIDE VIEW

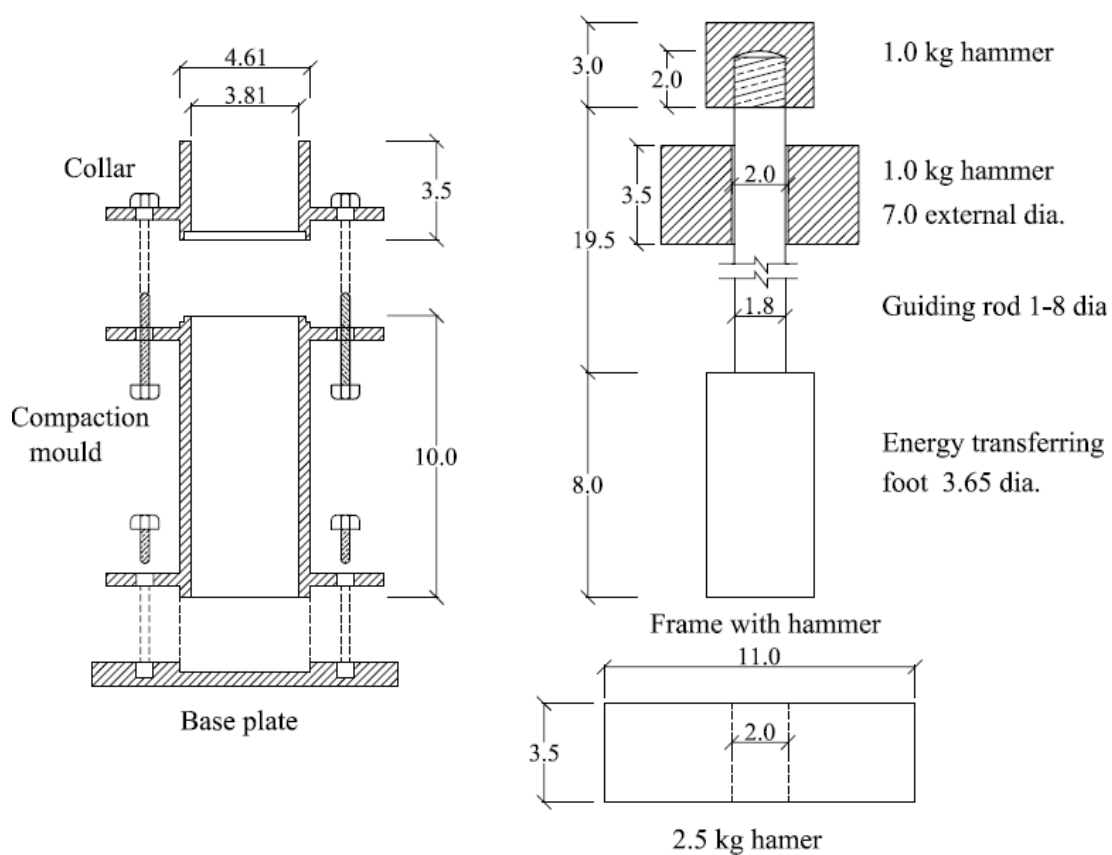


TOP VIEW

รูปที่ 2.5 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กลงของ Diaz-Zorita et al. (2001)



(ก) ภาพถ่ายชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก



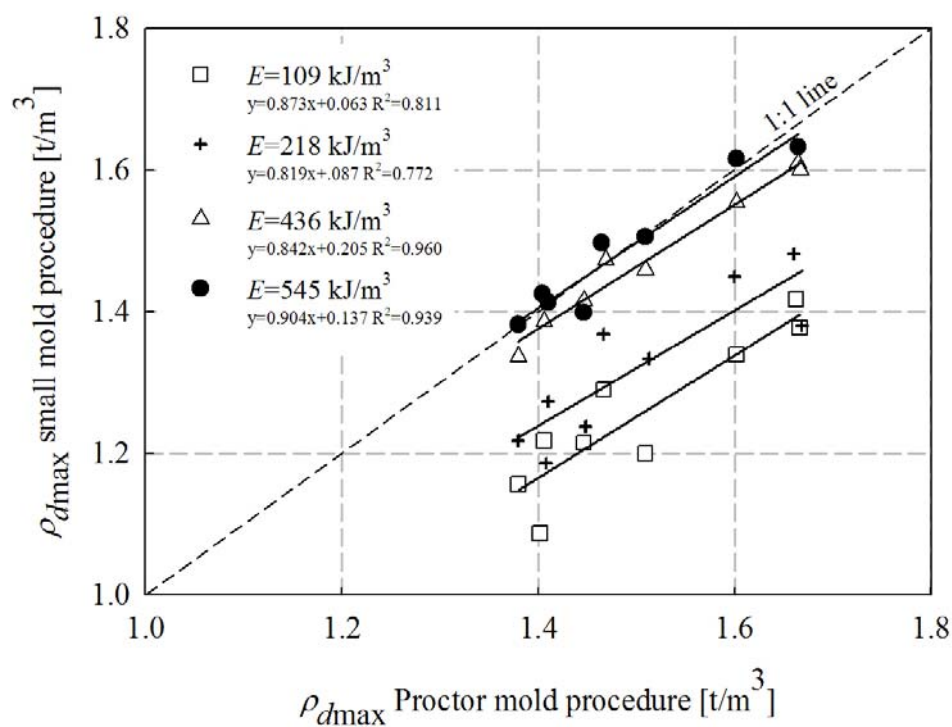
(ข) รายละเอียดชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

รูปที่ 2.6 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กของ Shidharan and Sivapullaiah (2005)

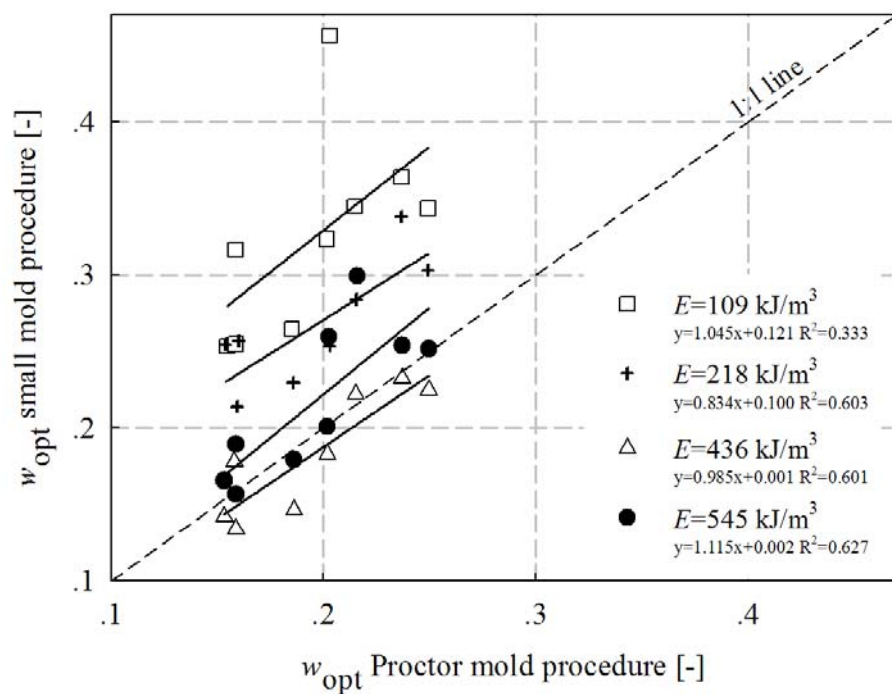


นอกจากนี้ชุดทดสอบการบดอัดดินทั้งสองยังมีการใช้ขนาดหน้าตัดค้อนเท่ากับขนาดหน้าตัดแบบบดอัด ซึ่งแตกต่างกับชุดทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ซึ่งจะมีขนาดหน้าตัดค้อนเพียงครึ่งหนึ่งของขนาดหน้าตัดแบบบดอัดเท่านั้น นอกจากนี้ขั้นตอนในการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินเองค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากการลองผิดลองถูกที่สัดส่วนของชุดทดสอบหรือรวมทั้งลองผิดลองถูกที่กระบวนการทดสอบการบดอัดดินเพื่อให้ผลทดสอบการบดอัดดินตรงกับผลทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น ชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอโดย Diaz-Zorita et al. (2001) จะใช้ได้กับการบดอัดดินที่ระดับพลังงานเท่ากับระดับพลังงานตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ ( $592.5 \text{ kJ/m}^3$ ) เท่านั้น หากทำการบดอัดดินที่ระดับพลังงานต่างจากนี้จะให้ผลทดสอบไม่ตรงกับผลทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดดินแบบพล็อกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทั้งนี้ปัญหาจากความยุ่งยากในการพัฒนาชุดทดสอบจากการลองผิดลองถูกและข้อจำกัดในการใช้งาน ทำให้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่กล่าวถึงยังมิได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเท่าที่ควร แต่หากมีการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณลักษณะของชุดทดสอบต่อผลทดสอบการบดอัดดิน จะทำให้สามารถพัฒนาแบบบดอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและหากสามารถคงคุณลักษณะของชุดทดสอบให้ได้ใกล้เคียงกับคุณลักษณะของชุดทดสอบแบบมาตรฐาน ก็จะทำให้สามารถพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่มีลักษณะใกล้เคียงกับชุดทดสอบการบดอัดแบบพล็อกเตอร์ อันจะทำให้ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปใช้ได้ง่ายและแพร่หลายในที่สุด

ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาหรือแสดงอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัดดินมาบ้างแล้ว เช่น Donaghe and Townsend (1976); Aiban and Mohammed (2002) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และพบว่าเมื่อขนาดของแบบมีขนาดใหญ่ขึ้นถึงระดับหนึ่งอิทธิพลเนื่องจากขอบเขตจำกัดจะหมดไป แต่มิได้มีงานวิจัยใดที่ได้ศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณลักษณะของชุดทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องมาจากการลดขนาดลงของแบบบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบการออกแบบชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กอย่างมีประสิทธิภาพ

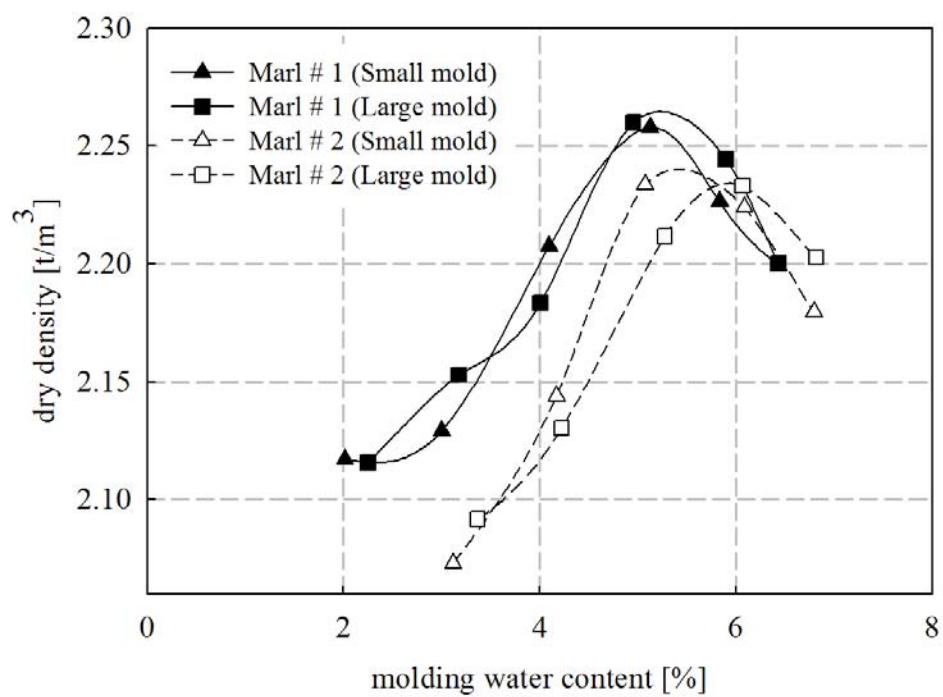


(ก) ค่าความหนาแน่นแห้ง



(ข) ค่าความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 2.7 ผลการทดสอบบดอัดของ Diaz-Zorita et al. (2001)



รูปที่ 2.8 อิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัดต่อผลการทดสอบบดอัดดิน  
(Aiban and Mohammed, 2002)

### บทที่ 3

## การศึกษาอิทธิพลการลดขนาดของแบบบดอัดดินและการพัฒนา ชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก

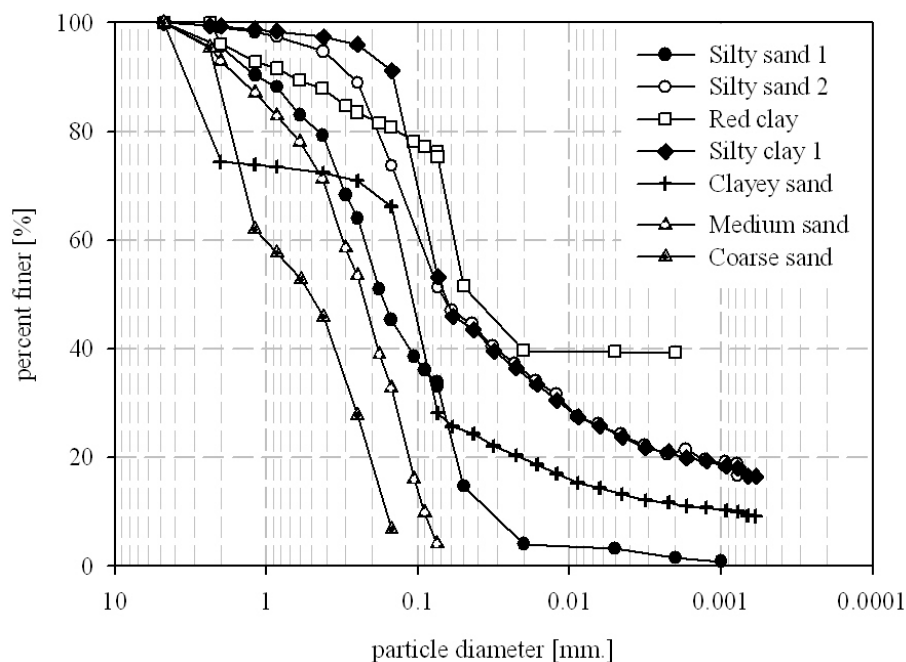
### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของการลดลงของขนาดแบบบดอัด ดินด้วยการทดสอบบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบ กับดินตัวอย่างที่มีความแตกต่างกัน 2 ชนิด แล้วนำผลการศึกษาไปใช้ในการปรับปรุงชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กให้มีความเหมาะสม จากนั้นจะนำชุดทดสอบที่เสนอ มาทำการทดสอบบดอัดกับดินตัวอย่างที่มีความแตกต่างกัน 5 ชนิด และเปรียบเทียบผลทดสอบการบดอัดจากชุดทดสอบที่เสนอกับผลทดสอบการบดอัดที่ได้จากการทดสอบแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์

### 3.2 การศึกษาอิทธิพลการลดขนาดของแบบบดอัดดิน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Soil type	$LL$ [%]	$PL$ [%]	$PI$ [%]	$G_s$	Group symbol
Silty sand 1	NP	NP	NP	2.67	SM
Silty sand 2	NP	NP	NP	2.69	SM
Red clay	75	24.6	50.4	2.70	CH
Silty clay 1	28.7	19.4	9.3	2.72	CL
Clayey sand	28.7	19.4	9.3	2.72	SC
Medium sand	NP	NP	NP	2.72	SP
Coarse sand	NP	NP	NP	2.72	SP

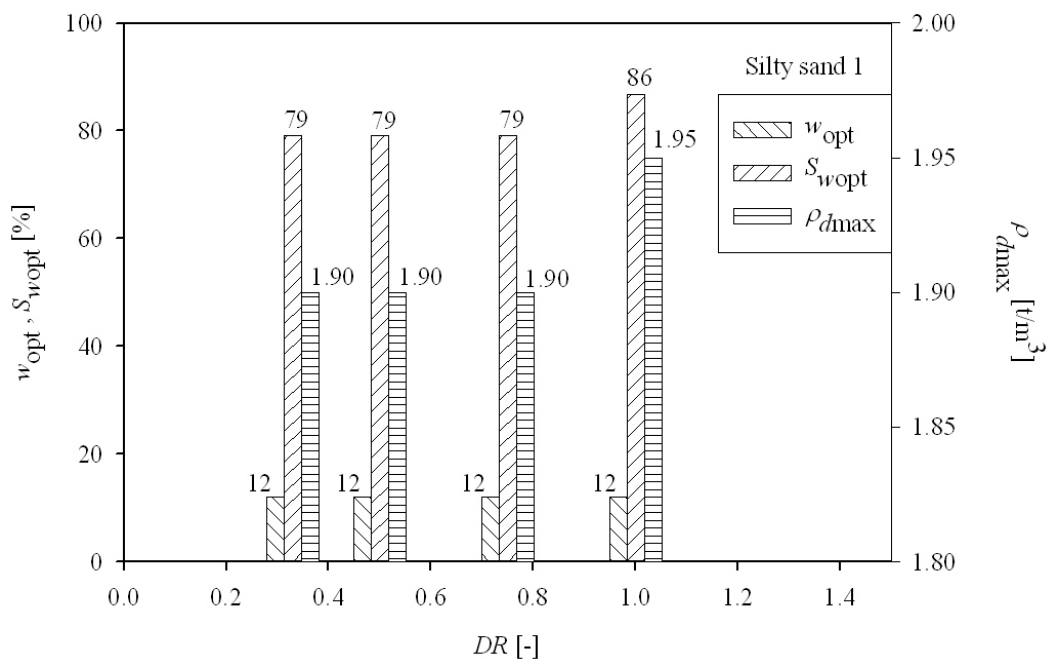


รูปที่ 3.1 การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา

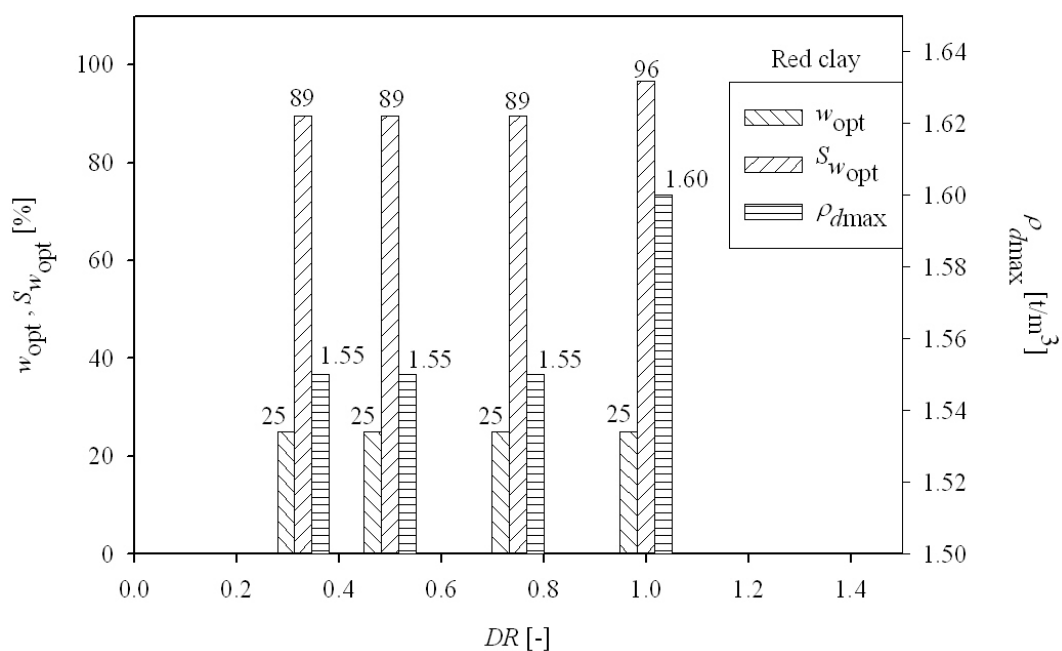
ในการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินให้มีขนาดเล็กลง จำต้องมีการลดขนาดของแบบบดอัดดินลง ทำให้คุณลักษณะของชุดทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้สามารถพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดิน โดยใช้ดินสองชนิดที่มีความแตกต่างกันอย่างมากคือ (1) Silty sand 1 และ (2) Red clay ซึ่งดินทั้งสองมีการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดง ดังรูปที่ 3.1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีแสดงดังตารางที่ 3.1 แล้วทำการทดสอบการบดอัดดินในแบบบดอัดดินที่มีความสูงเท่ากับ 116.4 มิลลิเมตร โดยควบคุมพลังงานต่อปริมาตรให้เท่ากับ  $592.5 \text{ kJ/m}^3$  เพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดิน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางค้อนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางแบบบดอัดดิน (Diameter ratio: DR) เพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดของค้อนและขนาดหน้าตัดของแบบบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัด จำนวนชั้นเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนของชั้นดินที่บดอัดในแบบบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัด น้ำหนักค้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักค้อนที่ใช้บดอัดต่อผลทดสอบการบดอัด และระยะตกของค้อนเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะตกของค้อนต่อผลทดสอบการบดอัด รายการการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน สรุปอยู่ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการศึกษาผลกระทบเนื่องจากเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ  
ของชุดทดสอบต่อผลทดสอบการบดอัดดิน

