ผลของการบดอัดซ้ำที่มีต่อการบดอัดดินลูกรังและหินคลุกในห้องปฏิบัติการ

Effect of Recompaction on Compaction of Lateritic Soils and Crushed Rocks in Laboratory

วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต เมืองเอก ปทุมธานี 12000
wisit@rangsit.rsu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบการบดอัดหินคลุกและดินลูกรัง 2 กลุ่มตัวอย่างคือ (ก) กลุ่มที่บดอัดโดยเปลี่ยนตัวอย่างดินใหม่ทุกตัวอย่างดินทดสอบ (ไม่บดอัดซ้ำ) และ (ข) กลุ่มที่บดอัดโดยใช้ตัวอย่างดินเดิมทดสอบ (บดอัดซ้ำ) โดยใช้มาตรฐานในการบดอัด 2 มาตรฐานคือ Standard Proctor Test และ Modified Proctor Test โดยผลการศึกษาพบว่า กรณีของดินลูกรัง กลุ่มดินที่ไม่บดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดต่ำกว่ากลุ่มดินบดอัดซ้ำ 1.6-3.4% อาจจะเนื่องด้วยการบดอัดซ้ำจะทำให้เม็ดดินลูกรังเกิดการแตก และเม็ดดินขนาดเล็กมีโอกาสเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ทำให้ดินมีช่องว่างน้อยลง จึงมีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่หินคลุก เม็ดดินมีความแข็ง จึงเกิดการแตกได้ยาก ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในกรณีกรณีบดอัดซ้ำและกรณีไม่บดอัดซ้ำ

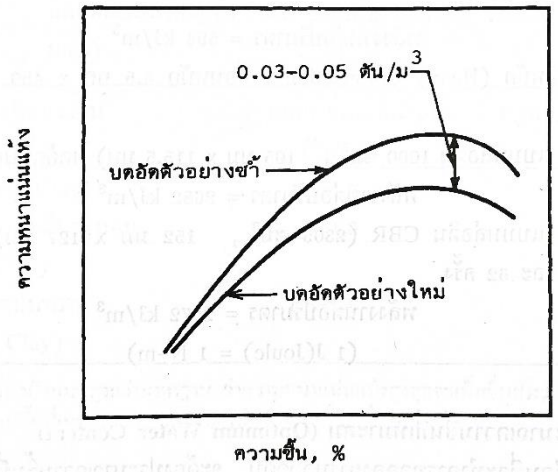
Abstract

This article presents testing results on compaction test of lateritic soils and crushed rocks in 2 groups of samples including (a) Non-recompacted sample group and (b) Recompacted sample group. Standard testing methods (Standard Proctor Test and Modified Proctor Test) were used. The results showed that in the case of lateritic soils, the maximum dry densities in non-recompacted samples were lower than that in recompacted samples about 1.6-3.4% because of crushing of material grains during the compaction processes. While in the case of crushed rocks, because of the harder of material grains, the maximum dry densities were almost identical in both non-recompacted samples and recompacted samples.

1. บทนำ

ดินลูกรังและหินคลุกเป็นวัสดุที่นิยมในการนำมาใช้ในงานก่อสร้างถนน โดยจะนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทาง (Base) และรองพื้นทาง (Subbase) ซึ่งการที่จะนำดินลูกรังและหินคลุกมาใช้ในงานวิศวกรรมนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของดินลูกรังและหินคลุกให้มีความเหมาะสมในการใช้งานเสียก่อน การบดอัดเป็นหนึ่งในขบวนการปรับปรุงคุณสมบัติดินลูกรังและหินคลุก ทำให้ดินแน่นขึ้นด้วยวิธีทางกล โดยความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่ผสมในดิน และพลังงานการบดอัด

การบดอัดในห้องปฏิบัติการที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เป็นการบดอัดแบบพลศาสตร์ (Dynamic compaction) โดยใช้ค้อนปล่อยกระแทกดินในแบบหล่อ ตามจำนวนครั้งและจำนวนชั้นที่ต้องการ ซึ่งจะแบ่งเป็นการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) การดำเนินการจะทำโดยผสมน้ำลงในตัวอย่างดินแล้วบดอัด จากนั้นก็จะวัดค่าความหนาแน่นแห้งสำหรับตัวอย่าง ณ ปริมาณความชื้นนั้น ๆ แล้วก็จะผสมน้ำด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้น แล้วทำการบดอัดซ้ำกับตัวอย่างเดิม แล้วนำข้อมูลมาคำนวณเพื่อหาเส้นโค้งการบดอัดต่อไป ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในทางปฏิบัติ การบดอัดในห้องปฏิบัติการเป็นการใช้ตัวอย่างดินที่บดอัดซ้ำ (Recompacted Materials) อย่างไรก็ตาม จะสังเกตได้ว่า เครื่องจักรบดอัดดินก่อสร้าง ไม่มีเครื่องจักรใดที่มีวิธีการบดอัดเหมือนแบบการบดอัดแบบพลศาสตร์เหมือนในห้องปฏิบัติการ [9]



รูปที่ 1 ผลกระทบจากการบดอัดตัวอย่างซ้ำ [9]

