

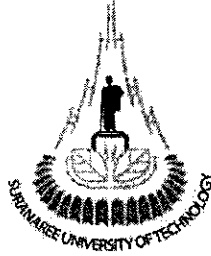


รายงานการวิจัย

อิทธิพลของสภาวะบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน
(Influence of compacted conditions on compaction test results)

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

อิทธิพลของสภาวะบดอัดต่อผลทดสอบการบดอัดดิน
(Influence of compacted conditions on compaction test results)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2549
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว

เมษายน 2551

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ จากความร่วมมือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งไปผู้อุดหนุนทุนวิจัยปีงบประมาณ 2549 ผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข และ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ สำหรับการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นเชิงวิชาการซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา นี้ นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรของศูนย์เครื่องมือฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายดิงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์ ที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงาน สุดท้ายนี้ผู้เขียนแสดงความขอบคุณไปยัง นายเอกชัย ม่าน โคนสูง ผู้ช่วยวิจัยที่ทำงานอย่างอุทิศตนมาตลอดระยะเวลาของโครงการ

อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

หัวหน้าโครงการวิจัย

ธันวาคม 2550

บทคัดย่อ

ดินเป็นวัสดุธรรมชาติซึ่งมักมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับงานก่อสร้าง และจำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสม การปรับปรุงดินโดยการบดอัดดินเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายในการก่อสร้างโครงสร้างดิน เนื่องจากมีเทคนิคที่ไม่ยุ่งยากและสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามจะต้องมีการคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมจากแหล่งดิน และการควบคุมการบดอัดในสนาม โดยใช้ผลทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เช่นมาตรฐานของสมาคมผู้ทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา หรือมาตรฐานการทดสอบของอังกฤษ ข้อกำหนดหนึ่งในมาตรฐานทดสอบการบดอัด คือการเปลี่ยนแปลงสภาพขอบเขตของการบดอัดโดยการเปลี่ยนขนาดของแบบจากแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วไปเป็นแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว รายงานฉบับนี้นำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนสภาพขอบเขต (ขนาดของแบบบดอัดดิน) ต่อผลทดสอบการบดอัดดิน ผลทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของแบบที่ใช้ในการบดอัดดินมีผลต่อผลทดสอบการบดอัดเมื่อปริมาณกรวดในดินมีค่ามากกว่า 20% ซึ่งสอดคล้องตามข้อกำหนดของมาตรฐานทดสอบการบดอัดดิน

Abstract

Soil is a nature made material which inherently does not exhibit the properties desired for construction. Enhancement the soil properties by means of compaction is a classical and widely used improvement method. Selection of an appropriated soil from a borrow pit and field compaction control can be achieved by laboratory compaction test results conducted under standard testing manuals, e.g. American Society for Testing and Materials. A change of a compaction mold size is one important regulation specified in the standard testing manuals. This report presents an influence of confining states, i.e. compaction mold sizes, on compaction test results. It is found that the compaction mold size affects laboratory compaction test results if a compacted specimen contains more than 20% of gravel. The results are accordance to those specified in the standard testing manuals.