Tests no.	Mold diameter [mm]	Rammer diameter [mm]	Diameter ratio [-]	No. of layers [No.]	Rammer		No. of blow [No.]
					Weight [kg]	Drop height [mm]	
1.1	152.4	50.8	<b>0.33</b>	3	2.5	304.8	56
1.2	101.6	50.8	<b>0.5</b>	3	2.5	304.8	25
1.3	101.6	76.2	<b>0.75</b>	3	2.5	304.8	25
1.4	76.2	76.2	<b>1</b>	3	2.5	304.8	15
2.1	101.6	50.8	0.5	<b>2</b>	2.5	304.8	37
2.2	101.6	50.8	0.5	<b>3</b>	2.5	304.8	25
2.3	101.6	50.8	0.5	<b>4</b>	2.5	304.8	19
2.4	101.6	50.8	0.5	<b>5</b>	2.5	304.8	15
3.1	101.6	50.8	0.5	3	<b>4.5</b>	304.8	14
3.2	101.6	50.8	0.5	3	<b>3.2</b>	304.8	16
3.3	101.6	50.8	0.5	3	<b>2.5</b>	304.8	25
3.4	101.6	50.8	0.5	3	<b>1</b>	304.8	62
4.1	101.6	50.8	0.5	3	2.5	<b>457.2</b>	17
4.2	101.6	50.8	0.5	3	2.5	<b>381</b>	20
4.3	101.6	50.8	0.5	3	2.5	<b>304.8</b>	25
4.4	101.6	50.8	0.5	3	2.5	<b>228.6</b>	33



(ก) ผลทดสอบการบดอัดดิน Silty sand 1



(ข) ผลทดสอบการบดอัดดิน Red clay

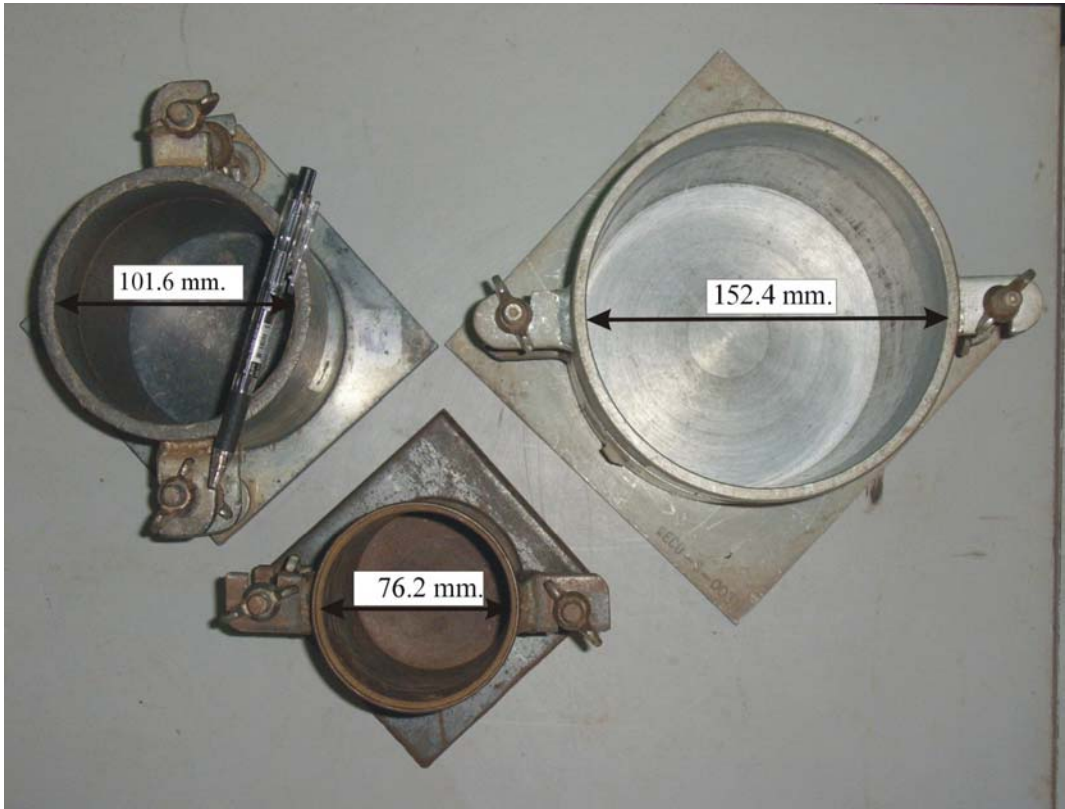
รูปที่ 3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำตต่อผลทดสอบการบดอัดดิน

จากผลการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบทุกตัวไม่ส่งผลกระทบต่อผลทดสอบการบดอัด ยกเว้นการทดสอบบดอัดดินที่  $DR$  เท่ากับ 1 รูปที่ 3.2 แสดงผลทดสอบบดอัดดินที่  $DR$  ต่าง ๆ ตามวิธีทดสอบที่ (1.1), (1.2), (1.3) และ (1.4) ในตารางที่ 3.2 โดยรูปที่ 3.2ก เป็นผลทดสอบการบดอัดดิน Silty sand 1 ส่วนรูปที่ 3.2ข เป็นผลทดสอบการบดอัดดิน Red clay เมื่อเทียบผลทดสอบการบดอัดดินที่  $DR$  ต่าง ๆ กับผลทดสอบการบดอัดดินที่  $DR$  เท่ากับ 0.50 ซึ่งเป็นการบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ พบว่าการบดอัดโดยใช้  $DR$  ทุกค่า ได้ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content:  $w_{opt}$ ) ใกล้เคียงกันทั้งหมด แต่สำหรับความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density:  $\rho_{dmax}$ ) การบดอัดโดยใช้  $DR$  ต่าง ๆ จะให้ผลทดสอบใกล้เคียงกัน ยกเว้นการบดอัดที่  $DR$  เท่ากับ 1 ซึ่งจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสูงกว่าการทดสอบบดอัดดินที่  $DR$  อื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากการบดอัดดินที่  $DR$  เท่ากับ 1 จะมีประสิทธิภาพการบดอัดที่ดีกว่าการบดอัดดินที่  $DR$  อื่น ๆ ซึ่งเห็นได้จากค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ความชื้นเหมาะสม (Optimum degree of saturation:  $S_{wopt}$ ) สำหรับการบดอัดดินที่  $DR$  เท่ากับ 1 จะมี  $S_{wopt}$  สูงกว่าการบดอัดดินที่  $DR$  ค่าอื่น ๆ ซึ่งในทางทฤษฎีการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้ชุดทดสอบที่มี  $DR$  เท่ากับ 1 การบดอัดจะเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าการทดสอบการบดอัดดินด้วย  $DR$  อื่น ๆ เพราะขณะทำการบดอัดดิน ตัวอย่างดินจะไม่ปูดบวมขึ้นมารอบ ๆ ค้อนบดอัด เนื่องจากไม่มีช่องว่างระหว่างหน้าตัดแบบบดอัดและหน้าตัดค้อน พลังงานบดอัดจากค้อนบดอัดจึงถูกใช้ไปในการบดอัดดินอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า ดังนั้นการพัฒนาชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กโดยใช้  $DR$  เท่ากับ 1 อาจจะทำให้ได้ผลทดสอบการบดอัดใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จะต้องทำการปรับเปลี่ยนชุดทดสอบการบดอัดให้มีประสิทธิภาพการบดอัดใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบดอัดของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ เช่น Diaz-Zorita et al. (2001) ใช้แผ่นไม้เป็นแผ่นฐานรองรับแบบบดอัด เพื่อให้ผลทดสอบการบดอัดดินจากชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอมีค่าใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดจากชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ หรือ Shidharan and Sivapullaiah (2005) ที่ใช้ชุดทดสอบการบดอัดที่  $DR$  เท่ากับ 1 และใช้ฐานเหล็กส่งถ่ายพลังงานบดอัดจากค้อนที่ตกกระทบไปสู่ดิน โดยทำการปรับเปลี่ยนจำนวนครั้งการบดอัดของค้อน เพื่อให้ได้ผลทดสอบการบดอัดใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จากงานวิจัยทั้งสองจะเห็นว่าชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่เสนอมีความซับซ้อนทั้งรูปร่างของชุดทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบการบดอัด และเสียเวลาในการพัฒนาชุดทดสอบ เนื่องจากการพัฒนาชุดทดสอบในลักษณะลองผิดลองถูก

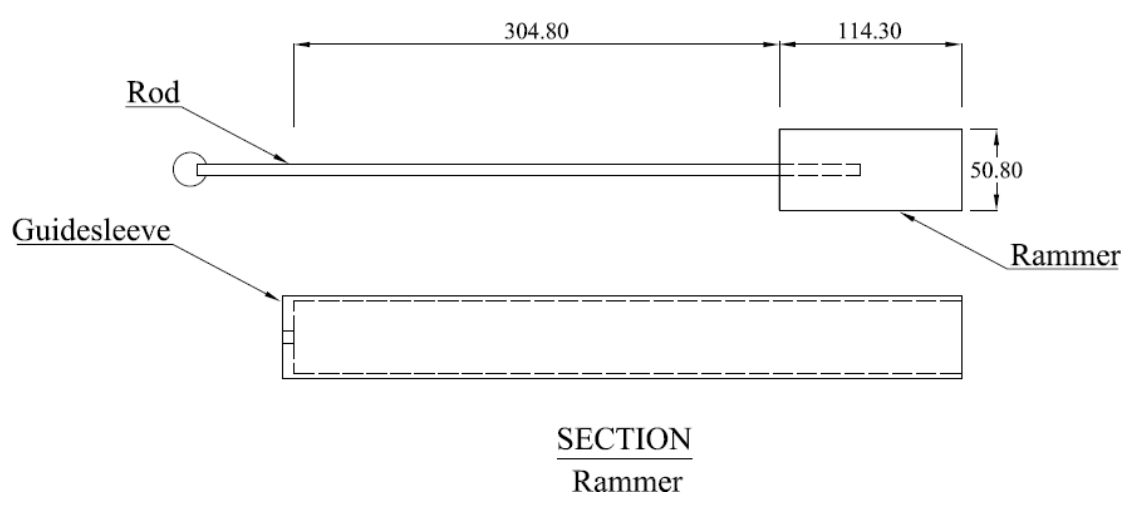


### 3.1 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

เพื่อให้ง่ายต่อการนำชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กไปใช้งานได้จริงและแพร่หลาย ชุดทดสอบที่เสนอจึงใช้เหล็กในการผลิตชุดทดสอบ โดยพยายามคงคุณลักษณะของชุดทดสอบให้ใกล้เคียงกับคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ให้ได้มากที่สุด และจะเป็นการง่ายหากสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมจากชุดทดสอบแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ดังนั้นค้อนบดอัดของชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จึงถูกนำมาใช้ในชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอ และเพื่อให้  $DR$  ของชุดทดสอบการบดอัดที่เสนอมีน้อยกว่า 1 จึงเลือกใช้แบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้  $DR$  ของชุดทดสอบการบดอัดดินที่เสนอมีค่า  $DR$  เท่ากับ 0.67 โดยชุดทดสอบการบดอัดดินที่เสนอมีรายละเอียดดังนี้ แบบบดอัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร (3 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.54 นิ้ว) และยังคงใช้ค้อนบดอัดซึ่งใช้ในชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ นั่นคือเป็นค้อนบดอัดรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.80 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) และมีน้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม โดยมีระยะตกอิสระของค้อนเท่ากับ 304.8 มิลลิเมตร (1.00 ฟุต) รูปที่ 3.3ก แสดงภาพถ่ายแบบบดอัดขนาดเล็กเทียบกับชุดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ 3.3ข แสดงรายละเอียดค้อนที่ใช้ในการทดสอบ 3.3ค แสดงรายละเอียดชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กเทียบกับชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ขนาดของแบบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ส่วนความสูงของแบบบดอัดขนาดเล็กและแบบบดอัดมาตรฐานจะมีขนาดเท่ากันคือ 116.4 มิลลิเมตร จะเห็นว่าชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่เสนอนี้ ยังคงคุณลักษณะของอุปกรณ์ทดสอบเหมือนกับชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแบบบดอัดเท่านั้น

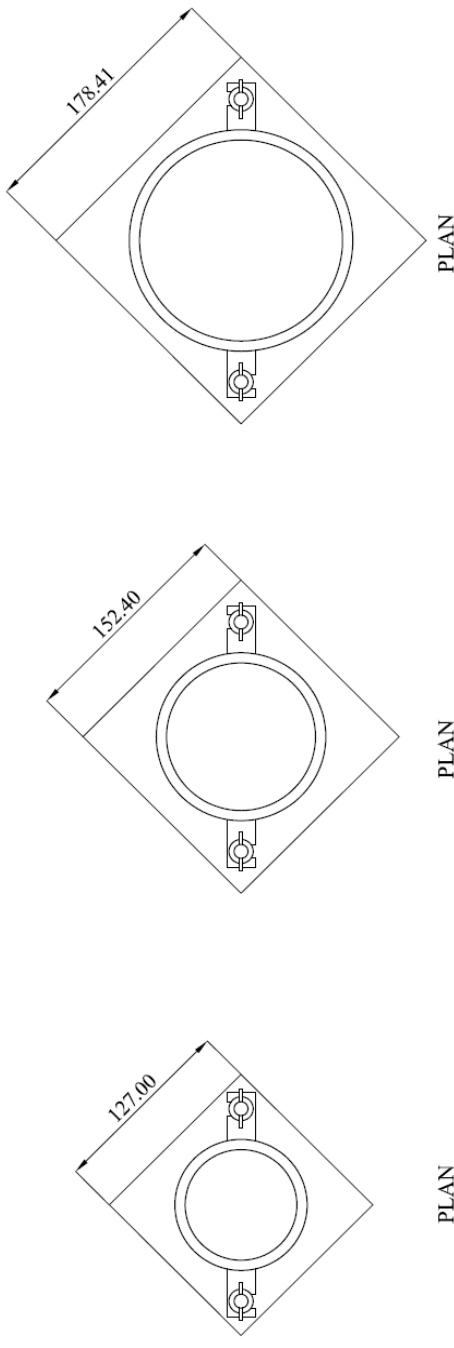


(ก) ภาพถ่ายแบบบดอัดขนาดเล็กเทียบกับแบบบดอัดมาตรฐานพลีเอกเตอร์



(ข) รายละเอียดค้อนบดอัดที่ใช้ในการทดสอบ

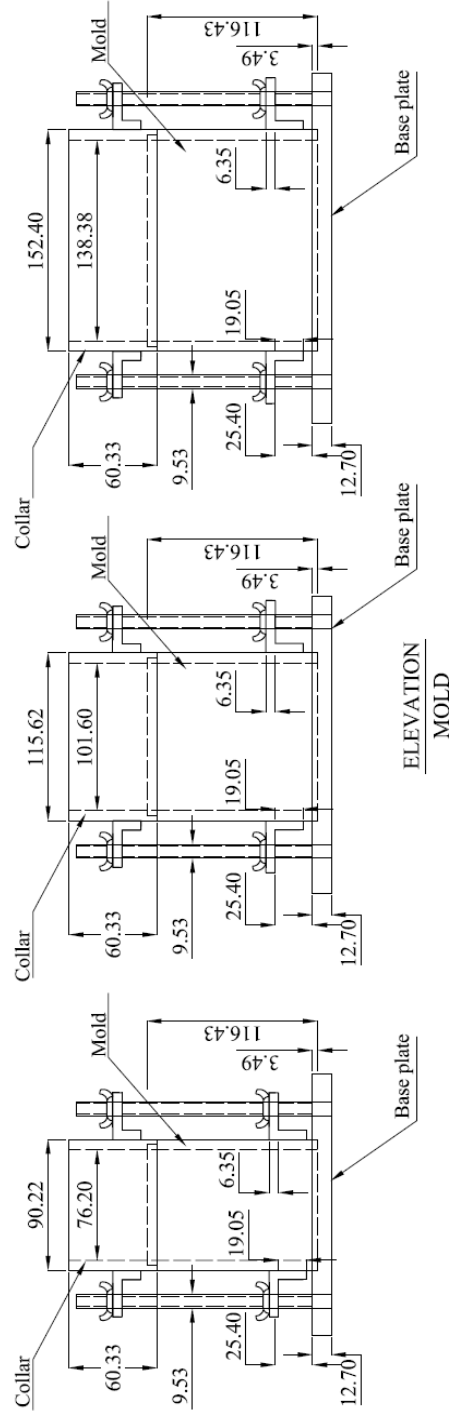
รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบมาตรฐานพลีเอกเตอร์



PLAN

PLAN

PLAN



ELEVATION  
MOLD

(ค) รายละเอียดชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน

รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบมาตรฐานพด็อกเตอร์ (ต่อ)

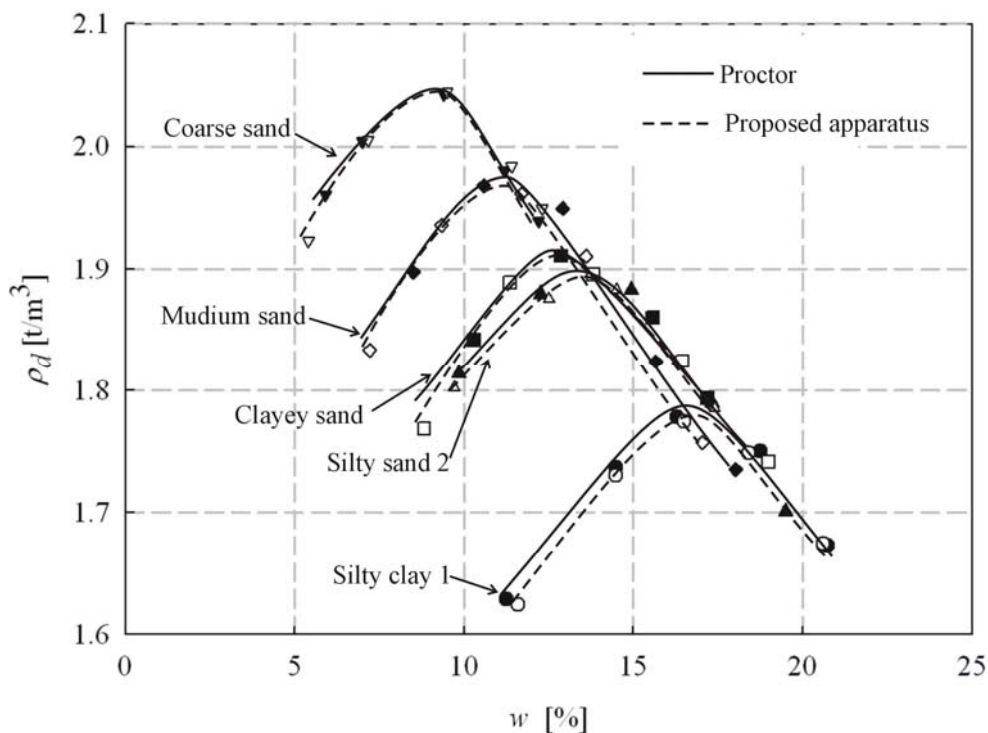
ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดดินจะเหมือนกับการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ ดินที่จะใช้เป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร จำนวน 2.5 กิโลกรัม จะถูกนำมาผสมน้ำให้มีความชื้นตามที่ต้องการแล้วคลุมพลาสติกไว้ระยะเวลาหนึ่งขึ้นกับประเภทของดินเพื่อให้ความชื้นในตัวอย่างดินมีความสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจะแยกดินออกมาเป็นสามกองเพื่อบดอัดลงในแบบขนาดเล็กเป็นจำนวนสามชั้น ในแต่ละชั้นจะทำการบดอัดด้วยค้อนบดอัด 14 ครั้ง ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก เทียบกับการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ พลังงานต่อปริมาตรของชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานต่อปริมาตรของชุดทดสอบมาตรฐานเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบมาตรฐานพล็อกเตอร์ และชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก

Mould Dia. [mm.]	DR. [-]	Drop [Blow]	Lay. [-]	Rammer		Compaction Effort [kJ/m <sup>3</sup> ]
				Weight [kg]	Drop [mm]	
76.2	0.67	14	3	2.5	300	581.4
101.6	0.5	25	3	2.5	300	592.6

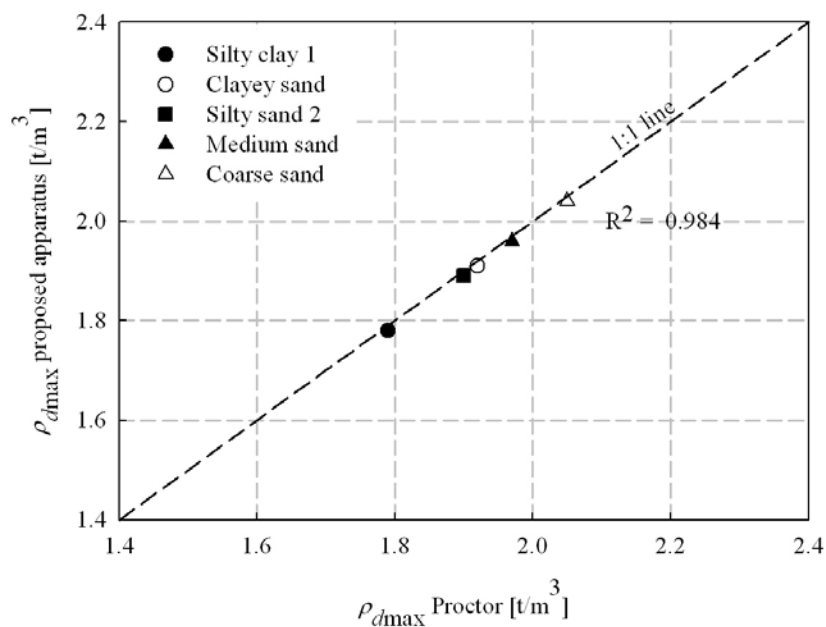
### 3.2 ผลทดสอบการบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

ทำการตรวจสอบการใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กในการบดอัดดินเทียบกับชุดทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยใช้ตัวอย่างดิน 5 ชนิดได้แก่ (1) Silty sand 2 (2) Silty clay 1 (3) Clayey sand (4) Medium sand และ (5) Coarse sand ซึ่งมีการกระจายขนาดของเม็ดดินดังรูปที่ 3.1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งดินทั้ง 5 ชนิดล้วนเป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร

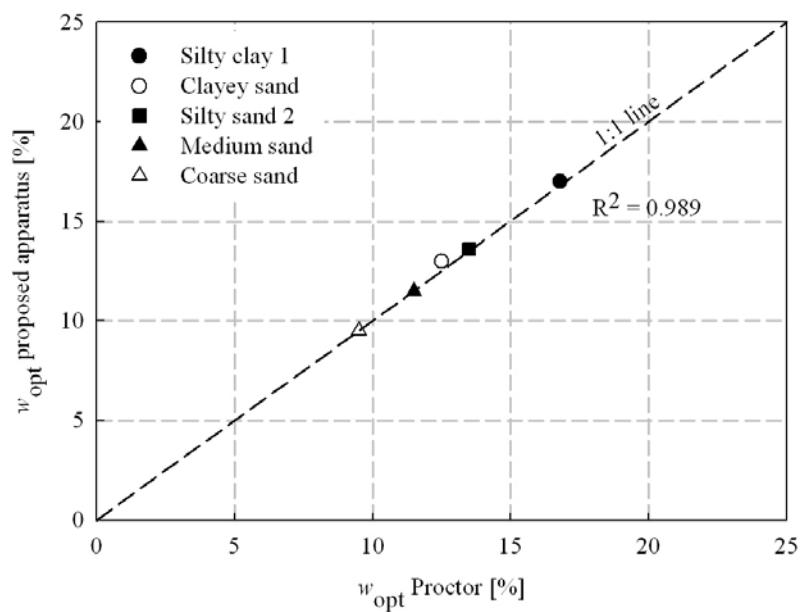


รูปที่ 3.4 เส้นโค้งการบดอัดจากชุดทดสอบมาตรฐานและชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

รูปที่ 3.4 แสดงเส้นโค้งการบดอัดของดินทั้ง 5 ชนิดที่บดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก เทียบกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ จากรูปพบว่าผลการทดสอบบดอัดโดยชุดทดสอบบดอัดขนาดเล็กและชุดทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ให้ผลการทดสอบไม่ต่างกัน รูปที่ 3.5ก แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า  $\rho_{d\max}$  ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ กับค่า  $\rho_{d\max}$  ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก ส่วนรูปที่ 3.5ข แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า  $w_{\text{opt}}$  ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ กับค่า  $w_{\text{opt}}$  ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก พบว่าผลทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบขนาดเล็กให้ผลเป็นที่น่าพอใจ เมื่อทำการวิเคราะห์ความถดถอยโดยใช้สมการ  $y$  เท่ากับ  $x$  พบว่าค่า  $R^2$  มีค่าสูงกว่า 0.98 อย่างไรก็ตามจากรูปจะพบว่า ความสัมพันธ์ของ  $\rho_{d\max}$  จะอยู่ใต้เส้น 1:1 เล็กน้อย ในขณะที่ความสัมพันธ์ของ  $w_{\text{opt}}$  ที่อยู่เหนือเส้น 1:1 เล็กน้อยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้ในชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กมีค่าน้อยกว่าพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้ในแบบบดอัดมาตรฐานพล็อกเตอร์



(ก) เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด



(ข) เปรียบเทียบค่าความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบผลทดสอบการบดอัดที่ได้จากชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก และชุดทดสอบมาตรฐานพลีออคเตอร์

## บทที่ 4

### อิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน

#### 4.1 บทนำ

ในบทที่ 3 จะเห็นว่าชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่เสนอสามารถใช้ได้ดีกับดินที่ไม่มีกรวดปน อย่างไรก็ตามจากงานผลวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากรวดมีผลต่อขนาดของแบบบดอัด เช่น Donaghe and Torrey (1994); Garga and Madureira (1985) จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้ชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กในการทดสอบกับดินปนกรวด เพื่อลดข้อจำกัดการใช้งานของชุดทดสอบที่เสนอในบทนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยนำผลการศึกษามาทำการวิเคราะห์และอธิบายการถ่ายทอดพลังงานบดอัดไปสู่ส่วนละเอียด (Fine fraction)

ในบทนี้จะเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างดินและกรวดที่จะใช้ในการศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ พร้อมทั้งแผนการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ และผลทดสอบการบดอัดซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของกรวดและทำการทดสอบการบดอัดดินที่พลังงานบดอัดต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลังงานการบดอัดต่อผลการทดสอบบดอัดดินที่ทำการศึกษา แล้วนำผลที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดกับปริมาณกรวด

#### 4.2 ตัวอย่างดินและวิธีการศึกษา

ตัวอย่างดินจากแหล่งดินตามธรรมชาติ บริเวณรอบ ๆ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทั้งหมด 5 ตัวอย่างดิน ถูกนำมาใช้ในการศึกษาอิทธิพลของกรวดที่มีต่อผลการทดสอบบดอัด ดินทั้ง 5 ประกอบด้วย (1) Silty sand 1 (2) Red clay (3) Silty sand 3 (4) Silty clay 2 และ (5) Silty clay 3 ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่นำมาศึกษา ส่วนการกระจายขนาดของเม็ดดินที่นำมาศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.1 จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 จะพบว่าดินที่นำมาศึกษามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเพียงพอที่จะนำมาศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อการบดอัดที่เป็นตัวแทนของดินทุกประเภท

สำหรับกรวดที่นำมาศึกษาเป็นกรวดที่คัดออกมาจากดินลูกรัง (Laterite) โดยคัดกรวดที่ค้ำ ตะแกรงเบอร์ 4 แล้วนำไปทำความสะอาดโดยการล้างน้ำ จากนั้นนำกรวดที่ผ่านการทำความสะอาด แล้วไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 ตะแกรงเบอร์ 3/8 และตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อคัดกรวดที่เตรียมไว้ ออกเป็นสองขนาดเพื่อศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดและปริมาณของกรวดต่อผลทดสอบการบดอัด กรวดทั้งสองขนาดคือ

(ก) กรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.75 มิลลิเมตรถึง 9.5 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปจะเรียกว่ากรวดขนาดเล็ก และ

(ข) กรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 9.5 มิลลิเมตรถึง 19 มิลลิเมตร ซึ่งต่อไปจะเรียกว่ากรวดขนาดใหญ่

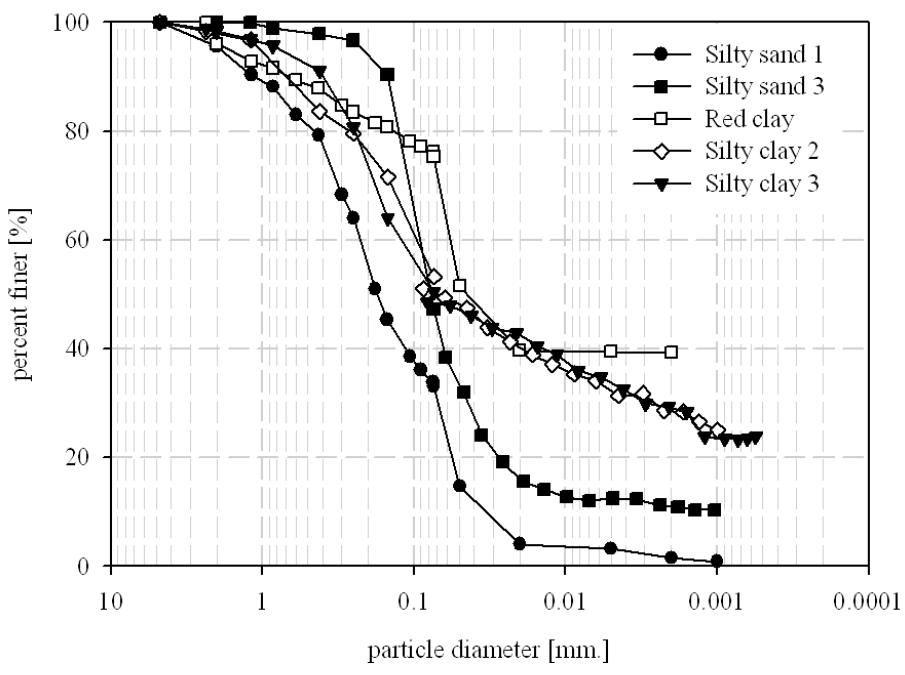
ส่วนกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 3/4 จะไม่นำมาศึกษาและถูกคัดทิ้งไป ทั้งนี้เนื่องจากตาม มาตรฐานการทดสอบการบดอัดแบบพล็อกเตอร์ หากดินที่นำมาทดสอบการบดอัดมีกรวดที่ค้ำ ตะแกรงเบอร์ 3/4 กรวดเหล่านี้จะถูกคัดออกแล้วแทนที่กรวดที่คัดออกด้วยกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 ด้วยปริมาณเท่ากับปริมาณกรวดที่คัดออก เมื่อคัดกรวดออกเป็น 2 ขนาดแล้ว กรวดทั้งสองขนาด จะถูกนำไปแช่น้ำและก่อนนำมาทดสอบจะถูกทำให้ผิวแห้งเพื่อให้กรวดอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง ก่อนทดสอบ

กรวดทั้งสองขนาดจะถูกนำไปแยกผสมกับตัวอย่างดินทั้ง 5 ประเภทด้วยปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ก่อนจะนำไปทดสอบการบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ (ASTM D698-91) รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพตัวอย่างดินทั้งหมดที่ถูกนำไปทดสอบการบดอัดดิน จากรูปดินที่ทำการศึกษามี 5 ประเภท นำไปผสมกรวด 2 ขนาด คือกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่ ด้วยปริมาณที่แตกต่างกัน 5 ปริมาณ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีการทดสอบการบดอัดดินทั้งสิ้น จำนวน 45 การทดสอบ

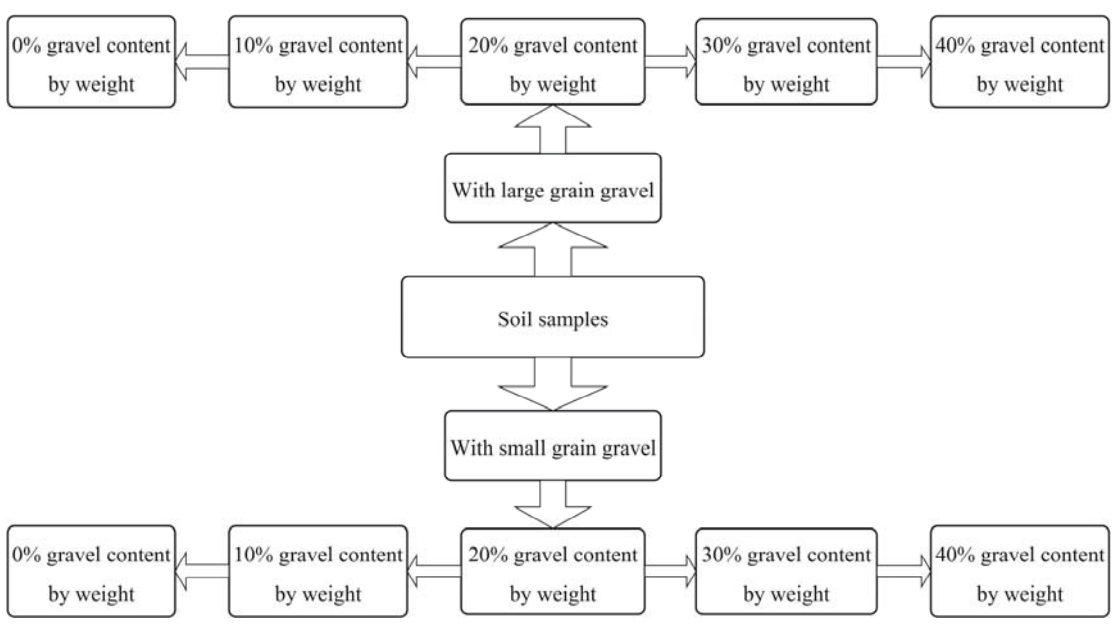
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Soil type	<i>LL</i> [%]	<i>PL</i> [%]	<i>PI</i> [%]	$G_s$	Group symbol
Silty sand 1	NP	NP	NP	2.67	SM
Red clay	75	24.6	50.4	2.7	CH
Silty clay 2	37.5	15.7	21.8	2.67	CL
Silty sand 3	NP	NP	NP	2.68	SM
Silty clay 3	29.4	17.9	11.5	2.73	CL





รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.2 แผนการทดสอบของดินแต่ละประเภท

### 4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

รูปที่ 4.3 แสดงเส้นโค้งการบดอัดจาก 45 การทดสอบการบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรวด ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความชื้นที่เหมาะสมจะลดลงสำหรับทุกประเภทดิน ผลทดสอบการบดอัดดินทั้งหมด 45 การทดสอบ แสดงสรุปดังตารางที่ 4.2 นอกจากนี้จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นรูปร่างของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดไม่เกินหรือเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ กับรูปร่างของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีรูปร่างต่างกันเล็กน้อย โดยเฉพาะทางด้านแห้ง (Dry side of optimum) ซึ่งทางด้านแห้งของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีความชันมากกว่าทางด้านแห้งของเส้นโค้งการบดอัดดินสำหรับดินที่มีปริมาณกรวดน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากตามมาตรฐานการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์จะต้องเปลี่ยนแบบสำหรับบดอัดดินจากแบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ไปเป็นแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) เมื่อมีปริมาณกรวดผสมในดินเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเพิ่มขนาดของแบบบดอัดเป็นการลดการขัดของกรวดที่ผสมอยู่ในดินจึงทำให้สามารถบดอัดดินได้ดีขึ้นและแสดงออกมาที่ความชันของเส้นโค้งการบดอัดทางด้านแห้ง

เมื่อนำค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดที่ได้จากการทดสอบไปทำการคำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุดเฉพาะส่วนละเอียดซึ่งเป็นดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (Minus no.4 sieve) และต่อไปจะเรียกว่าดินบดอัดคัดกรวด โดยใช้สมการที่ 4.1 และความชื้นที่เหมาะสมในดินบดอัดคัดกรวด โดยใช้สมการที่ 4.2 โดยทั้งสองสมการพิสูจน์มาจากการวิเคราะห์สถานะของส่วนประกอบในดินจากปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินและความหนาแน่นของกรวด

$$\rho'_{d \max} = \frac{\rho_{d \max}}{\left[ 1 + P_g - \frac{P_g \rho_{d \max}}{\rho_g} \right]} \quad (4.1)$$

$$w'_{\text{opt}} = w_{\text{opt}} (1 + P_g) \quad (4.2)$$

โดยที่	$\rho_{d \max}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด
	$w_{\text{opt}}$	คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัด
	$\rho'_{d \max}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวด

$w'_{opt}$	คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวด
$\rho_g$	คือ ความหนาแน่นของกรวด
$P_g$	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด

คำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดตามทฤษฎี (Theoretical maximum dry density,  $\rho_{d\max T}$ ) จากสมการที่ 4.3 ซึ่งเสนอโดย Shockey (1948) สำหรับคำนวณความหนาแน่นแห้งของดินปนกรวดที่ปริมาณกรวดต่าง ๆ โดยสมมติให้ช่องว่างระหว่างกรวดจะถูกเติมเต็มด้วยเม็ดดินที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการบดอัดเม็ดดินตามมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์ โดยเมื่อมีปริมาณกรวดในดินเพิ่มมากขึ้น สัดส่วนของกรวดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่สัดส่วนของดินที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการบดอัดเม็ดดินตามมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์จะมีค่าลดลง ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดตามทฤษฎี จึงเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของดินและกรวด

$$\rho_{d\max T} = \frac{1}{\left(\frac{P_f}{\rho_{d\max f}}\right) + \left(\frac{P_g}{\rho_g}\right)} \quad (4.3)$$

โดยที่	$\rho_{d\max T}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎี (Theoretical maximum dry density)
	$P_f$	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของส่วนละเอียดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
	$P_g$	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
	$\rho_{d\max f}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเม็ดดินที่ถูกบดอัดตามมาตรฐานพ्ल็อกเตอร์