จากการศึกษาของนพรัตน์ [7] ที่ทดสอบกับตัวอย่างดินลูกรัง (Lateritic soils) พบว่าดินที่ผ่านการบดอัดซ้ำจะมีการแตกของเม็ดดินซึ่งจะมีผลให้การกระจายของเม็ดดินเปลี่ยนไป

สถาพร [9] ได้กล่าวไว้ว่า การทดสอบการบดอัด จะใช้ตัวอย่างดินเดียวกันทำการบดอัดโดยเพิ่มความชื้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าความหนาแน่นลดลงจึงหยุดทดสอบ การบดอัดโดยใช้ตัวอย่างเดียวกันดังกล่าว เม็ดดินจะมีโอกาสแตกออกเล็กลงเมื่อถูกบดอัดจำนวนครั้งมากขึ้น โดยเฉพาะดินเม็ดใหญ่ ทำให้ผลค่าความหนาแน่นสูงกว่าความเป็นจริงดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ ยังได้แนะนำว่าสำหรับดินบางชนิด การทดสอบการบดอัดควรใช้ตัวอย่างใหม่ทุกครั้ง เช่น ดินลูกรัง หรือดินที่เกิดในที่จากการผุพังของหิน (Residual soil) ดินชนิดนี้เม็ดดินจะแตกง่ายเมื่อถูกบดอัด จึงต้องระมัดระวังเมื่อทำการบดอัด ควรใช้ตัวอย่างดินใหม่ทุกครั้ง

การวิจัยนี้ ต้องการศึกษาผลของกระบวนการบดอัดซ้ำที่มีต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่สำคัญ คือความหนาแน่นแห้งของดินลูกรัง (Lateritic soils) และหินคลุก (Crushed rocks) ซึ่งโดยพื้นฐานแล้ว หินคลุกเป็นวัสดุที่มีการแตกของเม็ดดินน้อยกว่าเมื่อเทียบดินลูกรัง โดยการทดสอบ จะทำการเปรียบเทียบผลการบดอัดซ้ำ และการไม่อัดซ้ำ ที่ได้จากการทดสอบดินทั้งสองประเภท โดยจากผลการทดสอบที่ได้ จะทำให้ทราบว่าการบดอัดซ้ำมีผลต่อความหนาแน่นแห้งมากกว่าหรือน้อยกว่าการไม่บดอัดซ้ำเพียงใด ซึ่งน่าจะมีประโยชน์สำหรับวิศวกรในการใช้เป็นข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจ ในการควบคุมงานเพื่อการบดอัดดินเพื่อการก่อสร้างในงานวิศวกรรมปฐพีต่อไป

2. ทฤษฎีการบดอัดดิน

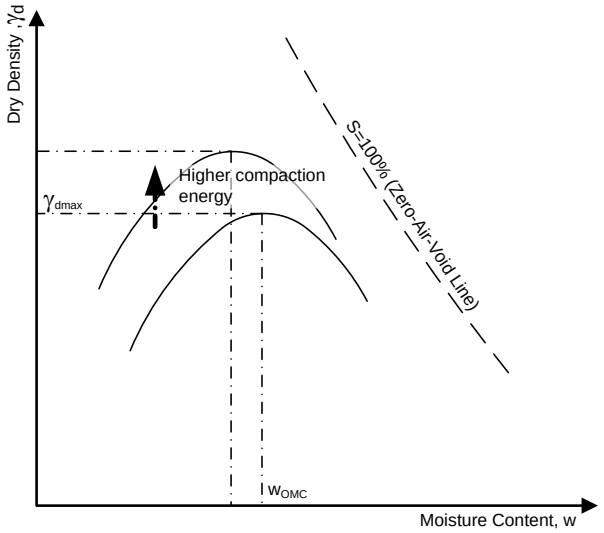
การบดอัดดินเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของดินโดยการใช้พลังงานกล ทำให้เม็ดดินมีการจัดเรียงตัวใหม่ ในสภาพที่แน่นขึ้น ทำให้คุณสมบัติของดินดีขึ้นเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างถนน เขื่อน หรือรันเวย์สนามบิน เป็นต้น การบดอัดดินจะเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ลดการทรุดตัว และลดการซึมน้ำของชั้นดิน

2.1 เส้นกราฟการบดอัดดิน (Compaction curve)

การบดอัดดินเพื่อให้ดินมีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมที่ดีขึ้น จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นแห้งหรือหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน ดินที่มีความหนาแน่นแห้งที่สูงขึ้นก็จะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้น โดยปกติการบดอัดดินจะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดิน พลังงานในการบดอัด ลักษณะและชนิดของดิน การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน หรือพลังงานในการบดอัดก็จะมีผลเปลี่ยนแปลงต่อความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด

จากข้อมูลการบดอัด ถ้านำข้อมูลปริมาณน้ำในมวลดินมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับข้อมูลของความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเรียกเส้นกราฟในรูปว่า เส้นกราฟการบดอัดดิน (Compaction curve)

จากกราฟการบดอัดดินในรูปที่ 1 จะพบว่าความหนาแน่นแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนถึงจุดที่ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, γ_{dmax}) และเรียกปริมาณน้ำ ณ จุดนี้ว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, w_{OMC}) และเมื่อปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้กลับจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และความหนาแน่นแห้งในการบดอัดดิน [6]