สารบัญ

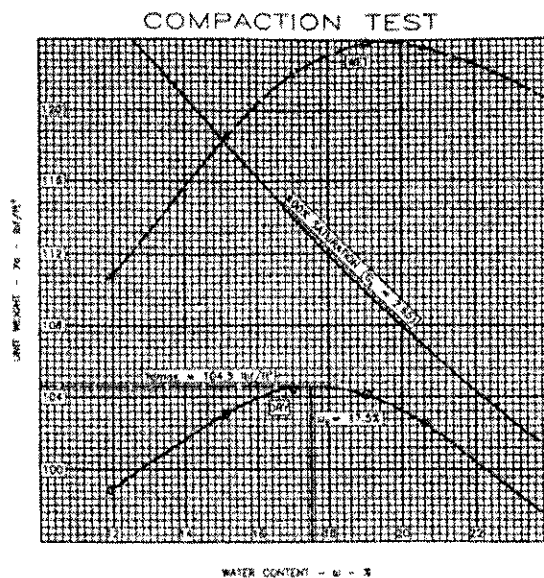
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 ทัศนวิสัยการมองเห็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	12
บทที่ 4 ผลทดสอบ	16
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่นำมาศึกษา	16
4.2 ผลทดสอบ X-Ray Diffraction	16
4.3 ผลทดสอบการบดอัด	19
4.3.1 อิทธิพลของขนาดแบบบดอัดดินที่ใช้	19
4.3.2 อิทธิพลของปริมาณกรวดในดิน	22
4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค	30
บทที่ 5 สรุป	34
เอกสารอ้างอิง	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การบดอัดดินเป็นวิธีพื้นฐานในการปรับปรุงคุณภาพดิน และถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างโครงสร้างดิน ฯลฯ โดยในการเลือกวัสดุที่จะนำมาบดอัดเป็นโครงสร้างดินจะต้องเลือกจากแหล่งดินหรือบ่อขุด (Borrow pit) ที่มีความเหมาะสม หลังจากนั้นจึงนำดินนั้นมาตรวจสอบคุณลักษณะการบดอัด (Compaction characteristics) อีกครั้งโดยดูจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งของดินที่ได้รับการบดอัดกับความชื้นของดินบดอัด เรียกว่าเส้นโค้งการบดอัด (Compaction curve) ดังรูปที่ 1.1 จากรูปแกนตั้งเป็นแกนของความหนาแน่นแห้ง และแกนนอนเป็นแกนของความชื้นในดินบดอัด ค่าความหนาแน่นแห้งที่จุดสูงสุดของเส้นโค้งคือความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดคือความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content: OWC) หลังจากนั้นเมื่อนำดินไปทำการบดอัดจริงในสนามคุณลักษณะการบดอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะถูกนำมาใช้ในการกำหนดและควบคุมคุณภาพการบดอัดในสนาม จะพบว่าในทางปฏิบัติ งานบดอัดดินจะให้สนใจกับความหนาแน่นแห้งและความชื้นบดอัด ทั้งนี้วิศวกรจะทราบว่าหากความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดินจะสูงขึ้น และความซึมผ่านได้จะลดลง คุณสมบัติดังกล่าวนอกจากขึ้นกับความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดแล้วยังขึ้นกับความชื้นของดินบดอัดด้วย เช่นบดอัดด้วยความชื้นน้อยกว่าความชื้นที่เหมาะสมจะให้กำลังของดินบดอัดสูง ในขณะที่การบดอัดที่ความชื้นมากกว่าความชื้นที่เหมาะสมจะให้คุณสมบัติความที่บ้น้ำที่ดีกว่า เป็นต้น ทั้งนี้เป็นเพราะที่ความชื้นในการบดอัดต่างกัน จะทำให้เกิดโครงสร้างการจัดเรียงตัวของดินแตกต่างกัน



รูปที่ 1.1 เส้นโค้งการบดอัด

การบดอัดให้ห้องปฏิบัติการเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ เช่น มาตรฐานการทดสอบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา (American Society for Testing and Materials) หรือ มาตรฐานการทดสอบของอังกฤษ (British Standard) เป็นต้น ซึ่งได้กำหนดแนวทางการทดสอบไว้ เช่น ในมาตรฐานการทดสอบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา กำหนดให้ใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สำหรับดินที่มีกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 mm ผสมอยู่ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ และให้ใช้แบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สำหรับดินที่มีกรวดขนาดใหญ่กว่า 3/8 นิ้ว ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดินที่มีกรวดผสมอยู่ระหว่างสองกรณีข้างต้นหากไม่มีการระบุให้ใช้แบบขนาด 6 นิ้ว แต่สามารถใช้แบบขนาด 4 นิ้ว ได้หากมีการระบุในข้อกำหนดการทดสอบ รายละเอียดการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor's) แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 การบดอัดแบบมาตรฐานวิธีต่างๆตามมาตรฐานการทดสอบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา

ดินบดอัด	วิธีการบดอัด	ขนาดแบบบดอัดดิน	ค้อนบดอัด	การบดอัด
ค้ำ # 4 \geq 20%	Standard Proctor's A	Ø 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว	5.5 ปอนด์ ระยะตก 12 นิ้ว	3 ชั้น ชั้น ละ 25 ครั้ง
ค้ำ # 4 \geq 20% ค้ำ # 3/8" \geq 20%	Standard Proctor's B หรือ Standard Proctor's C	Ø 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว หรือ Ø 6 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว	5.5 ปอนด์ ระยะตก 12 นิ้ว	3 ชั้น ชั้น ละ 25 ครั้ง
ค้ำ # 3/8" \geq 20% ค้ำ # 3/4" \geq 30%	Standard Proctor's C	Ø 6 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว	5.5 ปอนด์ ระยะตก 12 นิ้ว	3 ชั้น ชั้น ละ 56 ครั้ง

ทั้งสามวิธีในตารางที่ 1.1 ใช้พลังงานในการบดอัดต่อปริมาตรเท่ากันคือ 12375 lb-ft/ft³ โดยประมาณ ตามข้อกำหนดในการบดอัดแบบมาตรฐาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาพขอบเขตของการบดอัดจากแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ไปเป็นแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เมื่อปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่มาของการใช้ปริมาณกรวด 20 % เป็นตัวแบ่งระหว่างการใช้แบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ยังไม่มีความชัดเจน รวมทั้งในงานวิจัยที่พยายามพัฒนาแบบที่มีขนาดเล็กลงสำหรับการทดสอบการบดอัดในสนาม เช่นงานวิจัยของ Diaz-Zorita และคณะ (2001) และ Sridharan และ Sivapulaiha (2004) จะเป็นการพัฒนาแบบที่มีขนาดเล็กสำหรับดินเม็ดละเอียดเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของขนาด

แบบบดอัดและกรวดที่มีต่อการบดอัดยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างจริงจัง ซึ่งหากอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวต่อผลการบดอัดได้รับการศึกษาอย่างดีแล้วจะช่วยให้สามารถนำความรู้ไปใช้ต่อยอดในการพัฒนาแบบบดอัดขนาดเล็กสำหรับดินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณลักษณะการบดอัดที่ได้จากเงื่อนไขในการบดอัดภายใต้สภาพขอบเขตที่แตกต่างกันของดินสองประเภท ได้แก่ ดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) และดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Cohesionless soil) โดยดินแต่ละประเภทมีปริมาณกรวดผสมอยู่ในปริมาณต่างๆกัน เพื่อศึกษาถึงการตอบสนองต่อการบดอัดของดินต่างประเภท อันจะนำไปสู่ความเข้าใจมาตรฐานการบดอัดได้ดีขึ้น และทำให้วิศวกรที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปใช้ควบคุมคุณภาพการบดอัดได้อย่างถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจมาตรฐานการทดสอบการบดอัดที่ใช้ในปัจจุบัน และแสดงให้วิศวกรได้ทราบและตระหนักถึงความแตกต่างของพฤติกรรมการบดอัดดินต่างชนิดภายใต้เงื่อนไขการบดอัดที่ต่างกัน
2. เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับนำไปพัฒนาแบบบดอัดที่มีขนาดเล็กได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาความแตกต่างของคุณลักษณะการบดอัด (Compaction characteristics) ของดินที่บดอัดในแบบมาตรฐานสองขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และผลกระทบเนื่องจากปริมาณกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.75 mm ถึง 3/8 นิ้ว ที่ผสมในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น และดินที่มีความเชื่อมแน่น