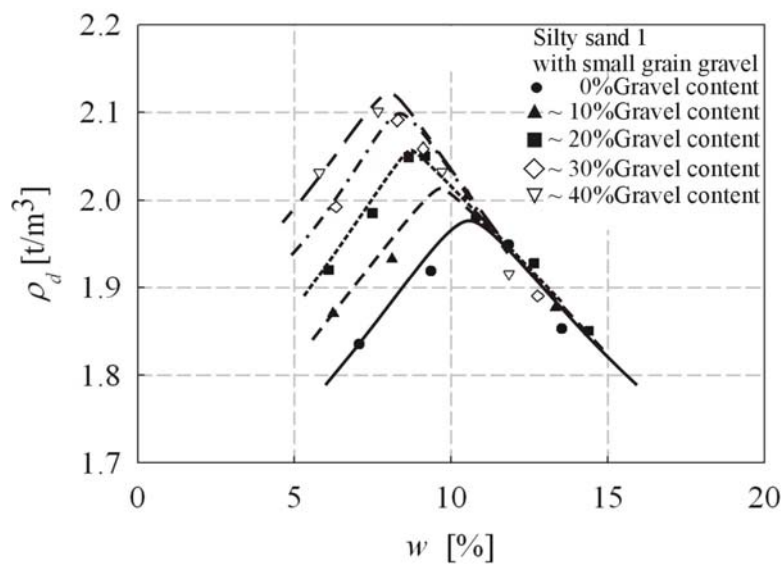
รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดทั้งที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณกรวดมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดและความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีมีค่าเท่ากัน และเมื่อเพิ่มปริมาณกรวดถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จะเริ่มสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามความแตกต่างดังกล่าวจะมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรวดจนมีปริมาณมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปผลทดสอบการบดอัดในการศึกษาอิทธิพลของกรวด

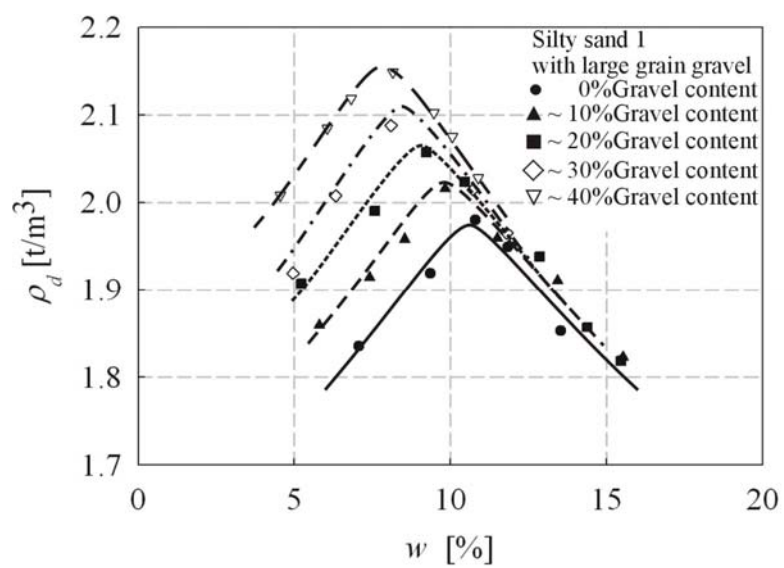
Tests No.	Soil type	Gravel content		$\rho_{d \max}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$w_{\text{opt}}$ [%]	$\rho'_{d \max}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$w'_{\text{opt}}$ [%]
		Small [%]	Large [%]				
1.1	Silty sand 1	-	-	1.965	10.80	1.965	10.80
1.2		10	-	2.012	9.83	1.961	10.90
1.3		20	-	2.060	8.85	1.954	11.00
1.4		30.26	-	2.100	8.50	1.933	12.10
1.5		40.30	-	2.130	8.20	1.891	13.59
1.6		-	10	1.965	10.80	1.965	10.80
1.7		-	20	2.015	9.83	1.965	10.90
1.8		-	30.26	2.061	8.85	1.956	11.00
1.9		-	40.30	2.110	8.40	1.946	11.95
2.1	Red clay	-	-	1.530	25.00	1.530	25.00
2.2		10	-	1.600	22.50	1.531	25.10
2.3		20	-	1.660	19.83	1.509	25.20
2.4		31.97	-	1.720	18.50	1.481	27.06
2.5		42.23	-	1.770	17.00	1.431	29.20
2.6		-	10	1.600	25.00	1.531	25.1
2.7		-	20	1.665	22.54	1.514	25.2
2.8		-	31.97	1.740	19.91	1.503	26.4
2.9		-	42.23	1.800	18.00	1.465	28.5
3.1	Silty clay 2	-	-	1.770	16.00	1.770	16.00
3.2		10	-	1.830	14.44	1.770	16.10
3.3		20	-	1.890	12.84	1.765	16.30
3.4		30.50	-	1.925	12.40	1.726	18.18
3.5		40.57	-	1.955	11.80	1.669	20.34
3.6		-	10	1.770	16.00	1.770	16.00
3.7		-	20	1.830	14.44	1.770	16.10

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปผลทดสอบการบดอัดในการศึกษาอิทธิพลของกรวด (ต่อ)

Tests No.	Soil type	Gravel content		$\rho_{d \max}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$w_{opt}$ [%]	$\rho'_{d \max}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$w'_{opt}$ [%]
3.8		-	30.50	1.940	12.00	1.744	17.59
3.9		-	40.57	1.980	11.00	1.700	18.96
4.1	Silty sand 3	-	-	1.800	13.00	1.800	13.00
4.2		10	-	1.860	11.80	1.801	13.10
4.3		20	-	1.920	10.59	1.798	13.20
4.4		30.11	-	1.970	10.00	1.779	14.26
4.5		40.12	-	2.010	9.50	1.737	15.79
4.6		-	10	1.800	13.00	1.800	13.00
4.7		-	20	1.860	11.80	1.801	13.10
4.8		-	30.11	1.920	10.59	1.798	13.20
4.9		-	40.12	1.980	9.90	1.790	14.12
5.1	Silty clay 3	-	-	1.890	14.00	1.890	14.00
5.2		10	-	1.944	12.71	1.890	14.10
5.3		20	-	2.000	11.41	1.888	14.20
5.4		30.43	-	2.040	11.00	1.863	15.67
5.5		40.49	-	2.070	10.65	1.815	17.67
5.6		-	10	1.890	14.00	1.890	14.00
5.7		-	20	1.944	12.71	1.890	14.10
5.8		-	30.43	2.000	11.41	1.888	14.20
5.9		-	40.49	2.050	10.90	1.875	15.53

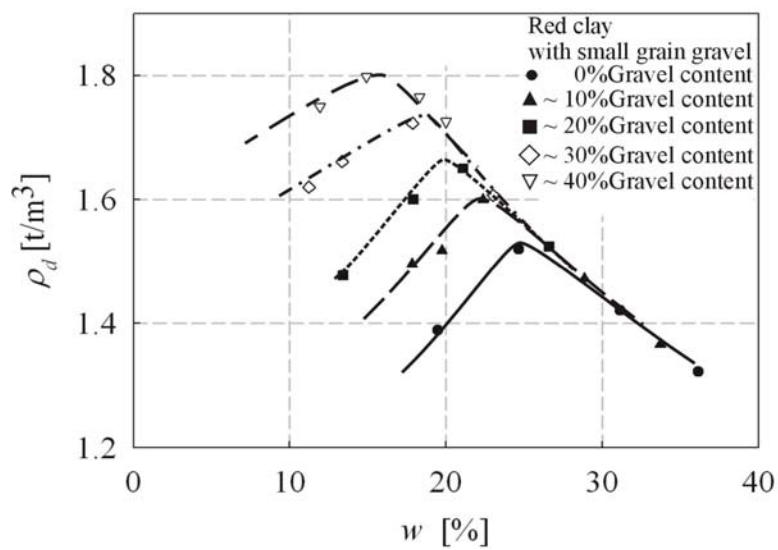


(ก) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดเล็ก

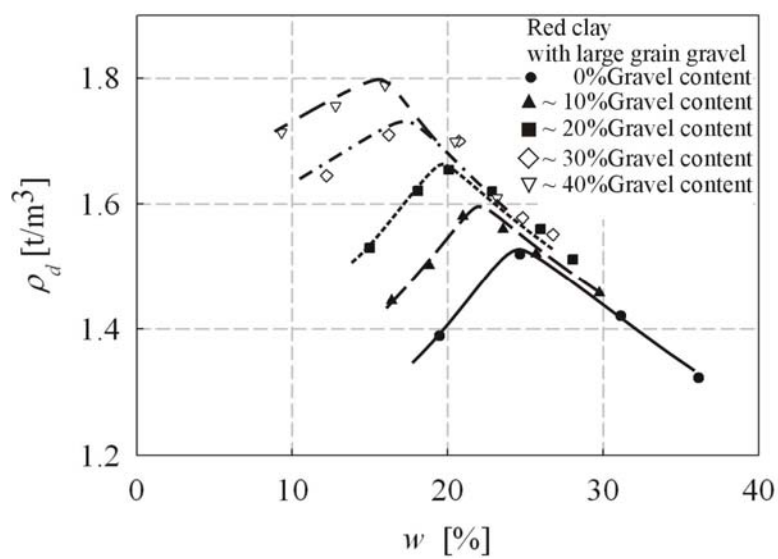


(ข) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดใหญ่

รูปที่ 4.3 ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty sand 1

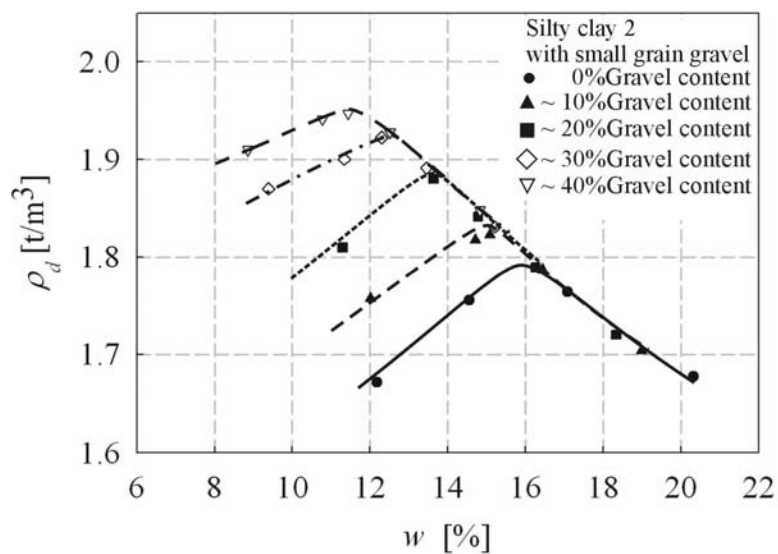


(ก) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดเล็ก

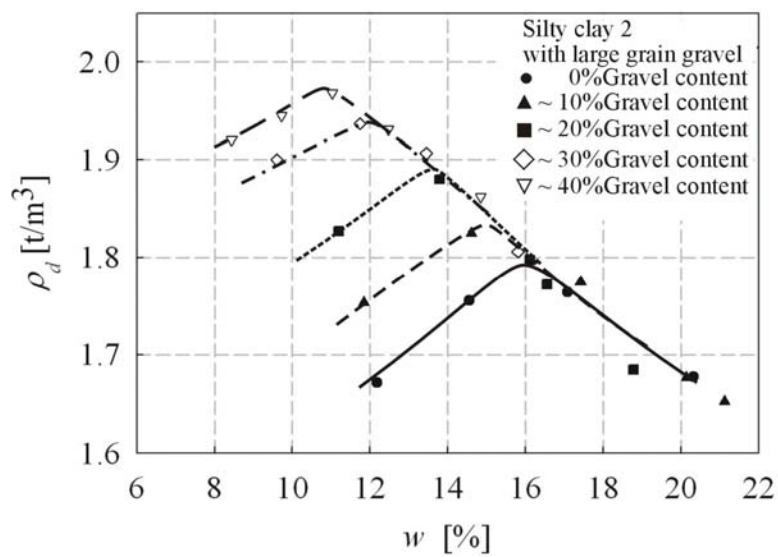


(ข) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดใหญ่

รูปที่ 4.4 ผลทดสอบการบดอัดของดิน Red clay



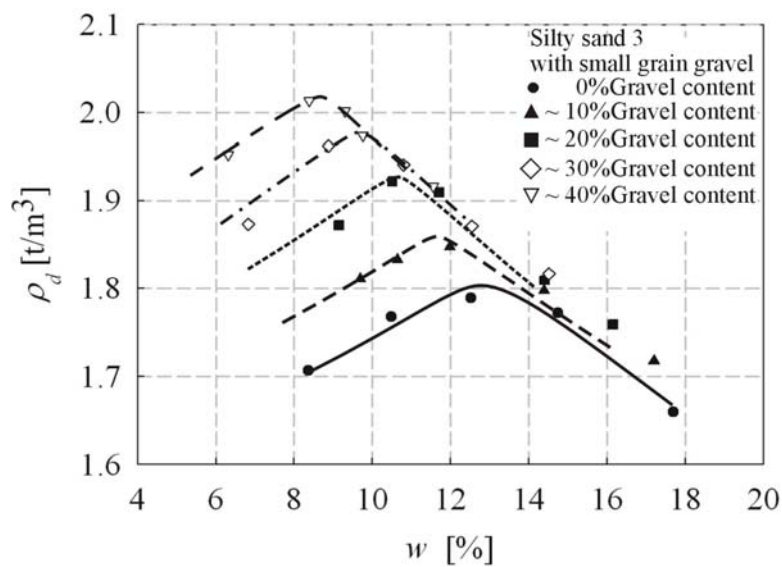
(ก) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดเล็ก



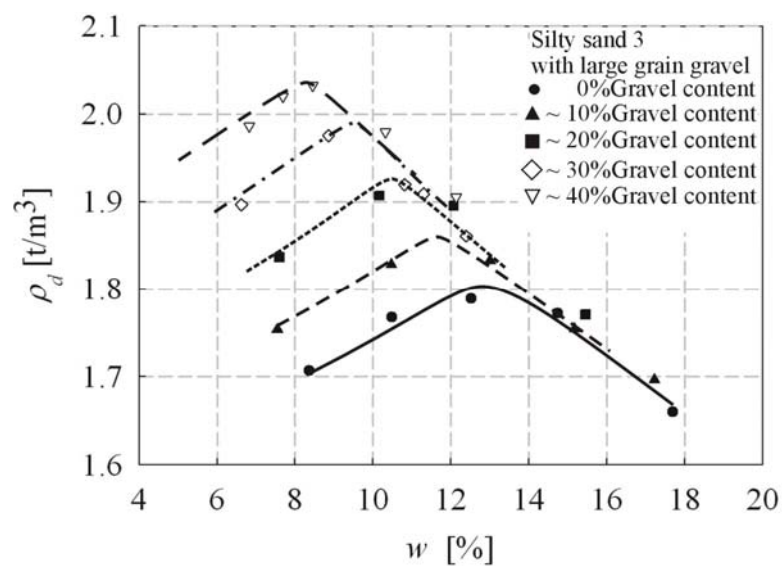
(ข) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดใหญ่