ในทางทฤษฎีแล้ว [3] การบดอัดดินในสภาพที่ดีที่สุดคือ จุดที่ดินมีปริมาณความชื้นเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งที่จุดนี้ดินจะอยู่ในสภาพที่แน่นที่สุด แต่การบดอัดให้ได้ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกล (Mechanical energy) ที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนทำให้ดินเข้าใกล้สภาวะไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids) จากรูปที่ 1 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดจะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะขยับตัวมาทางด้านบนซ้ายของเส้นกราฟเดิมโดยความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะมีค่าลดลง โดยเส้นโค้งการบดอัดดินจะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตัด

และอยู่ต่ำกว่าเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids line) เสมอ

วิธีการบดอัดดินที่นิยมใช้กันทั่วไปมี 2 วิธีคือ Standard proctor test และ Modified proctor test โดยพลังงานที่ใช้ในการบดอัดโดยวิธี Modified proctor จะสูงกว่าพลังงานที่ใช้ในการบดอัดโดยวิธี Standard proctor ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบและพลังงานบดอัดดินตามมาตรฐาน ASTM D 698-78, ASTM D 1557-78

วิธี	ขนาดของแบบ (Mold)	น้ำหนักของ Hammer (lb)	จำนวนชั้นในการบดอัด	ระยะตกกระทบของ Hammer (ft)	จำนวนครั้งของการบดอัดต่อชั้น	พลังงานต่อปริมาตร (ft-lb/ft^3)
Standard Proctor	∅ 4.0"x4.6"	5.5	3	1	25	12400
	∅ 6.0"x5.0"	5.5	3	1	56	12400
Modified Proctor	∅ 4.0"x4.6"	10	5	1.5	25	56300
	∅ 6.0"x5.0"	10	5	1.5	56	56300

2.2 พลังงานของการบดอัด

พลังงานการบดอัด (Compaction energy,E) ต่อปริมาตร 1 หน่วย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E = \frac{NB \times NL \times W \times H}{V_m} \qquad (1)$$

โดยที่

NB = จำนวนการตกกระทบของค้อนใน 1 ชั้น (Number of blows per layer)

NL = จำนวนชั้นของการบดอัด (Number of layers)

W = น้ำหนักของค้อน (Weight of hammer)

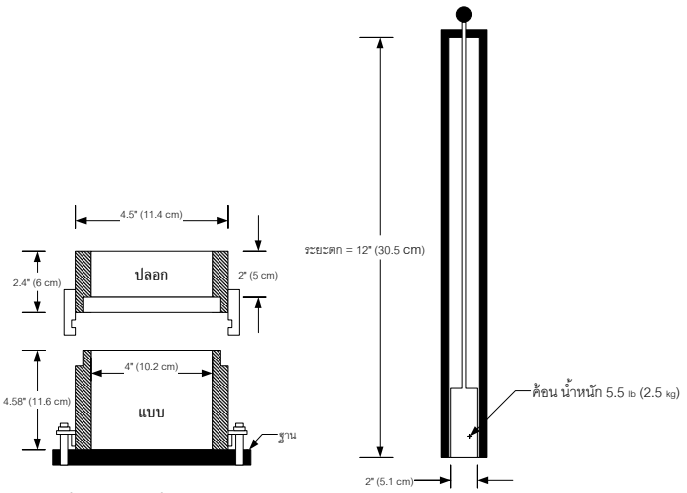
H = ระยะตกกระทบของค้อน (Height of drop of hammer)

V_m = ปริมาตรของแบบ (Volume of mold)

ดังนั้น พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย ในแบบขนาด 4 นิ้ว สำหรับการบดอัดแบบมาตรฐาน (E_{st}) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (E_{mod}) สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (2) และสมการที่ (3)

$$E_{st} = \frac{25x3x5.5x1}{1/30} = 12{,}375\,ft-lb/ft^3 \qquad (2)$$

$$E_{mod} = \frac{25x5x10x1.5}{1/30} = 56{,}250\,ft-lb/ft^3 \qquad (3)$$



รูปที่ 2 ชุดเครื่องมือการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) ในห้องปฏิบัติการ [8]

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Proctor [5] ได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบบดอัดดิน โดยกำหนดวิธีการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นแห้งของดินบดอัด ซึ่งในเวลานั้นใช้ในการควบคุมการก่อสร้างเขื่อนดินในแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา การทดสอบของ Proctor ได้รับการยอมรับและใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปในเวลาต่อมา

นพรัตน์ [7] ได้ทำการศึกษาผลของการบดอัดซ้ำที่มีผลต่อดินลูกรังโดยทำการเก็บตัวอย่างดินลูกรังมาจากบ่อลูกรังบริเวณอำเภอสนามชัย เขตจังหวัดฉะเชิงเทรา จากนั้นทำการเตรียมตัวอย่างดินลูกรังเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่ม SP, GP, SC, และ GC ตามการจำแนกดินในระบบ Unified Soil Classification

System จากการศึกษาพบว่าตัวอย่างดินที่ผ่านการบดอัดซ้ำจะมีการแตกของเม็ดดินซึ่งส่งผลทำให้การกระจายของเม็ดดินเปลี่ยนไป ค่าพิกัดเหลวมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย ค่าพิกัดพลาสติกมีแนวโน้มที่จะคงที่ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นในตัวอย่างดินกลุ่ม SP และ GP และต่ำลงในกลุ่ม SC และ GC ค่า C.B.R. สูงขึ้นในตัวอย่างดินกลุ่ม SP, GP และ SC และต่ำลงในกลุ่ม GC และค่าความซึมน้ำมีแนวโน้มต่ำลงในทุกกลุ่มดิน