บทที่ 2

ปริศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

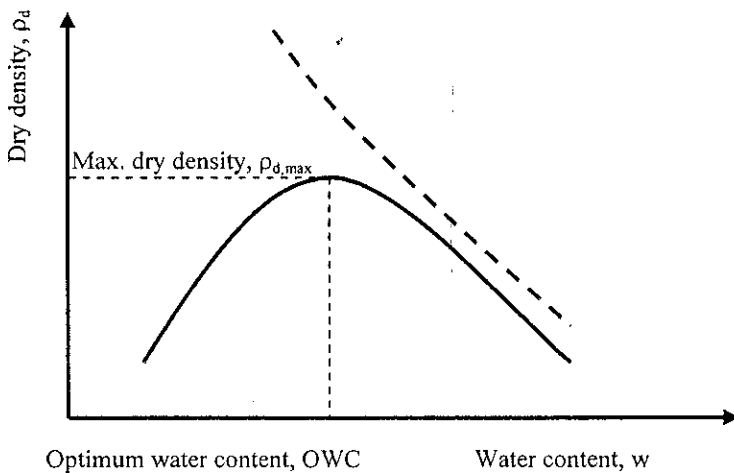
ในเชิงกลศาสตร์ดิน การบดอัดคือการทำให้มวลดินแน่นขึ้นโดยการไล่อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินออกไปโดยใช้พลังงานเชิงกล (Holtz and Kovacs, 1981) การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM) สามารถแบ่งเป็นสองประเภทคือการบดอัดแบบมาตรฐาน (ASTM D 698) และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D 1557) ทั้งสองประเภทจะทำการบดอัดดินลงในแบบทรงกระบอก (Mold) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว หรือแบบทรงกระบอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว โดยการเลือกใช้แบบเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือ 6 นิ้ว ทั้งนี้จะขึ้นกับปริมาณและขนาดของกรวดที่ผสมอยู่ในดิน ผลทดสอบการบดอัดจะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (Dry density) และความชื้นในดิน (Water content) แสดงดังรูปที่ 2.1 ที่ความชื้นหนึ่งๆความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎีจะอยู่ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) เท่ากับ 100% ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงเนื่องจาก ในดินมีช่องว่างขนาดเล็กเป็นจำนวนมากซึ่งน้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปได้ เส้นโค้งที่เกิดจากการลากเส้นเชื่อมพิกัดของความหนาแน่นแห้ง และความชื้น ที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำคงที่ เรียกว่าเส้นโค้งระดับความชื้นคงที่ และสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.1

$$\rho_d = \rho_w / \left(w + \frac{1}{SG_s} \right) \quad 2.1$$

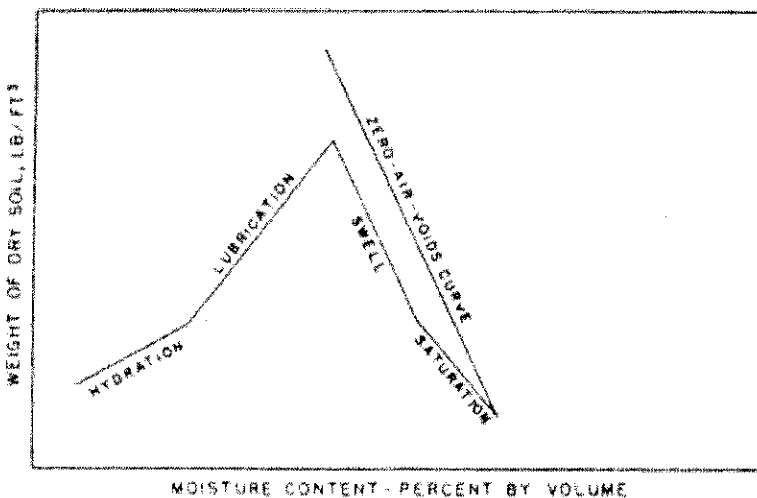
โดยที่ ρ_d เป็นความหนาแน่นแห้ง w เป็นความชื้นในดิน S เป็นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ และ G_s เป็นความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน และเส้นโค้งที่ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำคงที่เท่ากับ 100% เรียกว่าเส้นโค้งโพรงอากาศเป็นศูนย์ (Zero air void curve) หรือเส้นโค้งระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ 100% (100% Saturation curve) ในการบดอัด เส้นโค้งการบดอัดจะต้องอยู่ทางซ้ายมือของเส้นโค้งโพรงอากาศเป็นศูนย์เท่านั้น