รูปที่ 4.5 ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty clay 2



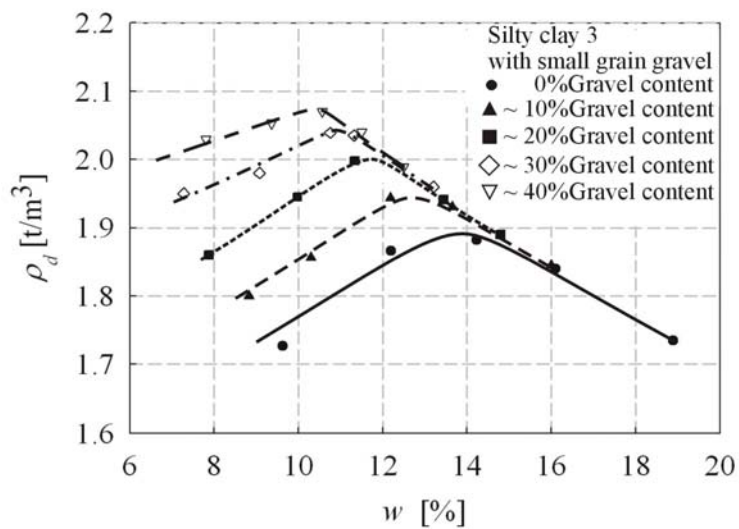


(ก) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดเล็ก

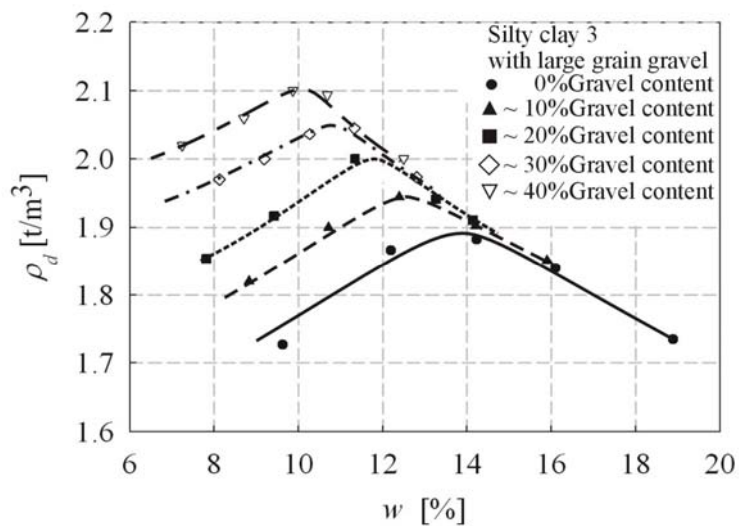


(ข) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดใหญ่

รูปที่ 4.6 ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty sand 3

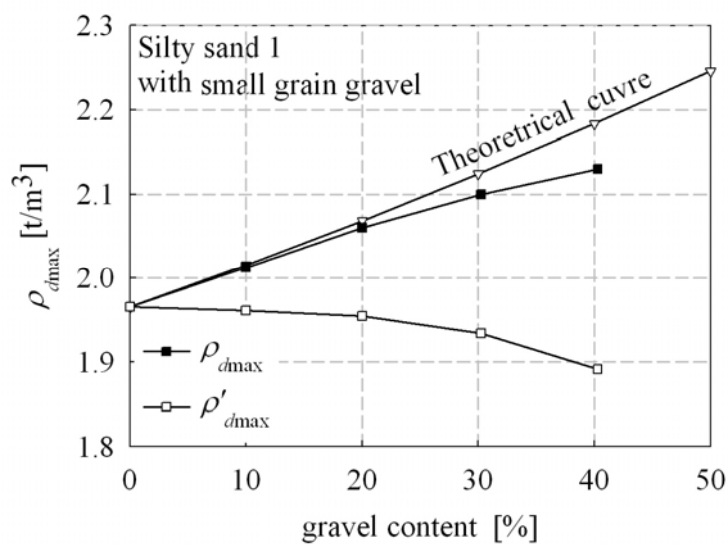


(ก) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดเล็ก

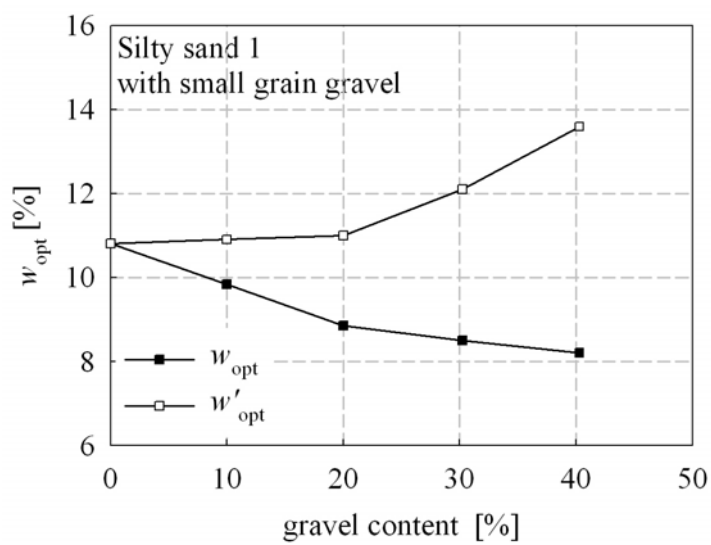


(ข) ผลทดสอบการบดอัดของดินผสมกรวดขนาดใหญ่

รูปที่ 4.7 ผลทดสอบการบดอัดของดิน Silty clay 3

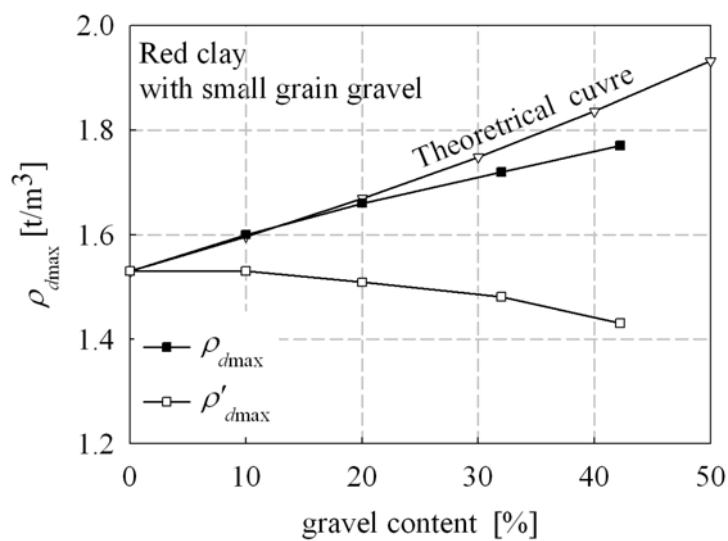


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

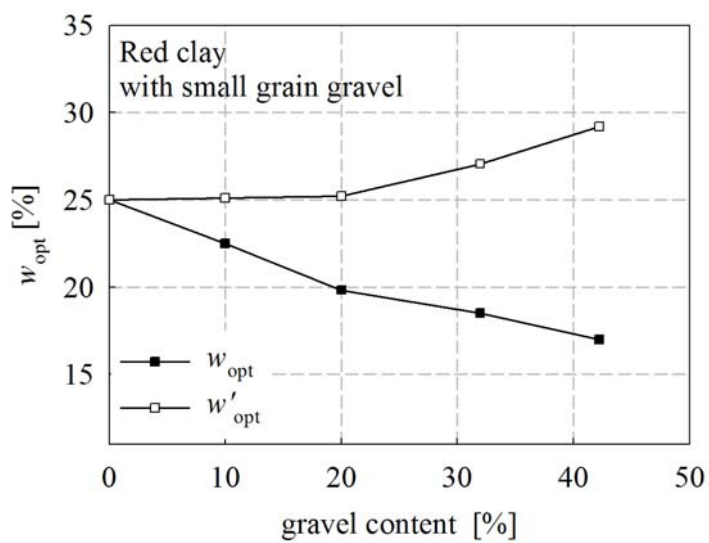


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$   
ของดิน Silty sand 1 ผสมกรวดขนาดเล็ก

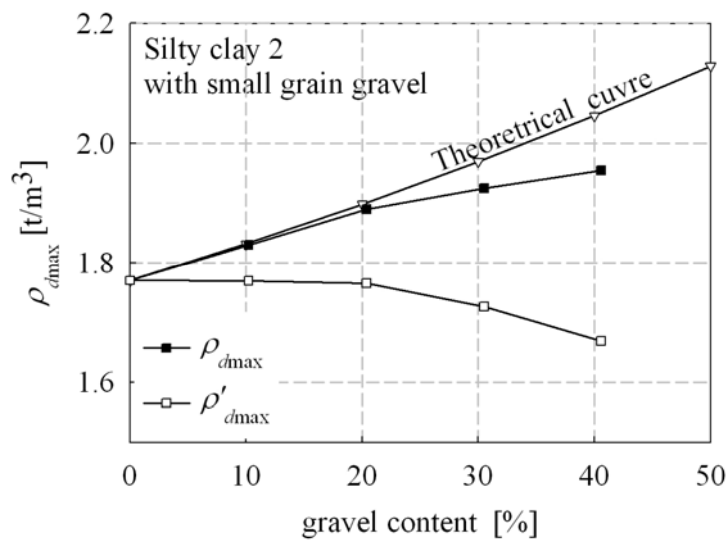


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

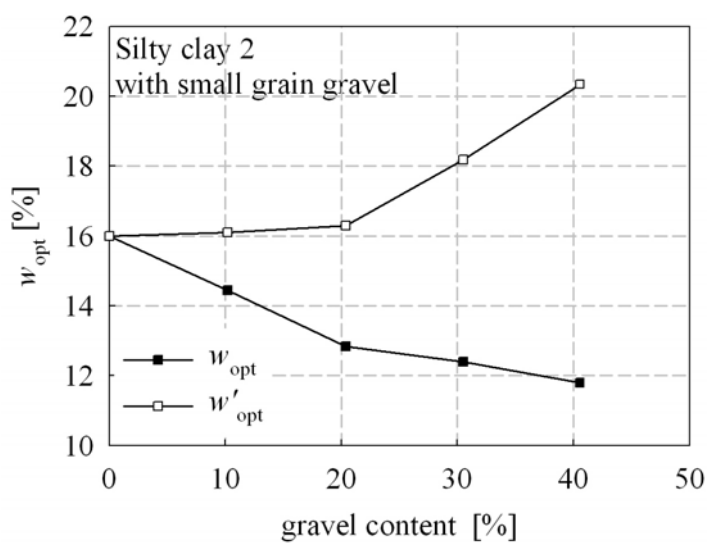


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Red clay ผสมกรวดขนาดเล็ก

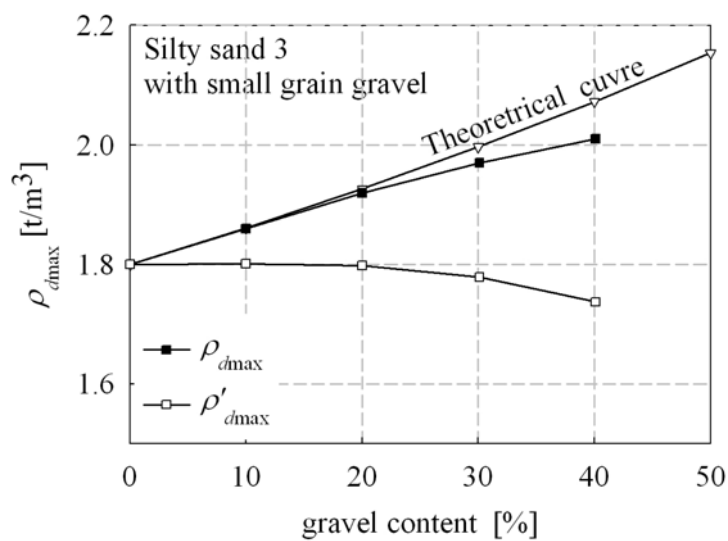


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

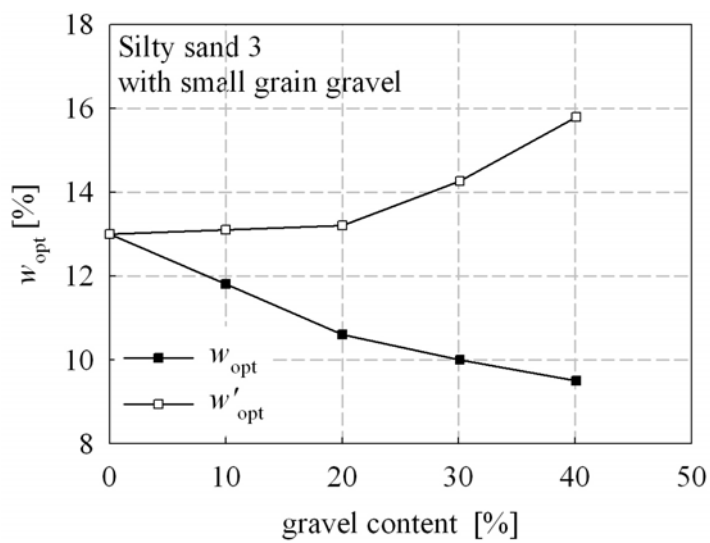


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Silty clay 2 ผสมกรวดขนาดเล็ก

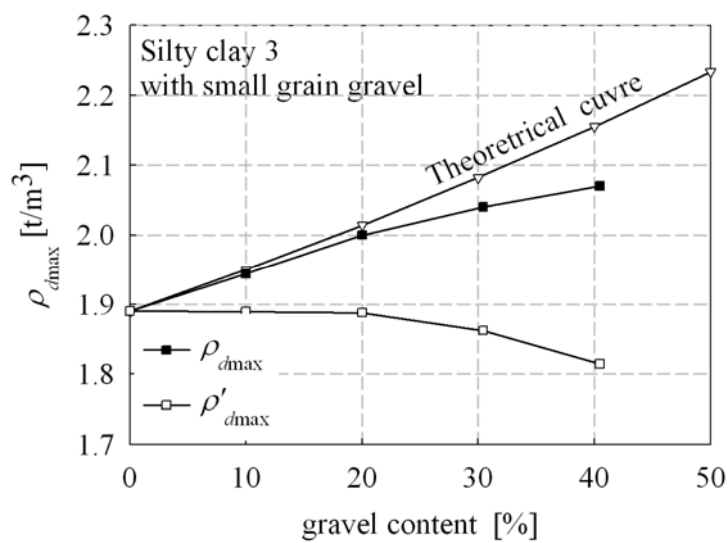


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

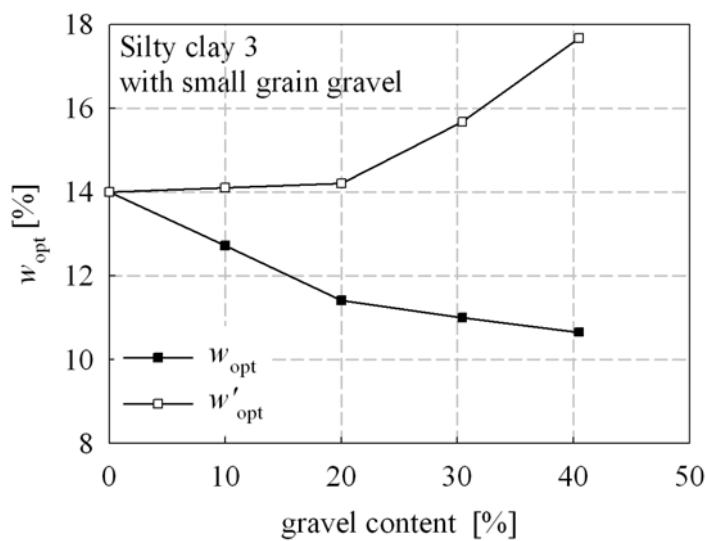


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Silty sand 3 ผสมกรวดขนาดเล็ก

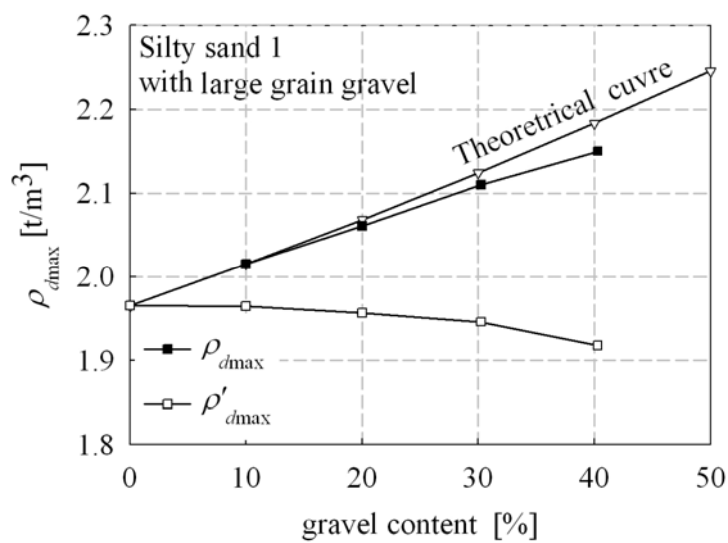


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

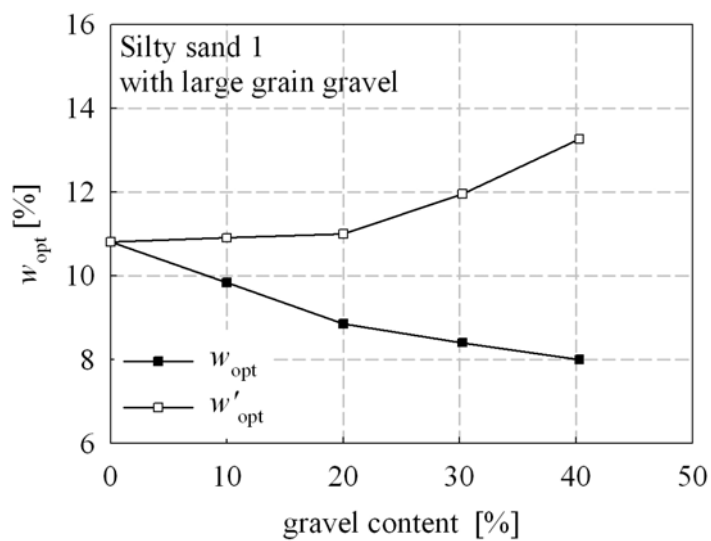


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Silty clay 3 ผสมกรวดขนาดเล็ก



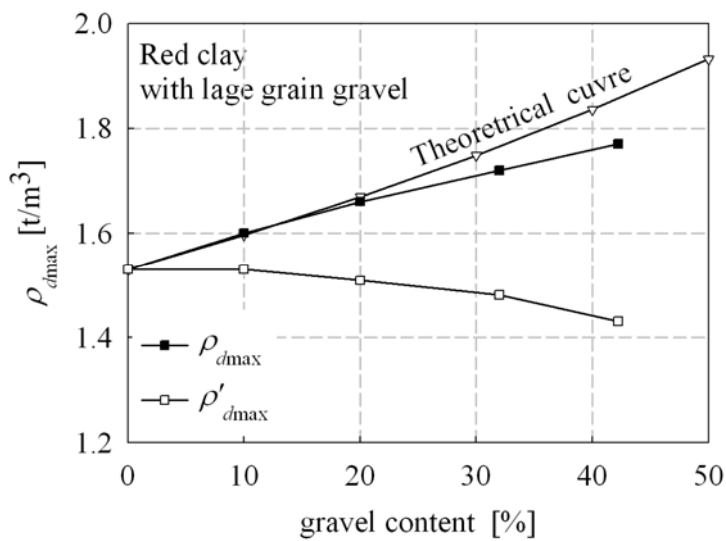
(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด



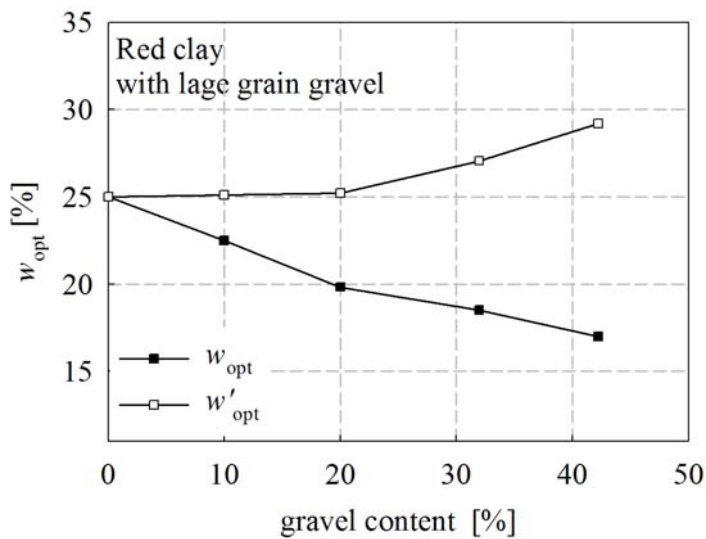
(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Silty sand 1 ผสมกรวดขนาดใหญ่



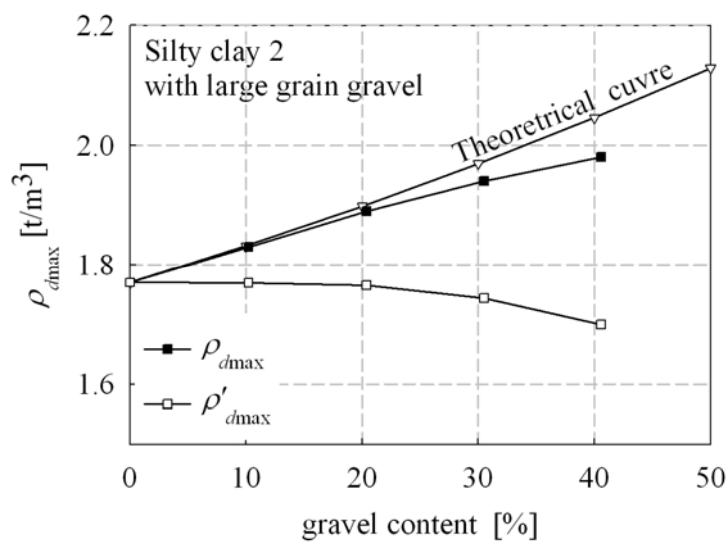


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

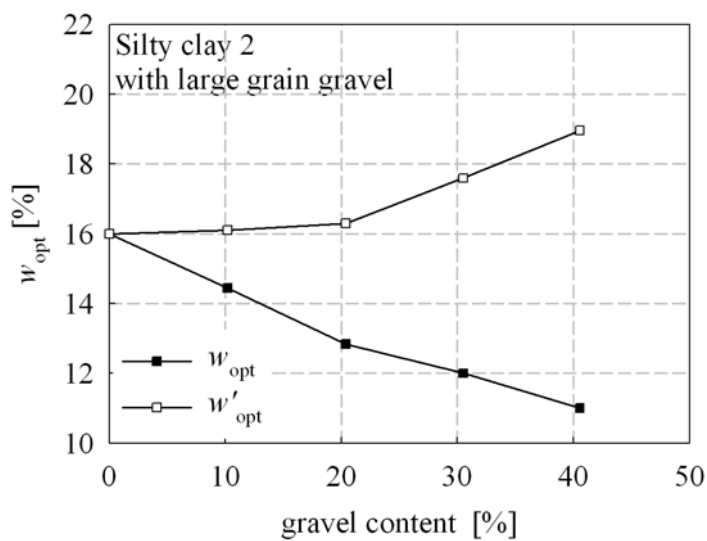


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Red clay ผสมกรวดขนาดใหญ่

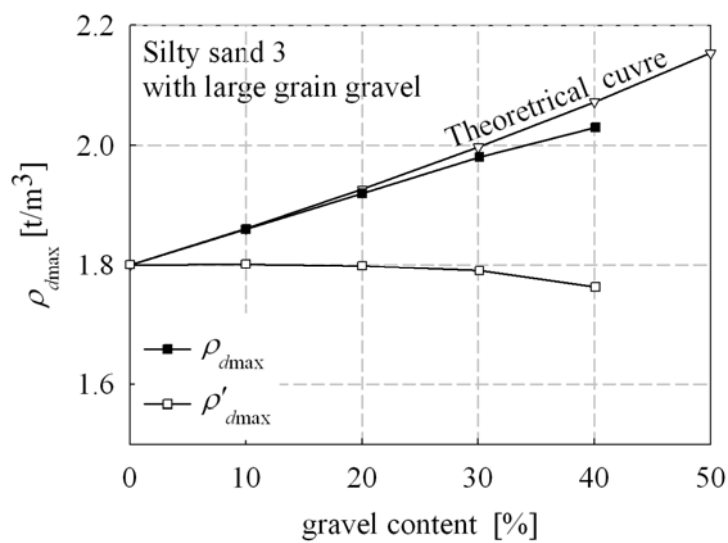


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

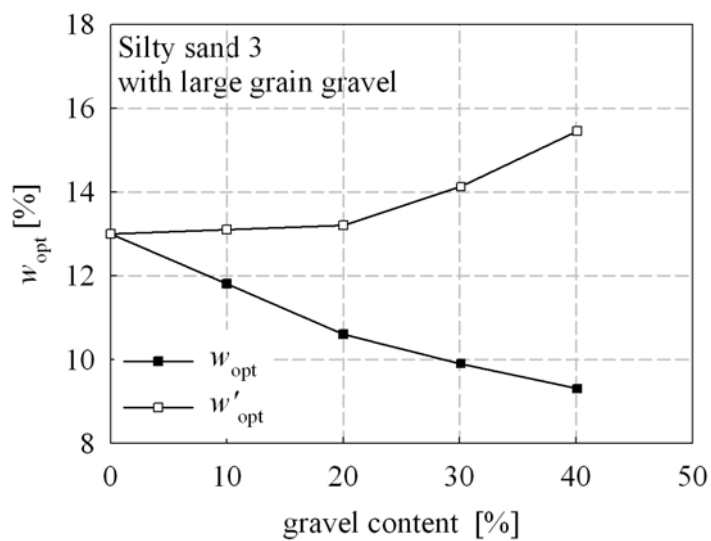


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Silty clay 2 ผสมกรวดขนาดใหญ่