John et al. [4] กล่าวไว้ว่า ที่ปริมาณความชื้นหนึ่ง การบดอัดโดยใช้วัสดุซ้ำ ทำให้ได้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยดินเม็ดละเอียดจะจับตัวเป็นก้อน ในขณะที่ดินเม็ดวัสดุหยาบมีโอกาสแตกออกในระหว่างการบดอัด การใช้วัสดุที่บดอัดซ้ำมีผลต่อรูปร่างของเส้นกราฟบดอัด และจะมีผลต่อการแปลผลค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสอดคล้องความเห็นที่ให้ไว้โดยสถาพร [9]

3. วิธีการศึกษา

มีขั้นตอนในการดำเนินการ ดังนี้

ก. แหล่งที่มาของดินลูกรังและหินคลุกที่นำมาทดสอบ

- ดินลูกรังที่นำมาทดสอบมาจาก บ่อลูกรังจาก ต.พุแค อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี
- หินคลุกที่นำมาทดสอบมาจาก โรงโม่หิน ต.พุแค อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี

ข. การเก็บตัวอย่างดินลูกรังและหินคลุกอย่างละประมาณ 200 กก.

ค. เตรียมตัวอย่างดิน

- นำดินลูกรังและหินคลุกมาทำให้แห้งด้วยการผึ่งให้แห้งหรือใช้ตู้อบ
- คัดขนาดวัสดุโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8” อาจใช้กับดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4 มากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ และดินที่ข้างบนตระแกรง 3/8” น้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ (ใช้ตัวอย่างดินประมาณ 4 กก. ในการทดสอบ)

ง. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

- ทำการทดสอบวิธีบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยใช้ขนาด แบบ (MOLD) 4 นิ้วและเพิ่มปริมาณน้ำครั้งละ 2 เปอร์เซ็นต์
- ทำการทดสอบวิธีบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) โดยใช้ขนาดแบบ (MOLD) 4 นิ้วและเพิ่มปริมาณน้ำครั้งละ 2 เปอร์เซ็นต์
- การทดสอบตัวอย่างแต่ละชนิดจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่บดอัดซ้ำกับกลุ่มที่บดอัดตัวอย่างใหม่ทุกครั้งในแต่ละความชื้น

จ. ทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

4. ผลการศึกษา

ตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังตามมาตรฐาน Standard Proctor และมาตรฐาน Modified Proctor ส่วนตารางที่ 4 และตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบการบดอัดหินคลุกตามมาตรฐาน Standard Proctor และมาตรฐาน Modified Proctor ทั้งในกรณีที่บดอัดซ้ำ และกรณีไม่บดอัดซ้ำ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบบดอัดดินลูกรังตามมาตรฐาน Standard Proctor Test

การบดอัด	ตัวอย่างที่	ข้อมูล	#1	#2	#3	#4	#5
บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	10.84	12.62	14.24	16.44	18.71
		Dry Density (g/cm^3)	1.72	1.78	1.82	1.76	1.69
	2	Water Content (%)	9.23	10.25	13.39	15.21	17.43
		Dry Density (g/cm^3)	1.75	1.81	1.80	1.74	1.67
	3	Water Content (%)	11.46	13.99	15.40	17.56	19.44
		Dry Density (g/cm^3)	1.74	1.77	1.80	1.76	1.69
ไม่บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	10.30	11.80	13.91	15.59	18.46
		Dry Density (g/cm^3)	1.73	1.73	1.77	1.73	1.65
	2	Water Content (%)	10.46	12.51	14.32	16.63	18.04
		Dry Density (g/cm^3)	1.70	1.75	1.77	1.71	1.66
	3	Water Content (%)	10.56	12.41	15.17	16.31	18.08
		Dry Density (g/cm^3)	1.70	1.74	1.75	1.73	1.67

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบบดอัดดินลูกรังตามมาตรฐาน Modified Proctor Test

การบดอัด	ตัวอย่างที่	ข้อมูล	#1	#2	#3	#4	#5
บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	9.09	10.31	11.74	14.08	15.76
		Dry Density (g/cm^3)	1.76	1.85	1.89	1.82	1.77
	2	Water Content (%)	8.32	8.61	10.95	12.06	14.30
		Dry Density (g/cm^3)	1.76	1.86	1.88	1.84	1.77
	3	Water Content (%)	9.19	11.38	12.87	14.94	16.26
		Dry Density (g/cm^3)	1.77	1.87	1.89	1.83	1.76
ไม่บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	8.79	10.70	11.34	13.89	15.75
		Dry Density (g/cm^3)	1.79	1.84	1.87	1.80	1.73
	2	Water Content (%)	9.61	10.08	12.47	13.58	15.29
		Dry Density (g/cm^3)	1.77	1.88	1.84	1.80	1.75
	3	Water Content (%)	8.42	10.90	12.68	14.44	16.14
		Dry Density (g/cm^3)	1.78	1.84	1.85	1.80	1.69

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบบดอัดหินคลุกตามมาตรฐาน Standard Proctor Test