การที่เส้นโค้งบดอัดแสดงลักษณะที่เพิ่มความหนาแน่นแห้งขึ้นกับความชื้นแล้วกลับลดลงเมื่อความชื้นถึงระดับหนึ่งจึงได้มีหลายความพยายามที่จะอธิบายพฤติกรรมดังกล่าว เช่น Proctor (1933) Hogentogler (1936) Hilf (1956) หรือ Olsen (1963) ซึ่งเมื่อรวบรวมคำอธิบายจากนักวิจัยที่กล่าวถึงก่อนหน้าสามารถสรุปได้ว่าสาเหตุดังกล่าวเกิดจากพฤติกรรมที่ค่อนข้างซับซ้อนทั้งจากความดันคาพิลารี (Capillary pressure) หน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ความซึมผ่านได้ (Permeability) ความดันของของไหลในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore pressure) ซึ่งในปี 1936 Proctor สรุปว่าความชื้นในดินเกี่ยวข้องกับความดันคาพิลารีเป็นเหตุให้ดินที่บดอัดทางด้านแห้งมี

กำลังสูงกว่าดินที่บดอัดทางด้านเปียก และ Hogentogler (1956) ได้แบ่งเส้นโค้งการบดอัดเป็นสี่ช่วง แสดงดังรูปที่ 2.2 คือ (1) Hydration เป็นช่วงที่น้ำถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อดินและบางส่วนเกาะเป็นฟิล์มบางๆระหว่างเม็ดดินซึ่งทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกันระหว่างเม็ดดิน (2) Lubrication การเพิ่มน้ำในดินในช่วงนี้เป็นการเพิ่มความหนาฟิล์มของน้ำที่เกาะระหว่างเม็ดดิน ทำให้น้ำไปทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวหล่อลื่นช่วยให้เม็ดดินสามารถจัดเรียงตัวได้แน่นขึ้น (3) Swelling เป็นช่วงที่ Hogentogler เชื่อว่าเมื่อเลขค่าสูงสุดของช่วง Lubrication แล้วการเพิ่มน้ำจะไม่ช่วยลดปริมาตรของช่องว่างอากาศในเนื้อดิน (4) Saturation ซึ่ง Hogentogler อธิบายว่าเป็นช่วงที่ที่โพรงอากาศถูกแทนที่ด้วยน้ำทั้งหมดดังนั้นเส้นโค้งการบดอัดจึงวิ่งเข้าสู่เส้นโพรงอากาศเป็นศูนย์