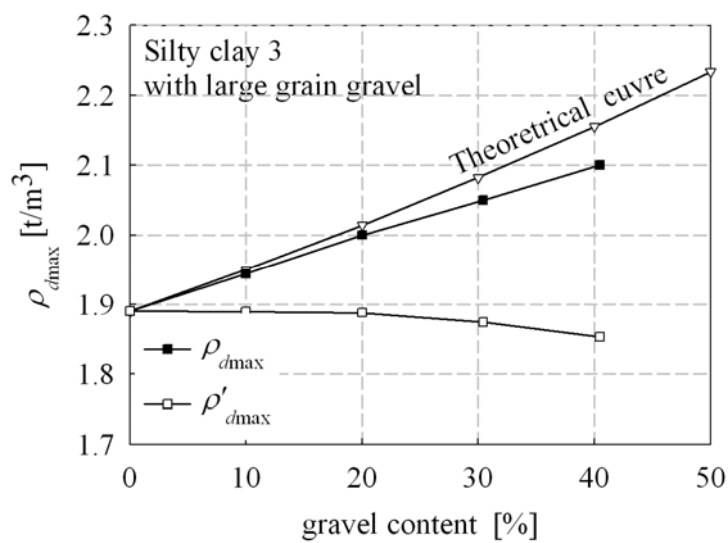


(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด

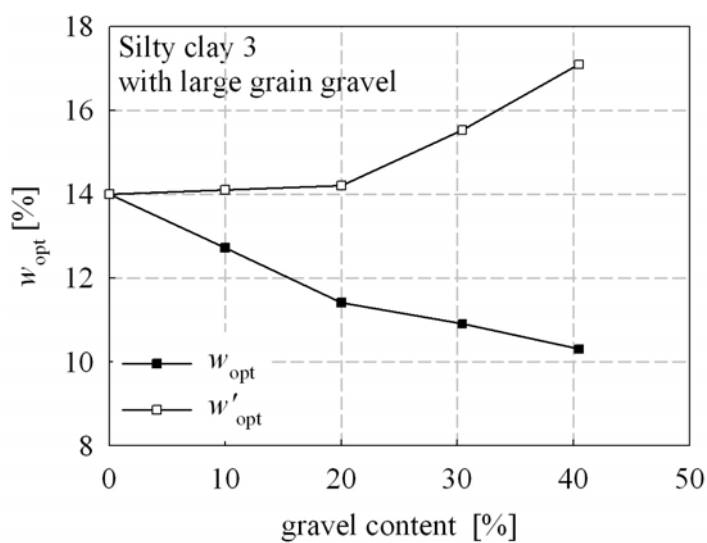


(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$   
ของดิน Silty sand 3 ผสมกรวดขนาดใหญ่



(ก) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด



(ข) ความชื้นที่เหมาะสม

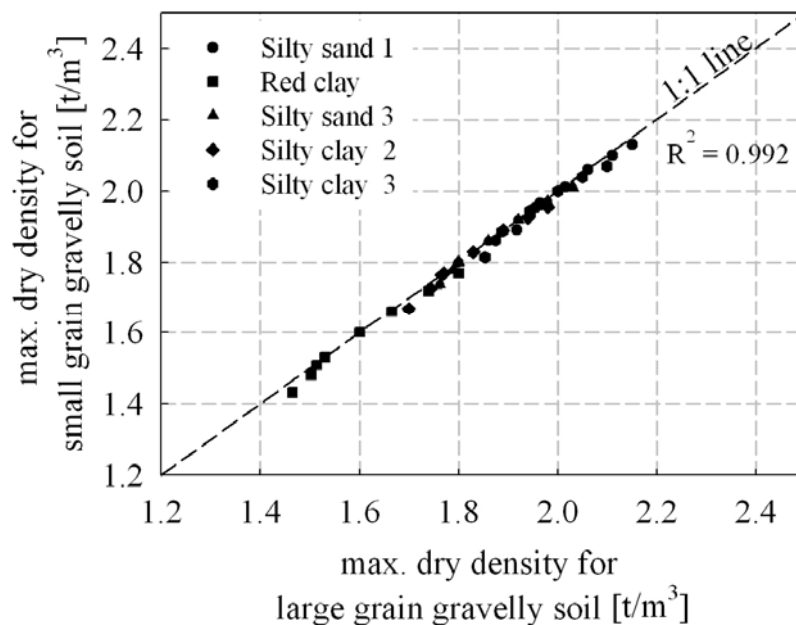
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับ  $\rho_{dmax}$  และ  $w_{opt}$  ของดิน Silty clay 3 ผสมกรวดขนาดใหญ่

การที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดและความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันในช่วงที่มีกรวดผสมอยู่ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่ากรวดไม่ได้ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของเม็ดดินในระหว่างที่เม็ดดินถูกบดอัด แต่กรวดจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของดินเม็ดละเอียดเมื่อปริมาณกรวดมีมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังจะเห็นได้จากการที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดอย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวดที่ปริมาณผสมกรวดใด ๆ ก็จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าลดลงเมื่อกรวดมีปริมาณสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

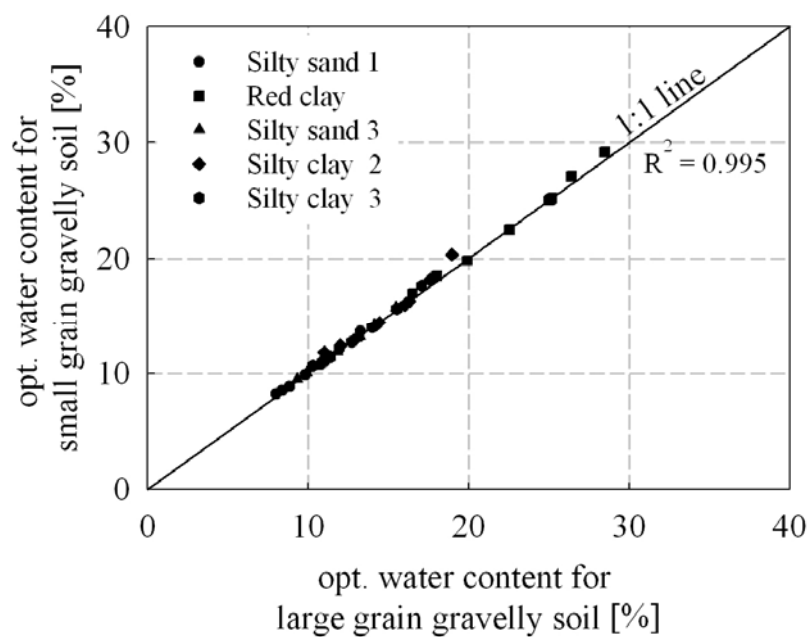
นอกจากนี้ในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดกับความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัด และความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดซึ่งคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.2 จะพบว่าความชื้นของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าเกือบคงที่ในช่วงที่มีปริมาณกรวดไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณกรวดมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ผลงานวิจัยหลายชิ้นได้บ่งชี้ให้เห็นว่าความชื้นที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน โดยความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าลดลงตามพลังงานบดอัดที่เพิ่มขึ้น เช่น Boutwell (1961); Blotz et al. (1998); Gurtug and Shidharan (2004) and Horpibulsuk et al. (2009) เป็นต้น ดังนั้นการที่ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรวด เป็นการบ่งชี้ว่าพลังงานการบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่เม็ดดินลดลงตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้นเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\rho_{d \max}$  และ  $\rho'_{d \max}$  ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดใหญ่ ที่ปริมาณกรวดเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.18 และความสัมพันธ์ระหว่าง  $w_{opt}$  และ  $w'_{opt}$  ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดใหญ่ที่ปริมาณกรวดเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าพิกัดของความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ตรงหรือต่ำกว่าเส้น 1:1 เล็กน้อย ในขณะที่พิกัดของความชื้นที่เหมาะสมอยู่ตรงหรือสูงกว่าเส้น 1:1 เล็กน้อย นั่นคือ ดินที่ผสมกรวดขนาดใหญ่จะมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสูงกว่าดินที่ผสมกรวดขนาดเล็ก และความชื้นที่เหมาะสมของดินที่ผสมกรวดขนาดใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าดินที่ผสมกรวดขนาดเล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณกรวดเท่ากัน กรวดที่มีขนาดเล็กซึ่งมีจำนวนเม็ดมากกว่าจะขัดกันมากกว่า จึงไปขัดขวางการเรียงตัวของเม็ดดินได้มากกว่า นอกจากนี้กรวดขนาดใหญ่มีการคละก้นดีกว่ากรวดขนาดเล็ก เนื่องจากช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวดขนาดใหญ่มีช่วงที่กว้างกว่า กล่าวคือระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 9.5 มิลลิเมตรถึง 19 มิลลิเมตร ในขณะที่กรวดขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.75 มิลลิเมตรถึง 9.5 มิลลิเมตร จึงทำให้การบดอัดดินผสมกรวดขนาดใหญ่สามารถบดอัดได้ดีกว่าดินผสมกรวดขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งพบว่าพิกัดของข้อมูลเบี่ยงเบนจากเส้น 1:1 น้อยมาก

( $R^2$  มากกว่า 0.99) ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของกรวดรวมทั้งการกระจายขนาดของกรวดมีอิทธิพลต่อผลทดสอบการบดอัดดินน้อยมาก



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\rho_{d\max}$  ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่



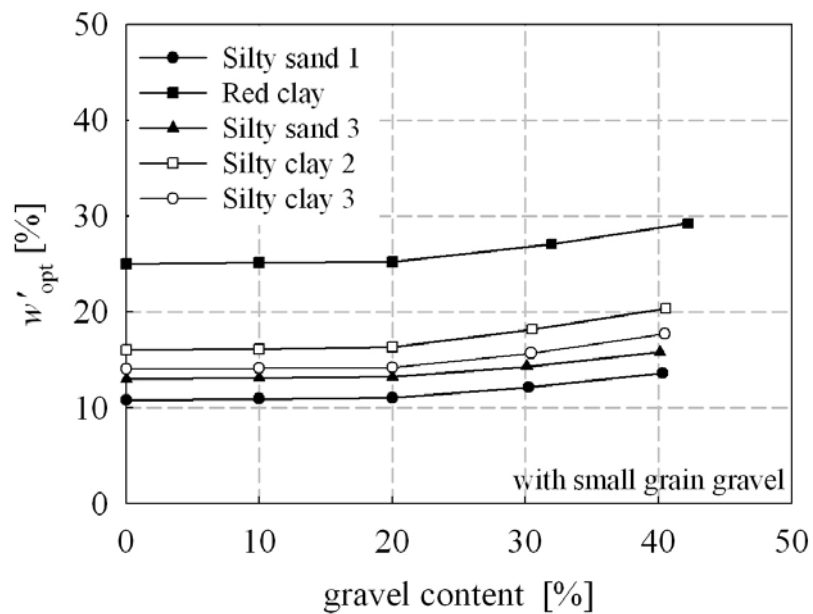
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $w_{\text{opt}}$  ของดินบดอัดที่ผสมกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่

จากผลทดสอบและบทวิเคราะห์ข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่ากรวดจะมีอิทธิพลต่อผลทดสอบการบดอัดดินเมื่อปริมาณกรวดมีมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และปัจจัยหลักต่อผลทดสอบการบดอัดดินคือปริมาณกรวดที่ผสมในดินบดอัด โดยเมื่อกรวดมีปริมาณเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะขัดขวางการจัดเรียงตัวของเม็ดดินในระหว่างการบดอัดทำให้เม็ดดินได้รับพลังงานในการบดอัดลดลง

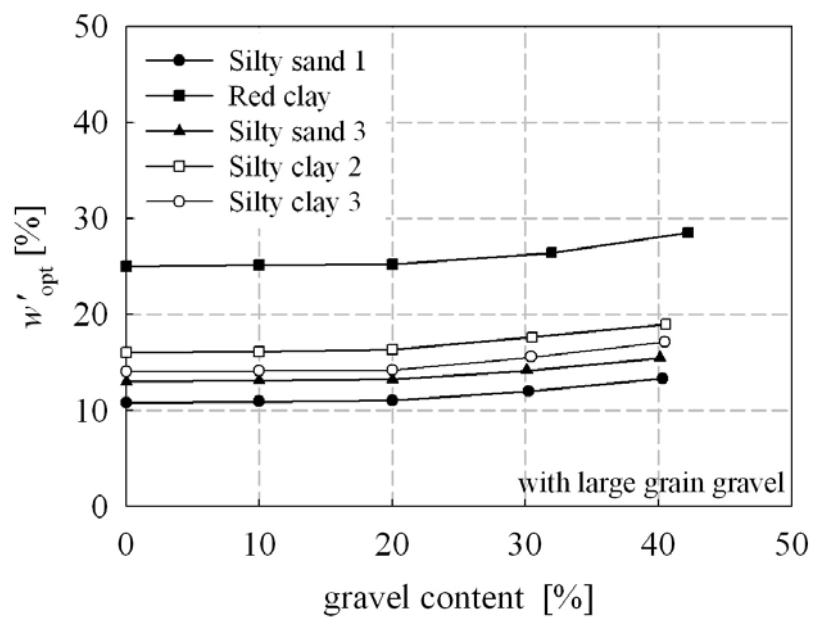
#### 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดและปริมาณกรวด

จากผลทดสอบในหัวข้อที่ 4.3 พบว่าสำหรับดินชนิดหนึ่ง เมื่อปริมาณกรวดที่ผสมในดินมีค่าเพิ่มขึ้นเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ กรวดจะขัดกัน และดูดซับพลังงานบดอัดดินบางส่วนไว้ ทำให้พลังงานบดอัดที่จะถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดมีค่าลดลง ดังจะเห็นได้จากความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.20

รูปที่ 4.21 แสดงเส้นโค้งบดอัดของดินทั้ง 5 ประเภท ที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานบดอัด  $148.1 \text{ kJ/m}^3$   $197.5 \text{ kJ/m}^3$   $296.2 \text{ kJ/m}^3$  และ  $592.5 \text{ kJ/m}^3$  และรูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่เหมาะสมกับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าสามารถแปลงอิทธิพลของกรวดให้เป็นพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดได้ รูปที่ 4.23 แสดงแผนภาพการแปลงอิทธิพลของกรวดเป็นพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียด จากรูปเป็นการแสดงขั้นตอนการแปลงอิทธิพลของกรวดเป็นพลังงานที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดสำหรับดิน Silty clay 2 ที่มีกรวดผสมอยู่ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแปลงปริมาณกรวด 30 เปอร์เซ็นต์เป็นค่า  $1/\text{gravel content}$  ได้เท่ากับ 3.33 นำไปอ่านความชื้นเหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดในรูปที่ 4.20 จะได้ความชื้นเหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ นำความชื้นเหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวดที่อ่านได้จากรูปที่ 4.20 ไปอ่านค่าพลังงานบดอัดจากรูปที่ 4.22 ได้ค่าเท่ากับ  $278 \text{ kJ/m}^3$  จากนั้นนำค่า  $1/\text{gravel content}$  กับพลังงานที่อ่านได้จากรูปที่ 4.22 มาพล็อตกราฟโดยกำหนดให้ค่า  $1/\text{gravel content}$  เป็นแกนตั้ง ให้ค่าพลังงานเป็นแกนนอน เมื่อทำเช่นนี้ที่ปริมาณกรวดอื่นๆ กับดินทั้งหมดที่นำมาทดสอบ จะได้พลังงานที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดเนื่องจากอิทธิพลของกรวด ดังรูปที่ 4.24



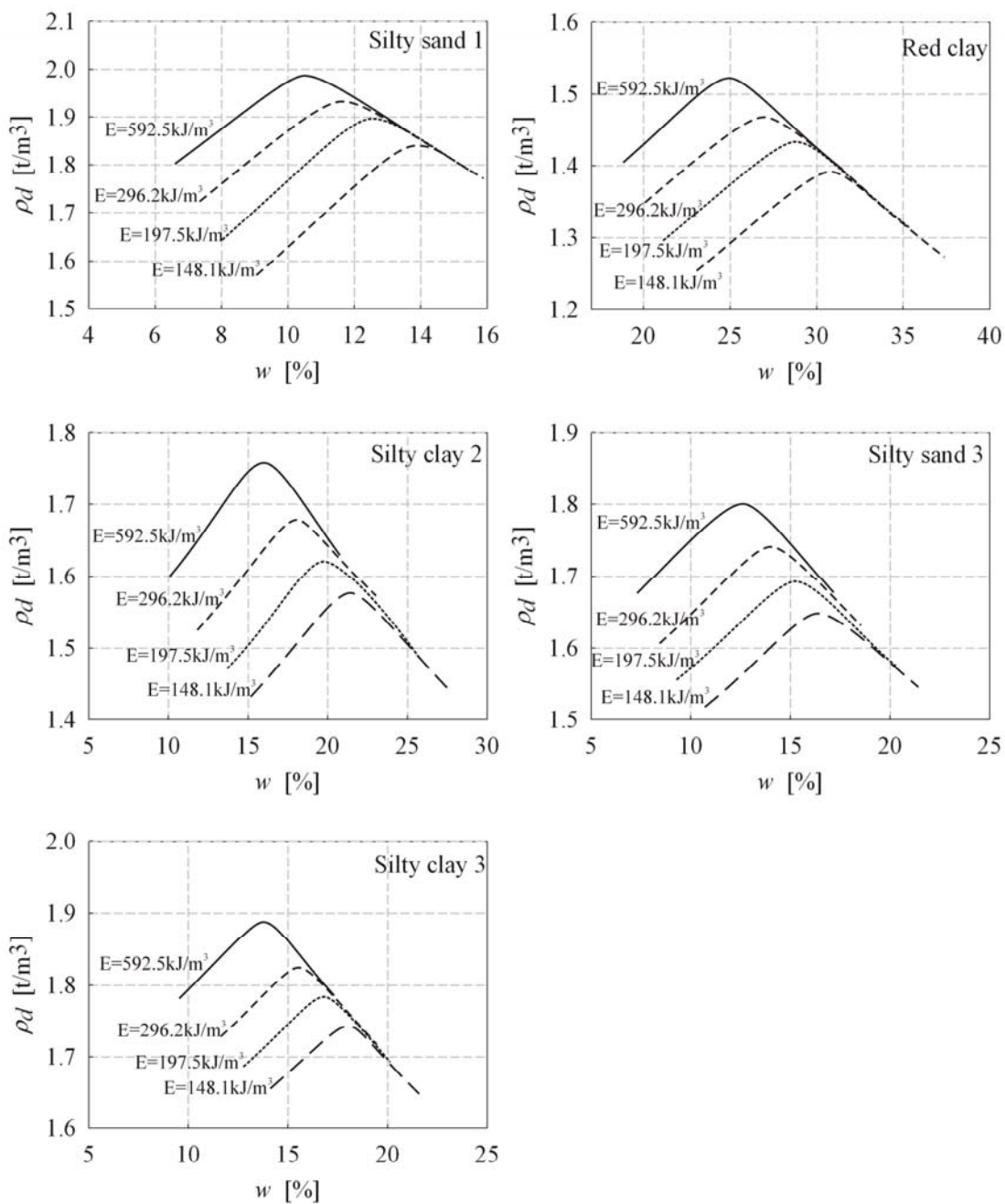
(ก) ดินผสมกรวดขนาดเล็ก



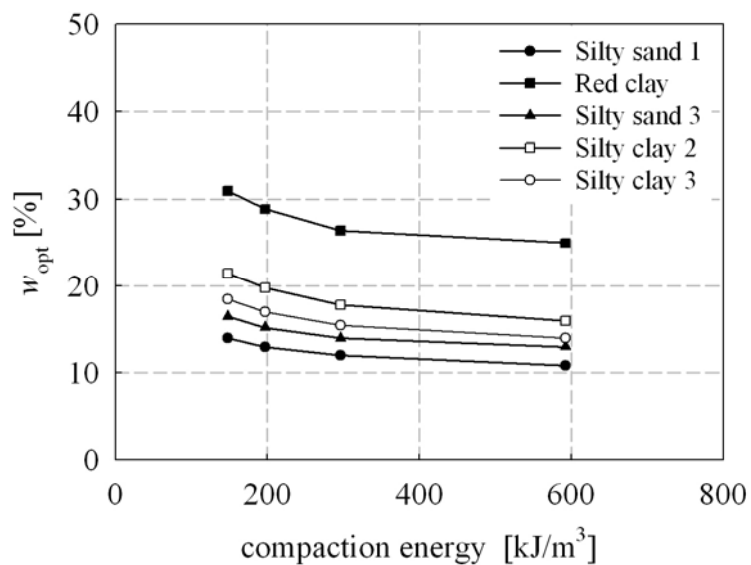
(ข) ดินผสมกรวดขนาดใหญ่

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรวดและ  $w'_{opt}$  ของดินผสมกรวดขนาดเล็ก และกรวดขนาดใหญ่