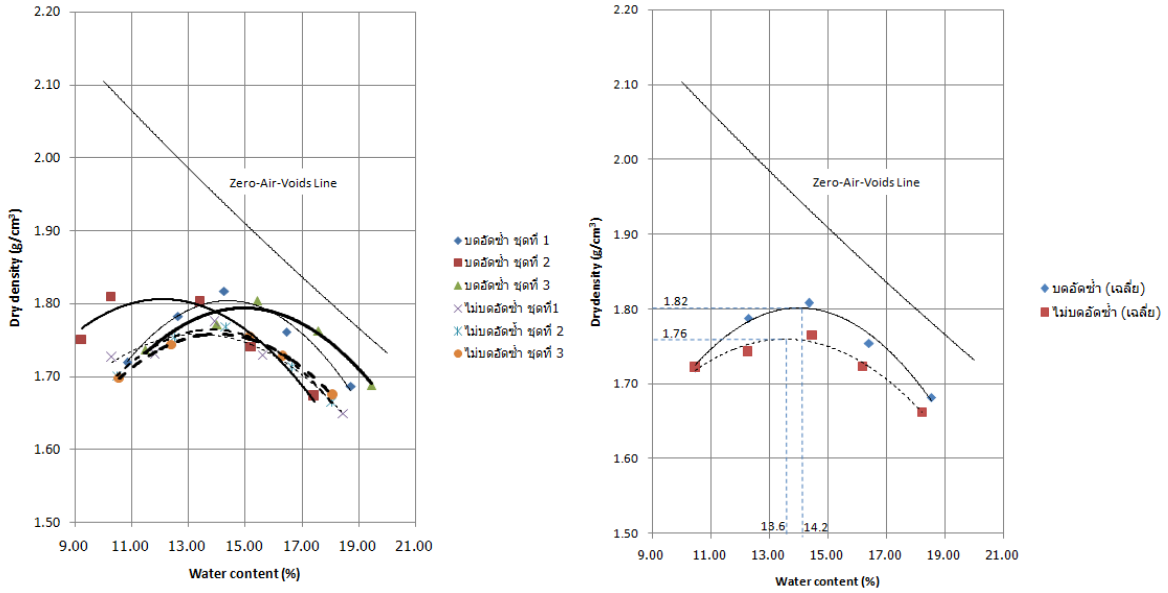
การบดอัด	ตัวอย่างที่	ข้อมูล	#1	#2	#3	#4
บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	6.29	8.05	9.47	10.94
		Dry Density (g/cm^3)	2.04	2.11	2.14	2.09
	2	Water Content (%)	5.97	7.78	9.43	10.44
		Dry Density (g/cm^3)	2.10	2.15	2.16	2.11
	3	Water Content (%)	6.15	7.90	9.45	10.71
		Dry Density (g/cm^3)	2.06	2.14	2.16	2.11
ไม่บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	6.36	7.83	10.05	10.50
		Dry Density (g/cm^3)	2.05	2.13	2.12	2.08
	2	Water Content (%)	6.48	7.54	9.37	11.59
		Dry Density (g/cm^3)	2.09	2.15	2.13	2.06
	3	Water Content (%)	6.43	8.56	9.41	10.37
		Dry Density (g/cm^3)	2.07	2.14	2.14	2.10

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบบดอัดหินคลุกตามมาตรฐาน Modified Proctor Test

การบดอัด	ตัวอย่างที่	ข้อมูล	#1	#2	#3	#4
บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	4.67	6.35	8.27	9.88
		Dry Density (g/cm^3)	2.09	2.20	2.19	2.15
	2	Water Content (%)	4.85	5.97	7.87	9.48
		Dry Density (g/cm^3)	2.13	2.20	2.17	2.13
	3	Water Content (%)	4.44	6.77	8.59	10.34
		Dry Density (g/cm^3)	2.06	2.20	2.21	2.16
ไม่บดอัดซ้ำ	1	Water Content (%)	4.22	5.77	8.12	9.49
		Dry Density (g/cm^3)	2.15	2.22	2.22	2.19
	2	Water Content (%)	4.46	6.44	7.92	9.96
		Dry Density (g/cm^3)	2.14	2.17	2.20	2.13
	3	Water Content (%)	4.56	6.74	7.79	9.37
		Dry Density (g/cm^3)	2.14	2.23	2.18	2.11