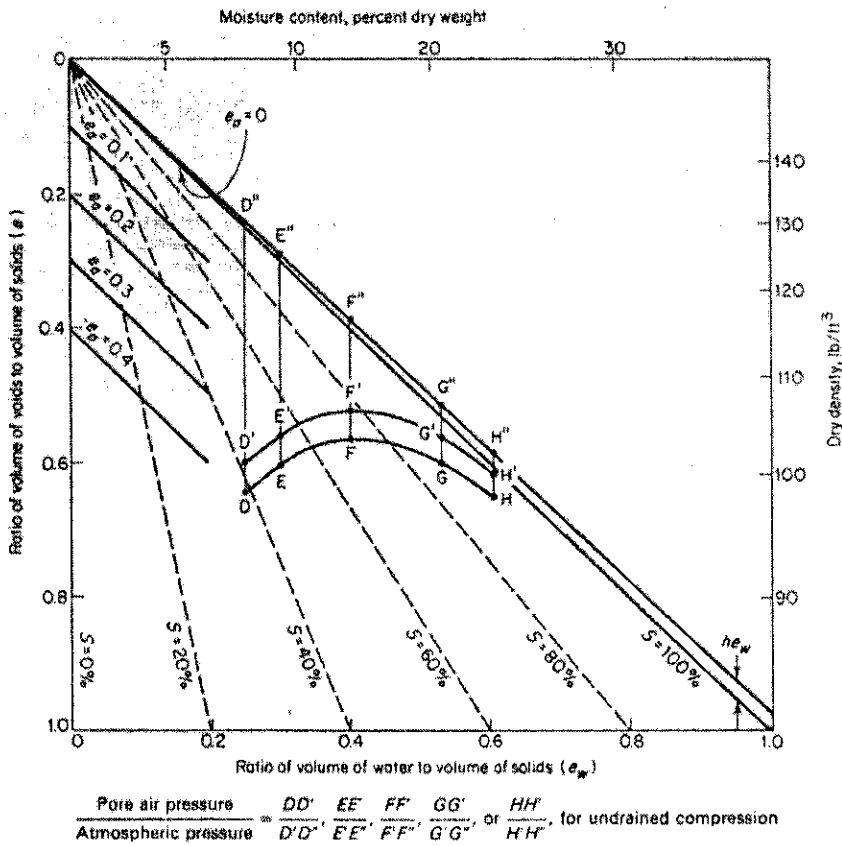


รูปที่ 2.1 เส้นโค้งการบดอัด



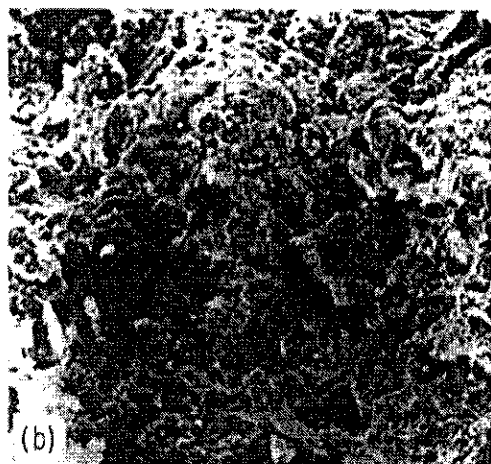
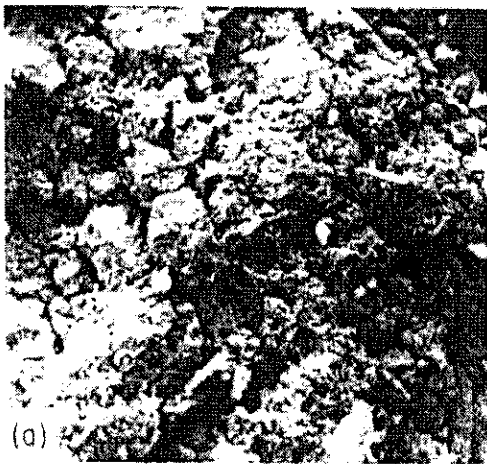
รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการบดอัดโดย Hogentogler

Hilf ในปี 1956 ใช้ทฤษฎีของความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในการอธิบายเส้นโค้งการบดอัด แต่ใช้อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินแทนที่จะใช้ความหนาแน่นแห้ง และใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรของเม็ดดินแทนความชื้นในดิน แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเส้นเส้นโค้งระดับความชื้นคงที่จะเป็นเส้นตรงเนื่องจากการใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำต่อปริมาตรของเม็ดดินแทนความชื้นในดิน รูปร่างของเส้นโค้งอธิบายโดยแนวคิดของความดันคาพิลลารีและความดันอากาศในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เมื่อมีความชื้นในดินน้อย ความโค้งของเส้นขอบผิวน้ำ (Menisci) จะมีค่ามากก่อให้เกิดความดันคาพิลลารีสูงและต่อต้านการบดอัด อย่างไรก็ตามอากาศจะถูกไล่ออกไปค่อนข้างเร็วทั้งนี้เนื่องจากโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ และเมื่อเพิ่มความชื้นขึ้นความโค้งเส้นขอบผิวน้ำก็จะราบขึ้นทำให้แรงต้านการบดอัดน้อยลงและสามารถบดอัดดินได้แน่นขึ้น ดังนั้นจึงสามารถบดอัดดินให้มีค่าความหนาแน่นได้สูงสุด การลดลงของความหนาแน่นแห้งเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเกิดจากโพรงอากาศในเนื้อดินไม่เกิดความต่อเนื่องและก่อให้เกิดความดันโพรงอากาศขึ้นระหว่างการบดอัด ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการบดอัดลดลง และในปี 1968 Langfelder และคณะ พบว่าที่เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้นถึงประมาณความชื้นที่เหมาะสม ความต่อเนื่องของโพรงอากาศในดินจะหมดไปและความซึมผ่านได้ของอากาศจะเป็นศูนย์ซึ่งสอดคล้องกับ Hilf (1956)