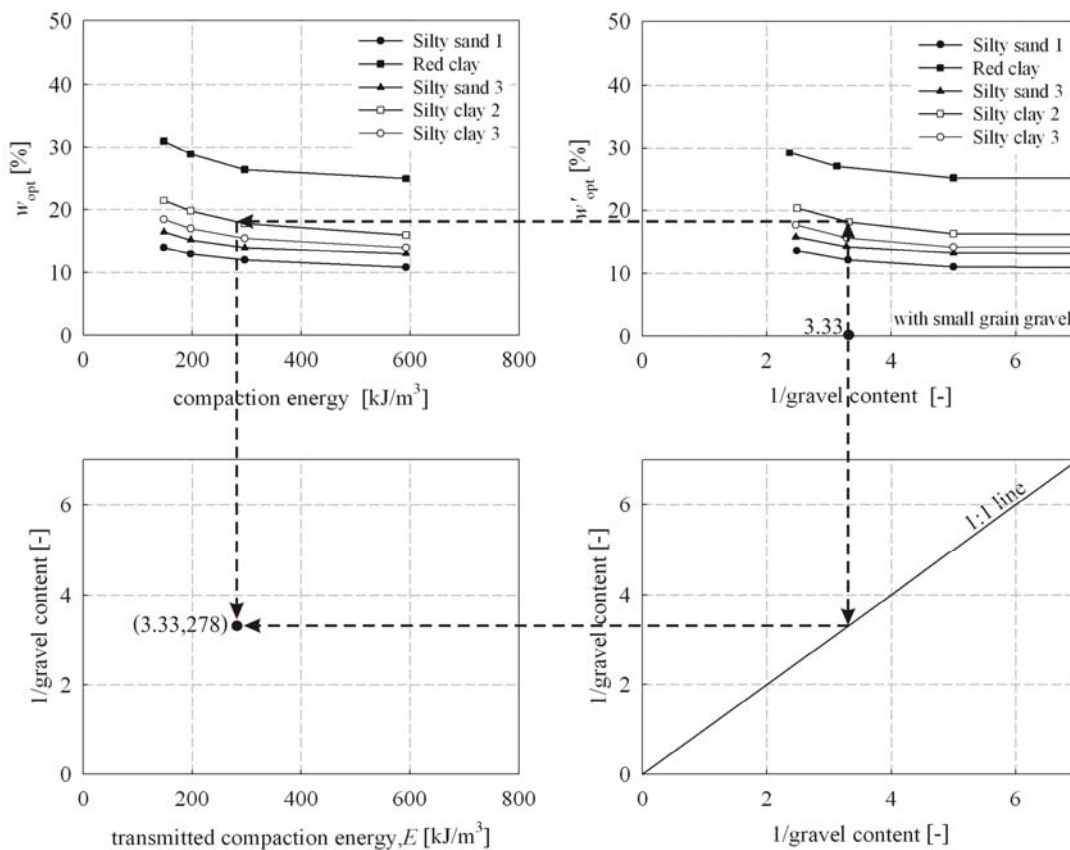




รูปที่ 4.21 เส้นโค้งบดอัดของดินทั้ง 5 ประเภทที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานบดอัด  
 $148.1 \text{ kJ/m}^3$ ,  $197.5 \text{ kJ/m}^3$ ,  $296.2 \text{ kJ/m}^3$  และ  $592.5 \text{ kJ/m}^3$

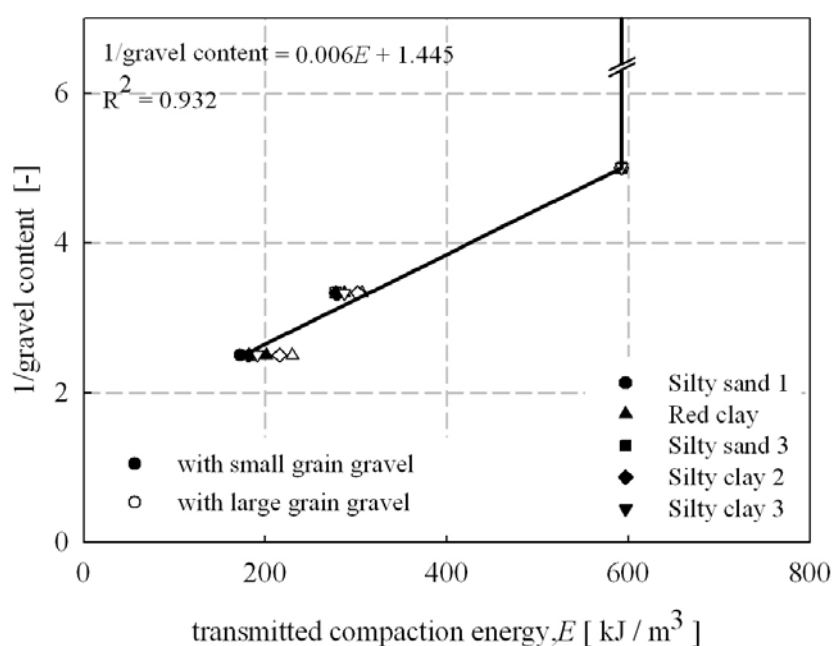


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $w_{opt}$  กับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน



รูปที่ 4.23 แผนภาพการแปลงอิทธิพลของกรวดเป็นพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียด

จากรูปที่ 4.24 พบว่าที่ปริมาณกรวดไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานบดอัดทั้งหมดจะถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด นั่นคือมีพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดเท่ากับพลังงานบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ เท่ากับ  $592.5 \text{ kJ/m}^3$  แต่เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดจะลดลง และที่ปริมาณกรวดหนึ่งๆ พลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดจะมีค่ากระจายอยู่ในช่วงแคบ ๆ ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียด โดยไม่ขึ้นกับประเภทของดิน รวมทั้งขนาดและการกระจายขนาดของกรวด



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดและปริมาณกรวด

#### 4.5 การประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวด

##### ด้วยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กที่เสนอไปในบทที่ 3 สามารถใช้หาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตรที่พลังงานบดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถนำไปใช้ทดสอบการบดอัดกับดินปนกรวดได้ อย่างไรก็ตามจากผลทดสอบและวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดขึ้นกับปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดิน และได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดกับปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดิน เมื่อทำการบดอัด

ดินปนกรวดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า สำหรับดินชนิดหนึ่ง ๆ คุณลักษณะการบดอัดของดินจะขึ้นกับพลังงานบดอัด และมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอสมการในการประมาณความชื้นที่เหมาะสมที่พลังงานบดอัดต่าง ๆ เช่น Boutwell (1961); Blozt et al. (1998) and Horpibulsuk et al. (2009) ดังนั้นการหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของส่วนละเอียดในดินปนกรวดที่บดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์จึงสามารถทำได้ และเมื่อทราบความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของส่วนละเอียดแล้วจะสามารถคำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุด และความชื้นที่เหมาะสมของดินปนกรวดที่บดอัดตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ได้จากสมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

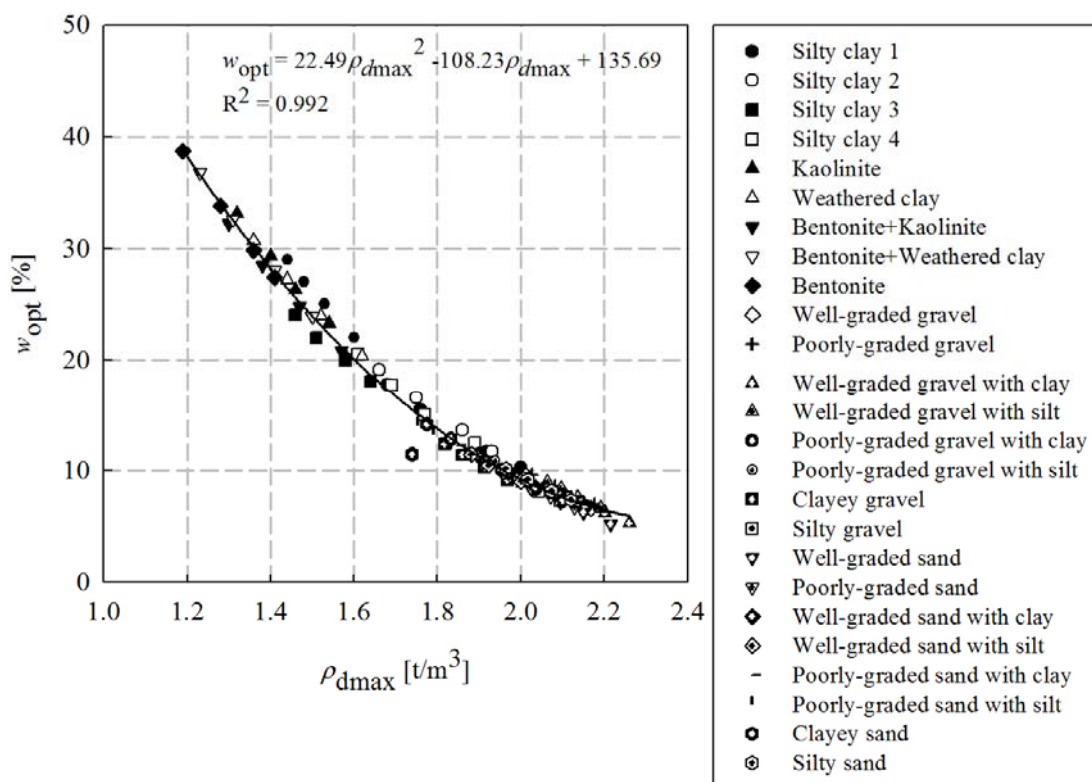
$$\rho_{d \max} = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho'_{d \max}} + \frac{P_g}{2.65}} \quad (4.4)$$

$$w_{\text{opt}} = \frac{w'_{\text{opt}}}{\left(1 + \frac{P_g}{P_f}\right)} \quad (4.5)$$

โดยที่	$\rho_{d \max}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัด
	$w_{\text{opt}}$	คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัด
	$\rho'_{d \max}$	คือ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวด
	$w'_{\text{opt}}$	คือ ความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวด
	$P_g$	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
	$P_f$	คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของส่วนละเอียดต่อน้ำหนักดินทั้งหมด
	2.65	คือ ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกรวด

#### 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดและคุณลักษณะการบดอัดของดิน

จากการรวบรวมผลทดสอบการบดอัดดินจากบทความวิจัยของ Horpibulsuk et al. (2009) พบว่าสามารถสร้างสมการการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมได้ที่ค่า  $R^2$  สูงถึง 0.992 ดังแสดงในรูปที่ 4.25



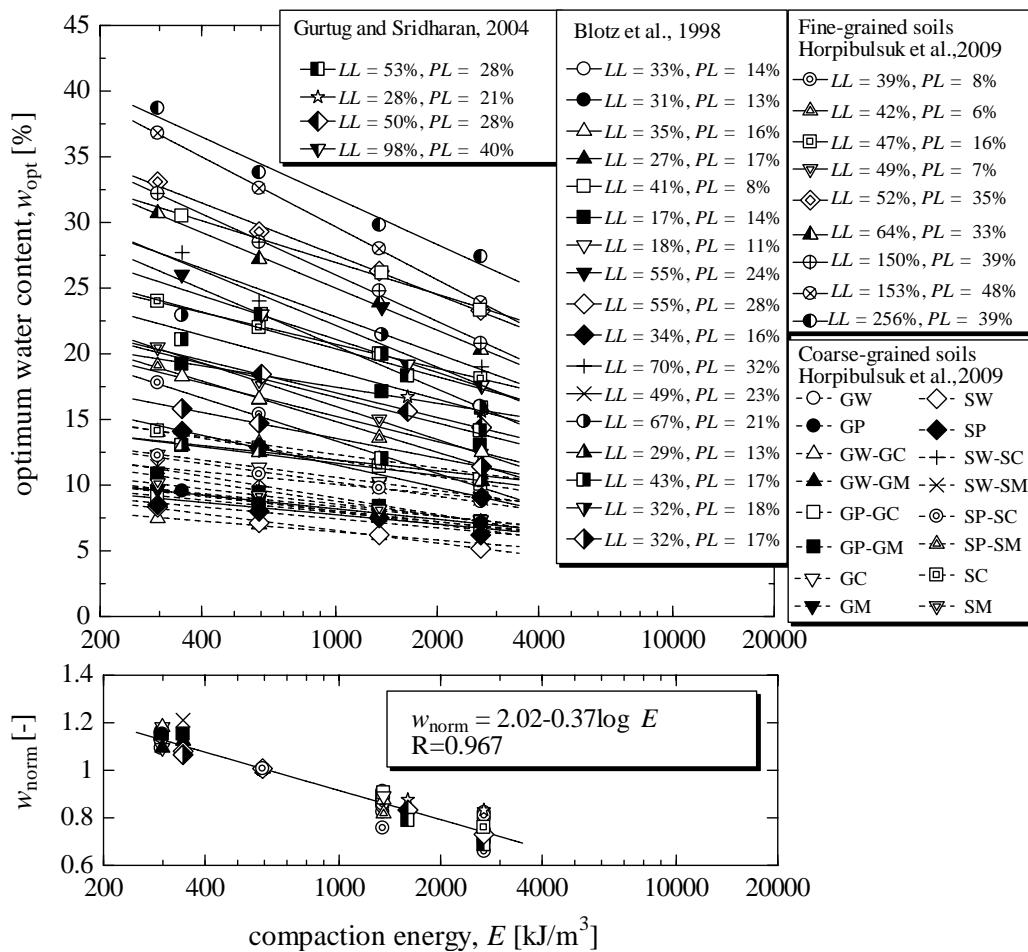
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\rho_{d\max}$  กับ  $w_{\text{opt}}$

นอกจากนี้ Horpibulsuk et al. (2009) ได้รวบรวมผลทดสอบการบดอัดดิน 25 ประเภท สำหรับความชื้นที่เหมาะสม ในช่วงระดับพลังงานเท่ากับ  $296.3 \text{ kJ/m}^3$  ถึง  $2693.3 \text{ kJ/m}^3$  ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และทำการวิเคราะห์ความถดถอยได้ดังสมการที่ 4.6

$$w'_{\text{opt,norm}} = \frac{w_{\text{opt}}}{w_{\text{opt,st}}} = 2.02 - 0.37 \log E \quad (4.6)$$

โดยที่  $w'_{\text{opt,norm}}$  คือ ความชื้นที่เหมาะสมปกติ (Normalized optimum water content)  
 $w'_{\text{opt}}$  คือ ความชื้นที่เหมาะสมที่ระดับพลังงานใด ๆ  
 $w'_{\text{opt,st}}$  คือ เป็นความชื้นที่เหมาะสมที่ระดับพลังงาน  $592.5 \text{ kJ/m}^3$

จากรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 จะพบว่าหากทราบพลังงานที่เม็ดดินได้รับในการบดอัดดิน และความชื้นที่เหมาะสมที่ระดับพลังงาน  $592.5 \text{ kJ/m}^3$  จะสามารถประมาณคุณลักษณะการบดอัดของเม็ดดินที่ระดับพลังงานนั้นๆได้

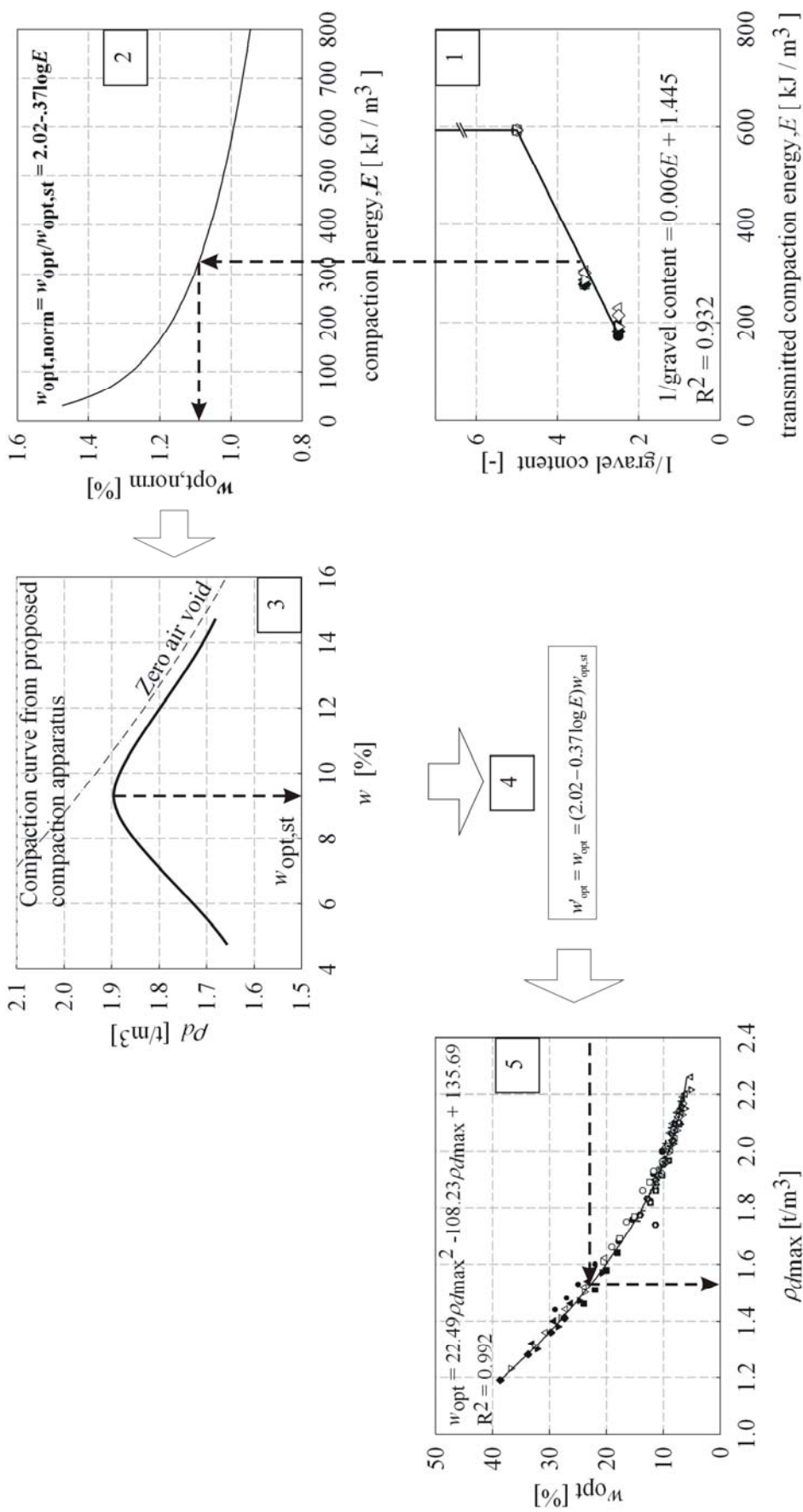


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการบดอัดกับ  $w_{opt}$  (Horpibulsuk et al., 2009)