4.1 การทดสอบบดอัดดินลูกรัง มาตรฐาน Standard Proctor Test

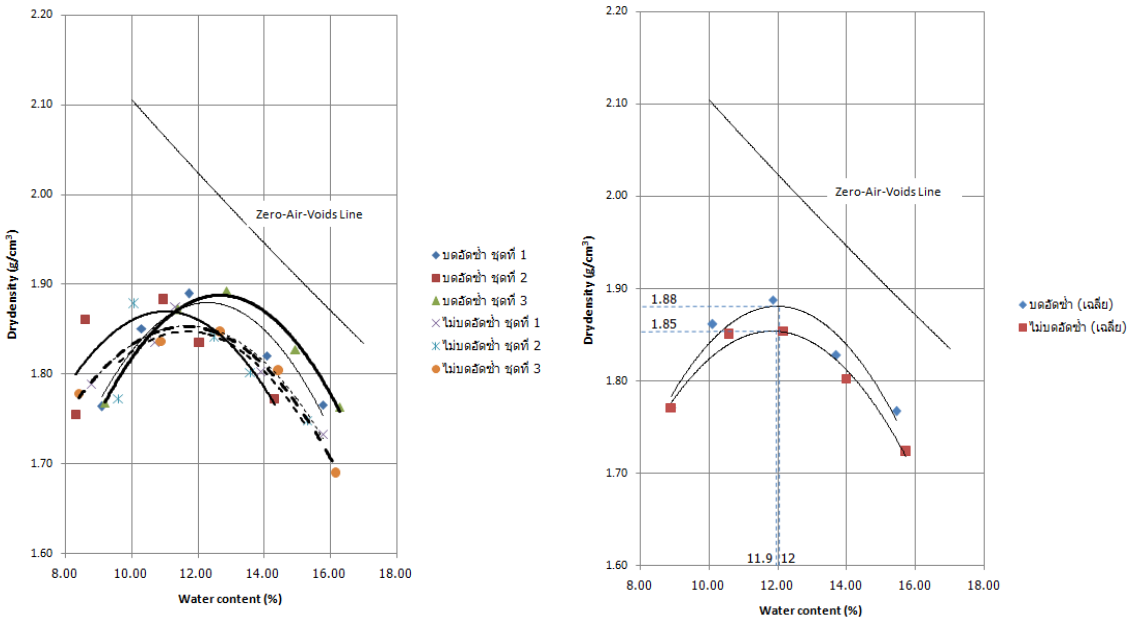
จากการทดสอบบดอัดมาตรฐาน Standard Proctor Test ของดินลูกรัง การบดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.82 g/cm^3 และมีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 14.2% ในขณะที่การไม่บดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.76 g/cm^3 ที่ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 13.6% โดยการไม่บดอัดซ้ำมีค่าความหนาแน่นสูงสุดต่ำกว่าการบดอัดซ้ำ 3.41%



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของการทดสอบการบดอัดของดินลูกรังตามมาตรฐาน Standard Proctor Test

4.2 การทดสอบบดอัดดินลูกรัง มาตรฐาน Modified Proctor Test

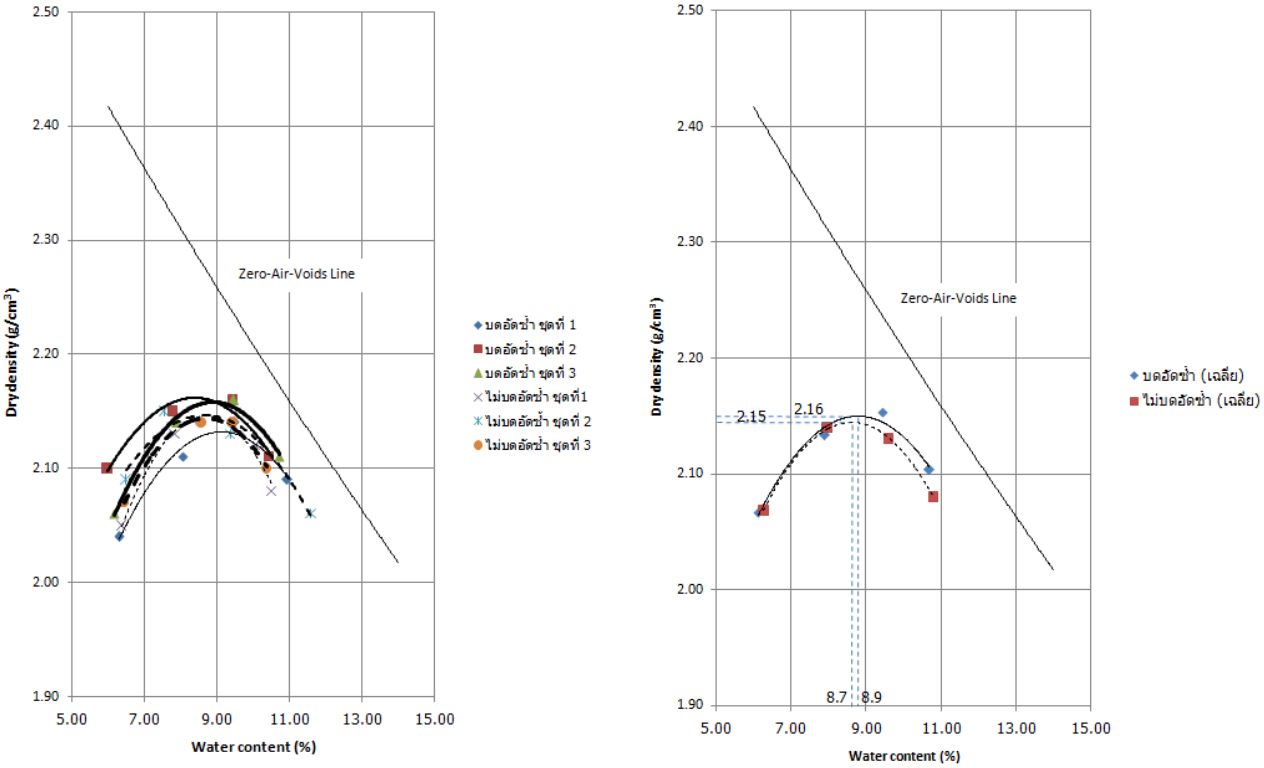
จากการทดสอบบดอัดมาตรฐาน Modified Proctor Test ของดินลูกรัง การบดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.88 g/cm^3 โดยมีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 12% และการไม่บดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.85 g/cm^3 และมีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 11.9% โดยการไม่บดอัดซ้ำมีค่าความหนาแน่นสูงสุดต่ำกว่าการบดอัดซ้ำ 1.62%