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งการบดอัดที่เสนอโดย Hilf (Hilf, 1956)

Olsen (1963) ใช้แนวคิดของหน่วยแรงประสิทธิผลในการอธิบายเส้นโค้งการบดอัดโดยอธิบายว่าที่ความชื้นต่ำเมื่อเพิ่มความชื้นขึ้นขึ้นจะเป็นการเพิ่มความดันของโพรงอากาศและความดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งเป็นผลให้หน่วยแรงประสิทธิผลในดินลดลง เม็ดดินจะเคลื่อนตัวระหว่างกันได้ง่าย เมื่อได้รับการบดอัดหน่วยแรงประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มของหน่วยแรงด้านข้าง การเพิ่มของความดันน้ำที่เป็นลบ (Suction) และการเพิ่มขึ้นของความดันน้ำที่เกิดจากการเลื่อนจะลดลงอย่างมาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาจะลดลงเรื่อยๆระหว่างการบดอัดเมื่อเพิ่มความชื้นขึ้นไปอีกจนถึงจุดหนึ่งโพรงอากาศจะลดความต่อเนื่องลง เป็นผลให้ความซึมผ่านได้ของอากาศลดลงจนในที่สุดความซึมผ่านได้ของโพรงอากาศจะเป็นศูนย์ซึ่งทำให้ไม่สามารถทำให้ดินแน่นไปมากกว่านั้นได้ ในปี 1970 Barden และ Sides พบว่าความชื้นในขณะบดอัดมีผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างของเม็ดดิน ดินที่บดอัดที่ความชื้นต่ำจะมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดใหญ่และเม็ดดินจะจับกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งแต่ละกลุ่มก้อนจะจับกันแน่นหนาสามารถต้านการบดอัดได้ ดังแสดงรูปที่ 2.4 (ก) เมื่อความชื้นบดอัดมีค่ามากขึ้น กลุ่มก้อนของเม็ดดินที่จับกันแน่นก็จะมี ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วยจึงสามารถบดอัดได้ง่ายขึ้นดังนั้นช่องว่างระหว่างเม็ดดินจึงมีค่าลดลงและการจัดเรียงตัวโครงสร้างเม็ดดินก็จะเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2.4 (ข) อย่างไรก็ตามเมื่อความชื้นในดินถึงจุดที่เหมาะสม Barden และ Sides อธิบายว่าชั้นน้ำรอบอนุภาคดิน (Water layer) จะมีความหนาเพิ่มขึ้น จึงทำให้เม็ดดินแยกห่างออกจากกัน นอกจากนี้ Barden และ Sides ได้แสดงให้เห็นว่าความต่อเนื่องของโพรงอากาศจะหายไปเมื่อความชื้นในดินเข้าใกล้ความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวได้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าสำหรับการบดอัดด้วยพลังงานต่อปริมาตรเท่ากัน การจัดเรียงตัวของโครงสร้างเม็ดดินจะมีความเป็นระเบียบขึ้นเมื่อความชื้นบดอัดเพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือโครงสร้างการจัดเรียงตัวของเม็ดดินที่บดอัดทางด้านหนึ่งมีลักษณะการเรียงตัวแบบกระจาย (Flocculated structure) ส่วนการเรียงตัวของโครงสร้างเม็ดดินทางด้านเปียกจะเป็นแบบมีการเรียงตัวแบบมีระเบียบ (Dispersed structure)