#### 4.7 การประมาณคุณลักษณะการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ของดินปนกรวด

รูปที่ 4.27 แสดงแผนภาพการประมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเม็ดดินในดินปนกรวดที่ได้รับการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- (ก) แยกกรวดออกจากดินปนกรวด พร้อมทั้งหาสัดส่วนกรวดที่ผสมในดิน
- (ข) นำดินที่คัดกรวดไปหาทดสอบการบดอัดโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กเพื่อสร้างเส้นโค้งการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์
- (ค) จากปริมาณกรวดที่ผสมในดินปนกรวด อ่านค่าพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดจากรูปที่ 4.12
- (ง) จากพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดสู่ส่วนละเอียดที่อ่านได้ นำไปคำนวณความชื้นที่เหมาะสมปกติจากรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.27 แผนภาพการประมาณความสัมพันธ์ที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด

ของส่วนละเอียดในดินปนกรวด

(จ) คำนวณความชื้นที่เหมาะสมของส่วนละเอียด จากความชื้นที่เหมาะสมปกติที่คำนวณได้จากสมการ 4.6 ในข้อ (ง) และความชื้นที่เหมาะสมที่อ่านได้จากเส้นโค้งการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ ที่ได้จาก (ข)

(ฉ) จากความชื้นที่เหมาะสมที่คำนวณได้จากข้อ (จ) นำไปอ่านความหนาแน่นแห้งสูงสุดของส่วนละเอียดจากรูปที่ 4.25

เมื่อได้ความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของส่วนละเอียดแล้ว จะสามารถคำนวณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินปนกรวดที่ได้รับการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ได้จากสมการที่ 4.4 และสมการที่ 4.5 ตามลำดับ

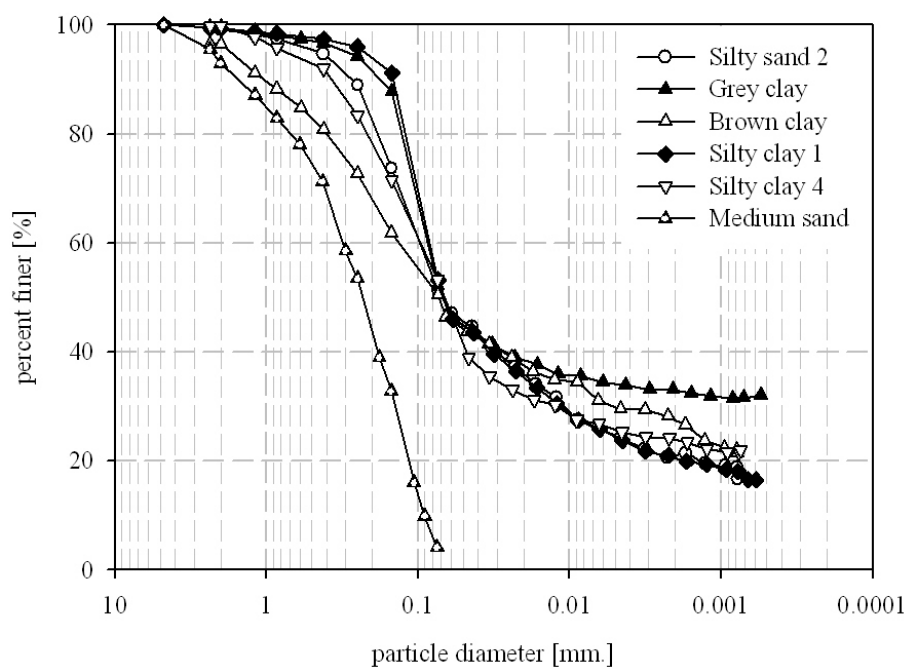
#### 4.8 เปรียบเทียบผลการประมาณคุณลักษณะของดินปนกรวด

เพื่อยืนยันการนำแผนภาพในรูปที่ 4.27 ไปใช้ในการประมาณคุณลักษณะการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ของดินปนกรวด จึงทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ กับดินทั้งสิ้น 6 ประเภทได้แก่ (1) Silty clay 1 (2) Silty sand 2 (3) Medium sand (4) Grey clay (5) Brown clay และ (6) Silty clay 4 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ และดัชนีดังตารางที่ 4.3 และมีการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงดังรูปที่ 4.28 ซึ่งดินแต่ละประเภทจะนำมาผสมกรวดให้มีปริมาณกรวดระหว่าง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยกรวดที่ใช้ผสมจะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างกรวดขนาดเล็กและกรวดขนาดใหญ่ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แล้วทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ ผลการประมาณคุณลักษณะการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ที่เสนอให้ผลเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง เมื่อเทียบกับผลทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ โดยค่า  $\rho_{d \max}$  และค่า  $w_{\text{opt}}$  ที่ได้จากการประมาณจะมีค่าสูงกว่าค่า  $w_{\text{opt}}$  ที่ได้จากการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวด จะขึ้นอยู่กับค่า  $w'_{\text{opt}}$  และ  $\rho'_{d \max}$  ที่ได้จากการประมาณจากขั้นตอนการประมาณดังรูปที่ 4.27 โดยจะนำค่า  $w'_{\text{opt}}$  และ  $\rho'_{d \max}$  ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่า  $w_{\text{opt}}$  และ  $\rho_{d \max}$  ซึ่งความคลาดเคลื่อนจะเกิดขึ้นจากขั้นตอนการประมาณค่า  $w'_{\text{opt}}$  และ  $\rho'_{d \max}$  และความคลาดเคลื่อนจะสะสม จะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $w_{\text{opt}}$  ที่ได้จากการประมาณกับค่า  $w_{\text{opt}}$  ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.27 จะมีความเบี่ยงเบนจากเส้น 1:1 น้อยกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\rho_{d \max}$  ที่ได้จากการประมาณกับค่า  $\rho_{d \max}$  ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานพลีออคเตอร์ เนื่องจากในขั้นตอนการประมาณจะได้ค่า  $w_{\text{opt}}$  ก่อนแล้วจึงนำค่า  $w'_{\text{opt}}$  ไปทำการประมาณค่า  $\rho'_{d \max}$  ดังนั้นในการประมาณค่า  $\rho_{d \max}$  จึงมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการประมาณกับค่า  $w_{\text{opt}}$



ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

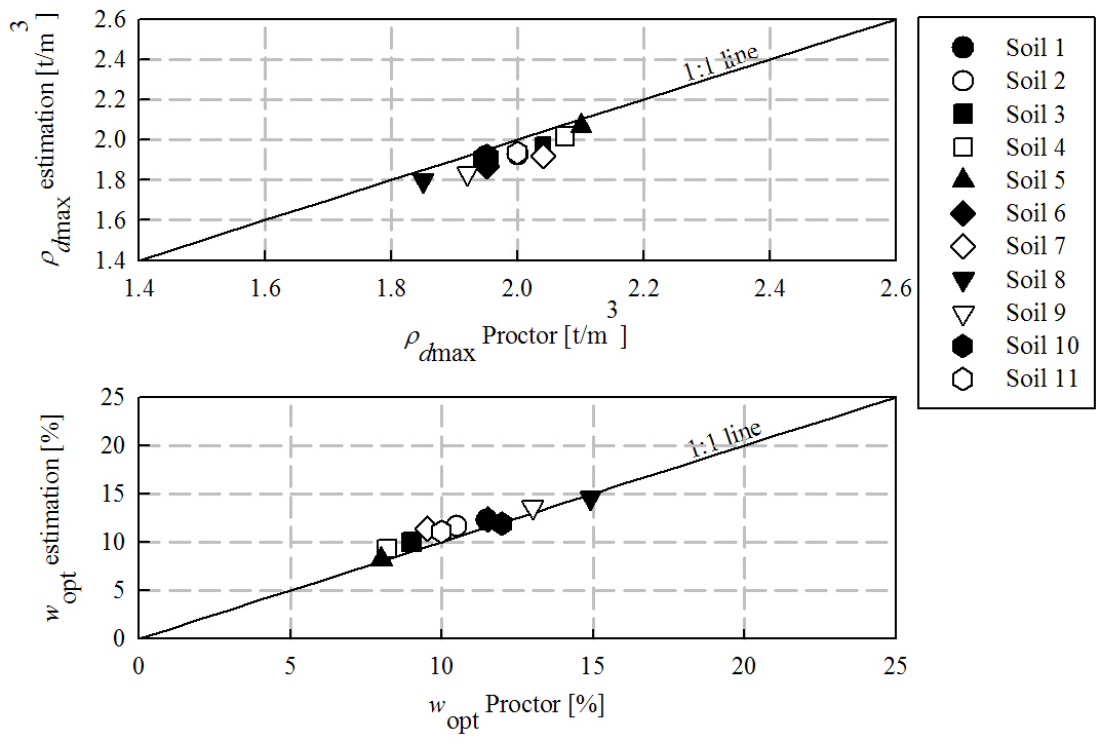
Soil type	$LL$ [%]	$PL$ [%]	$PI$ [%]	$G_s$	Group symbol
Silty clay 1	28.7	19.4	9.3	2.72	CL
Silty sand 2	NP	NP	NP	2.69	SM
Medium sand	NP	NP	NP	2.72	SP
Grey clay	68.8	19.4	49.4	2.72	CH
Brown clay	61.6	18.7	42.9	2.74	CH
Silty clay 4	41.4	20	21.4	2.64	CL



รูปที่ 4.28 การกระจายขนาดของดินที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างดินและกรวดที่ใช้ทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพลีอกเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณ

Sample	Raw soil	Gravel mix.		Gravel content [%]
		Small [%]	Large [%]	
Soil 1	Silty clay 1	-	30	30
Soil 2	Silty clay 1	-	30	40
Soil 3	Silty sand 2	-	30	30
Soil 4	Silty sand 2	-	30	40
Soil 5	Medium sand	-	35	35
Soil 6	Grey clay	9	21	30
Soil 7	Grey clay	12	28	40
Soil 8	Brown clay	15	15	30
Soil 9	Brown clay	20	20	40
Soil 10	Silty clay 4	12	18	30
Soil 11	Silty clay 4	16	24	40



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบคุณลักษณะการบดอัดจากการประมาณและผลการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัด และนำไปใช้ในการพัฒนาชุดทดสอบบดอัดขนาดเล็ก และการศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด เพื่อใช้ในการเสนอวิธีการประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวดโดยชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.1.1 การศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัดและการพัฒนา

###### ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็ก

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของชุดทดสอบการบดอัดดินเช่น จำนวนของชั้นบดอัด น้ำหนักค้อน ระยะตกของค้อน และ Diameter ratio;  $DR$  ไม่มีผลต่อผลการทดสอบบดอัด ยกเว้นการบดอัดดินโดยใช้ชุดทดสอบการบดอัดดินที่  $DR$  เท่ากับ 1 จะทำให้ประสิทธิภาพการบดอัดสูงขึ้น และจากการศึกษาอิทธิพลเนื่องจากขนาดของแบบบดอัด สามารถเสนอชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็ก ซึ่งให้ผลทดสอบการบดอัดดินใกล้เคียงกับผลทดสอบการบดอัดดินตามมาตรฐานพล็อกเตอร์ โดยการทดสอบบดอัดดินด้วยชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กที่เสนอสามารถลดปริมาณดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบและจำนวนครั้งในการบดอัดได้ โดยใช้ปริมาณดินตัวอย่างเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม และจำนวนครั้งในการบดอัดเท่ากับ 14 ครั้งต่อชั้น ซึ่งลดลงจากการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ที่ใช้ปริมาณดินตัวอย่างเท่ากับ 4 กิโลกรัม และใช้จำนวนครั้งในการบดอัดเท่ากับ 25 ครั้งต่อชั้น สำหรับการทดสอบบดอัดดินในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 101.6 มิลลิเมตร(4 นิ้ว) อย่างไรก็ตามชุดทดสอบการบดอัดดินขนาดเล็กที่เสนอสามารถใช้ทดสอบบดอัดได้ดีกับดินที่มีขนาดเม็ดดินใหญ่สุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร

##### 5.1.2 การศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด และการถ่ายทอดพลังงาน

###### บดอัดไปสู่ดินเม็ดละเอียดในการทดสอบบดอัดดินปนกรวด

การบดอัดดินเมื่อมีปริมาณกรวดเพิ่มขึ้น ค่า  $\rho_{d\max}$  จะเพิ่มขึ้นและค่า  $w_{opt}$  จะลดลงในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ สามารถบดอัดได้ดีโดยไม่มีผลกระทบจากปริมาณกรวด เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ กรวดจะขัดขวางการบดอัด ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของกรวดต่อผลการทดสอบบดอัด พลังงานบดอัดสามารถถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดได้ดีในการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมอยู่ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณกรวด

เพิ่มขึ้นมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พลังงานที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดจะมีค่าลดลงตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบดอัดดินที่มีปริมาณกรวดผสมมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อกวดจะขัดกันทำให้ขีดขวางการเรียงตัวของเม็ดดินและกรวดยังดูดซับพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียด ทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าลดลงและความชื้นของดินบดอัดคัดกรวดมีค่าเพิ่มขึ้น

### 5.1.3 การประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวด

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานบดอัดที่ถ่ายทอดไปสู่ส่วนละเอียดกับปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำไปประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินปนกรวดได้ และพบว่าค่าที่ได้จากการประมาณมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการศึกษาจนสามารถประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวดที่ทดสอบบดอัดที่พลังงานแบบมาตรฐานพล็อกเตอร์ได้ แต่ยังไม่สามารถครอบคลุมการประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนกรวดที่พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานได้ งานวิจัยต่อไปควรศึกษาผลการทดสอบบดอัดที่พลังงานบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อให้สามารถทำการประมาณคุณลักษณะการบดอัดของดินปนที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพล็อกเตอร์ได้

## รายการอ้างอิง

- ASTM D 698-91,1995: **Test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort [12,400 ft-lb/ft<sup>3</sup>(600kN-m/m<sup>3</sup>)].** Annual Books of ASTM Standards, ASTM international, West Conshohcken, PA,Sec. 4, Vol. 04.08, pp. 69-76.
- ASTM D 1557-91,1995: **Test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort [56,400 ft-lb/ft<sup>3</sup>(2,700kN-m/m<sup>3</sup>)].** Annual Books of ASTM Standards, ASTM international, West Conshohcken, PA,Sec. 4, Vol. 04.08, pp. 118-125.
- Aiban, S. A. and Mohammed, O. E. H. (2002). **The effect of the CBR mold size and the maximum Aggregate size on the Load carrying capacity of base course materials.** The 6th Saudi Engineering Conference, KFUPM, Dhahran, December 2002, Vol. 3, pp. 397-410.
- Blotz, L. R., Benson, C. and Boutwell, G. (1998). **Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays.** Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 124, No. 9, pp. 907-912.
- Boutwell, G. (1961). **Effects of variation of fill construction on the material properties and the subsequent fill performance.** Independent Study Rep. School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Diaz-Zorita, M., Grove, J.H. and Perfect, E. (2001). **Laboratory compaction of soils using a small mold procedure.** Soil Science Society of American Journal, Vol. 65, No.6, pp. 1593-1598.
- Donaghe, R. T. and Townsend, F. C. (1976). **Scalping and replacement effect on the compaction characteristics of earth-rock mixtures.** Special Technical Publication No. 599, American Society for Testing and Materials, pp. 248-277.
- Donaghe, R.T. and Torrey, V.H. (1994). **A compaction test method for soil-rock mixtures in which equipment size effects are minimized.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 17, No. 3, pp. 363-370.
- Garga, V. K. and Madureira, C. J.(1985). **Compaction characteristics of river terrace gravel.** Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 8, pp. 987-1007.

- Hilf, J.W. (1956). **An Investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils.** Technical Memorandum 654, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Hogentogler, C.A. (1936). **Essentials of soil compaction.** Proceedings of the Highway Research Board. National Research Council, Washington D.C., pp. 309-316.
- Holz, W. G. and Lowitz, C. W. (1957). **Compaction characteristics of gravelly soils.** STP no. 232. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 70-83.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W. and Naramitkornburee, A. (2009). **Modified Ohio's Curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No. 1, pp. 1-12.
- Jones, C.W. (1954). **The Permeability and settlement of laboratory specimens of sand gravel mixtures.** Special Technical Publication No.163, American Society for Testing and materials, pp. 68-78.
- Olson, R. E. (1963). **Effective stress theory of soil compaction.** Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 89, No. SM2, pp. 27-45.
- Proctor, R. R. (1933). **The design and construction of rolled earth dams.** Engineering New Record III, August 31, September 7, 21, and 28.
- Shockley, W. G. (1948). **Correction of unit weight and moisture content for soils containing gravel sizes.** Technical Data Sheet No. 2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Sridharan, A. and Sivapullaiah, P. V. (2004). **Mini compaction test apparatus for fine grained soils.** Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No.3, pp. 240-246.
- Winter, M. G., Holmgeirsdttir, Th. and Suhardi. (1998). **The effect of large particles on acceptability for earthworks compaction.** Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 31, pp. 247-268.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกชัย ม่าน โคนสูง อนุชิต อุชายภิชาดิ และอวิรุทธิ ชินกุลกิจนิวัฒน์. 2552. **ชุดทดสอบการบดอัดขนาดเล็กสำหรับทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานพล็อตเตอร์**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 (The 14<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering), สุรสมันการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ. นครราชสีมา. 13-15 พฤษภาคม 2552 เล่มที่ 1 หน้า 201-206

A. Chinkulkijniwat, E. Maankooksung. 2008. **Influence of gravel content and compaction mold size on compaction characteristics of cohesionless soil**. Proceeding of the International Geotechnical Conference, Saint Petersburg, 16-19 June 2008, Vol. 2, pp. 371-375.

## ประวัติผู้เขียน

นายเอกชัย ม่านโลกสูง เกิดเมื่อวันที่ 27 เดือนกันยายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดนครราชสีมา บิดาชื่อนายกรณ์ ม่านโลกสูง มารดาชื่อนางสำรวย ศรีทะเล สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษา จากโรงเรียนบ้านหนองปรุ ตำบลหนองจะบก อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2537 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา ในปีการศึกษา 2540 หลังจากสำเร็จการศึกษามีความตั้งใจอยากเป็นช่างก่อสร้าง จึงได้ เข้าศึกษาต่อในสาขาช่างก่อสร้างที่วิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับ ประกาศนียบัตรระดับวิชาชีพสาขาวิชาช่างก่อสร้าง ในปีการศึกษา 2543 และประกาศนียบัตรระดับ วิชาชีพชั้นสูงสาขาวิชาช่างก่อสร้าง ในปีการศึกษา 2545 หลังจากสำเร็จการศึกษาต้องการเพิ่มพูน ความรู้ให้กับตนเองและต้องการเป็นวิศวกรที่มีคุณภาพ จึงเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี ที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล สำเร็จการศึกษาในปี การศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2549