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของการทดสอบการบดอัดของดินลูกรังตามมาตรฐาน Modified Proctor Test

4.3 การทดสอบบดอัดหินคลุก มาตรฐาน Standard Proctor Test

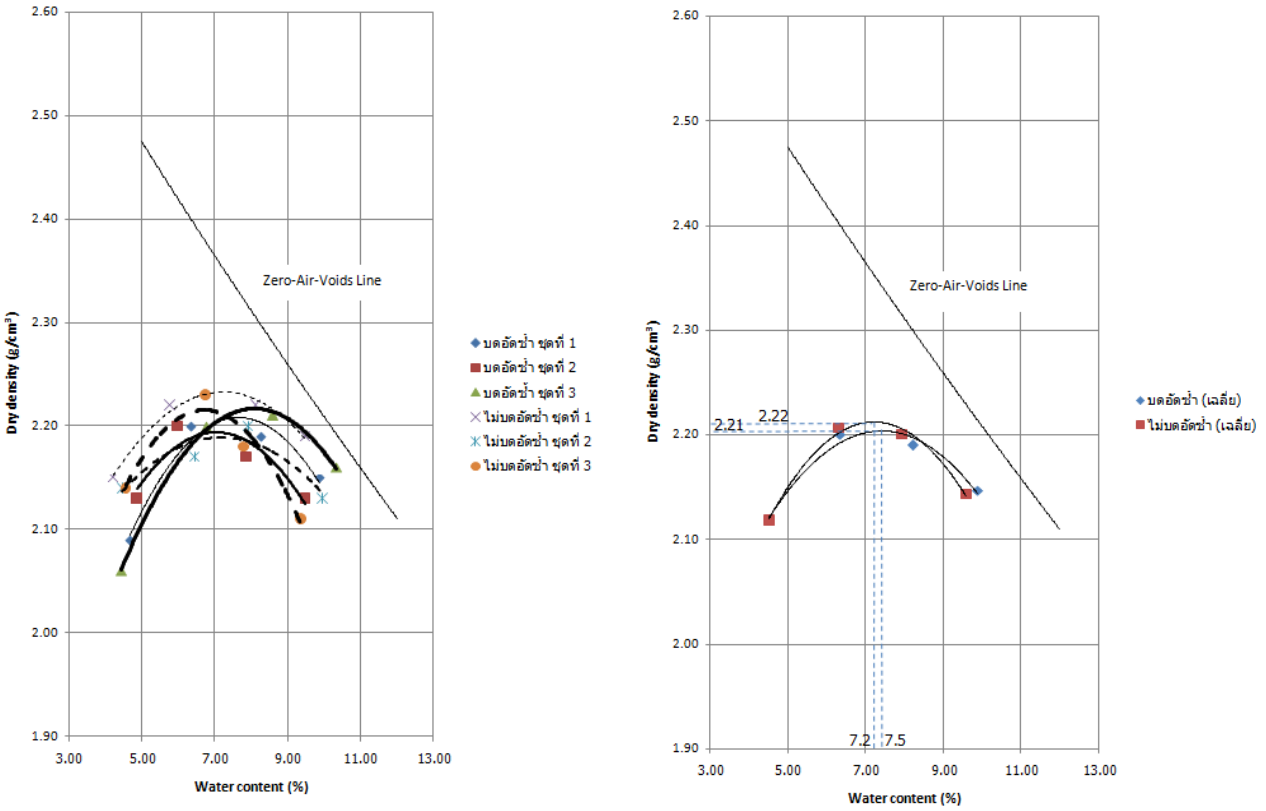
จากการทดสอบบดอัดมาตรฐาน Standard Proctor Test ของหินคลุก การบดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.16 g/cm^3 มีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 8.9% และการไม่บดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.15 g/cm^3 มีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 8.7% โดยการไม่บดอัดซ้ำมีค่าความหนาแน่นสูงสุดต่ำกว่าการบดอัดซ้ำ 0.47%



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของการทดสอบการบดอัดของหินคลุกตามมาตรฐาน Standard Proctor Test

4.4 การทดสอบบดอัดหินคลุก มาตรฐาน Modified Proctor Test

จากการทดสอบบดอัดมาตรฐาน Modified Proctor Test ของหินคลุก การบดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.21 g/cm^3 มีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 7.5% และการไม่บดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.22 g/cm^3 มีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 7.2%โดยการไม่บดอัดซ้ำมีค่าความหนาแน่นสูงสุดสูงกว่าการบดอัดซ้ำ 0.45%



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของการทดสอบการบดอัดของหินคลุกตามมาตรฐาน Modified Proctor Test

5. สรุปผลการศึกษา

การทดสอบบดอัดหินคลุกและดินลูกรังทั้ง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่บดอัดโดยเปลี่ยนตัวอย่างใหม่ทุกตัวอย่างดินทดสอบ (ไม่บดอัดซ้ำ) และกลุ่มที่บดอัดโดยใช้ตัวอย่างดินเดิมทดสอบ (บดอัดซ้ำ) โดยใช้มาตรฐานการบดอัด คือ Standard Proctor Test และ Modified Proctor Test ได้ผลความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, O.M.C.) ดังนี้

1. ดินลูกรังบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Test)

-บดอัดซ้ำ: γ_{dmax} = 1.82 g/cm^3, O.M.C. = 14.2 %

-ไม่บดอัดซ้ำ : γ_{dmax} = 1.76 g/cm^3, O.M.C. = 13.6 %

2. ดินลูกรังบดอัดแบบเหนือกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test)

-บดอัดซ้ำ : γ_{dmax} = 1.88 g/cm^3 , O.M.C. = 12.0 %

-ไม่บดอัดซ้ำ : γ_{dmax} = 1.85 g/cm^3 , O.M.C. = 11.9 %

3. หินคลุกบดอัด มาตรฐาน (Standard Proctor Test)

-บดอัดซ้ำ : γ_{dmax} = 2.16 g/cm^3 , O.M.C. = 8.9 %

-ไม่บดอัดซ้ำ : γ_{dmax} = 2.15 g/cm^3 , O.M.C. = 8.7 %

4. หินคลุกบดอัดแบบเหนือกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test)

-บดอัดซ้ำ : γ_{dmax} = 2.21 g/cm^3 , O.M.C. = 7.5 %

-ไม่บดอัดซ้ำ : γ_{dmax} = 2.22 g/cm^3 , O.M.C. = 7.2 %

จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้ในการบดอัดดินลูกรัง ทั้งในการทดสอบตามมาตรฐาน Standard Proctor Test และมาตรฐาน Modified Proctor พบว่าการบดอัดซ้ำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด สูงกว่ากรณีไม่บดอัดซ้ำ ทั้งนี้ เพราะว่าในการบดอัดซ้ำ จะทำให้เกิดการแตกของเม็ดดินมากกว่าในการไม่บดอัดซ้ำ ซึ่งเม็ดดินที่มีขนาดเล็กจะมีโอกาสเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าได้มากขึ้น ทำให้ดินมีช่องว่างน้อยลงจึงมีความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบการบดอัดของหินคลุก ทั้งตามมาตรฐาน Standard Proctor Test และมาตรฐาน Modified Proctor Test ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสำหรับกรณีบดอัดซ้ำและกรณีไม่บดอัดซ้ำ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าให้ค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า การบดอัดซ้ำทำให้เม็ดดินเกิดการแตกน้อยมาก เพราะเม็ดดินมีความแข็ง ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในกรณีกรณีบดอัดซ้ำและกรณีไม่บดอัดซ้ำ

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า การบดอัดในสนามจริง ดินจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับดินในกลุ่มที่ไม่บดอัดซ้ำโดยทั่วไป มักจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยค่าความหนาแน่นแห้งของดินลูกรังของกลุ่มไม่บดอัดซ้ำจะมีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่บดอัดซ้ำ 1.6-3.4% ส่วนค่าความหนาแน่นแห้งของหินคลุกของกลุ่มไม่บดอัดซ้ำมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มที่บดอัดซ้ำ โดยมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.5%

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น ในกรณีของดินลูกรัง กลุ่มดินที่บดอัดซ้ำซึ่งให้ความหนาแน่นสูงกว่ากลุ่มดินไม่บดอัดซ้ำ มากกว่า 1.6% แต่ไม่เกิน 3.4% ผู้เขียนมีความเห็นว่า ควรบดอัดโดยใช้ตัวอย่างที่ไม่บดอัดซ้ำ จะให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาพดินในสนามมากกว่า แต่ในกรณีของหินคลุก ผู้เขียนมีความเห็นว่า สามารถใช้ตัวอย่างที่บดอัดซ้ำได้ โดยจะได้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกันระหว่างตัวอย่างที่บดอัดซ้ำและไม่บดอัดซ้ำ

เอกสารอ้างอิง

[1] ASTM D698 - 12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3)).

[2] ASTM D1557 - 12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56000 ft-lbf/ft^3 (2700 kN-m/m^3)).

[3] Braja M. Das. (2011). Geotechnical Engineering Handbook. J. Ross Publishing, Inc.

[4] John T. Germaine, Amy V. Germaine. (2009). Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers. John Wiley & Sons, Inc.

[5] Proctor, R. R. (1993). Fundamental Principles of Soil Compaction. Engineering News Record, vol.111, no.9.

[6] ณัฐพงศ์ สมมะลวน และธเนศ เลาหะพิพัฒน์ชัย. 2558.อิทธิพลของการบดอัดดินซ้ำที่มีต่อคุณสมบัติของดินลูกรังและหินคลุกในการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ.ปริญญานิพนธ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.

[7] นพรัตน์ ท้วมประดิษฐ์.2543.อิทธิพลของการบดอัดซ้ำที่มีต่อคุณสมบัติของดินลูกรังในการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ.

[8] วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา.2554.ปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics).สำนักพิมพ์โฟร์เพซ, กรุงเทพ.

[9] สถาพร คูวิจิตรจารุ.2541.ทดลองปฐพีกลศาสตร์ (Soil Laboratory Testing).Library Nine Publishing, กรุงเทพ.