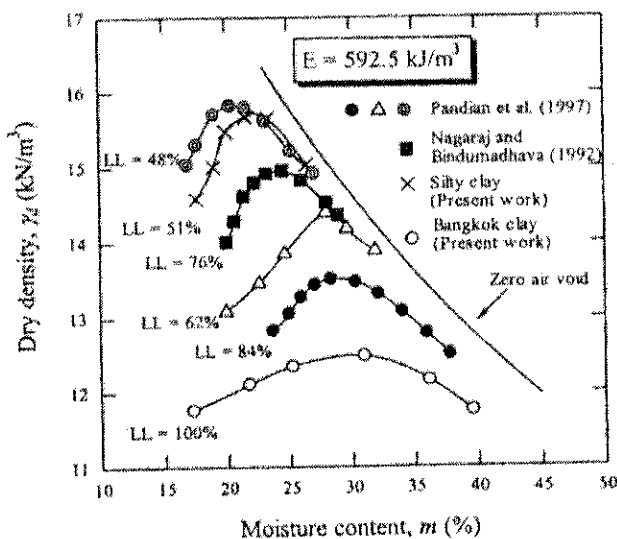
รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายไมโครแสดงการจัดเรียงตัวของดินบดอัด

งานวิจัยที่ผ่านมาพยายามที่จะอธิบายพฤติกรรมของดินในระหว่างการบดอัด โดยเน้นไปที่สภาพความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดินบดอัด อย่างไรก็ตามไม่มีงานวิจัยชิ้นใดที่ได้กล่าวถึงผลการบดอัดภายใต้สภาพขอบเขตที่ต่างกัน แม้ว่าในมาตรฐานจะกำหนดขนาดของแบบสำหรับบดอัดดินที่ต่างกันเอาไว้สำหรับดินที่มีปริมาณกรวดต่างกัน ในขณะที่งานวิจัยเกี่ยวกับการบดอัดดินในช่วงหลังนี้ได้เน้นไปที่การพยายามอธิบายพฤติกรรมของดินระหว่างการบดอัด แต่จะเน้นไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและเส้นโค้งการบดอัด เช่น ในปี ค.ศ. 2001 Basheer ได้พยายามสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งการบดอัดของดินเหนียวจากคุณสมบัติพื้นฐานของดินและพลังงานต่อปริมาตรในการบดอัดดิน Gurtug และ Sridharan ในปี ค.ศ. 2002 ได้แสดงให้เห็นว่าความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินเม็ดละเอียดที่บดอัดโดยวิธีมาตรฐานของ Proctor มีความสัมพันธ์กับพิกัดพลาสติก (Plastic limit) ดังสมการ

$$OWC = 0.92PL \quad 2.2$$

$$\rho_{d \max} = 0.98\rho_{dPL} \quad 2.3$$

โดยที่ OWC เป็นความชื้นที่เหมาะสม PL เป็นพิกัดพลาสติก $\rho_{d \max}$ เป็นความหนาแน่นแห้งสูงสุด ρ_{dPL} เป็นความหนาแน่นแห้งที่พิกัดพลาสติก ในปี ค.ศ. 2005 Horpibulsuk และคณะ ได้แสดงให้เห็นว่าสำหรับดินเหนียว เส้นโค้งการบดอัดขึ้นกับพิกัดเหลว (Liquid limit) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงผลทดสอบการบดอัดดินเหนียวชนิดต่างๆด้วยโดยวิธีสูงกว่ามาตรฐานของ Proctor ทั้งนี้ Horpibulsuk และคณะอธิบายว่าพิกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของชนิดดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน



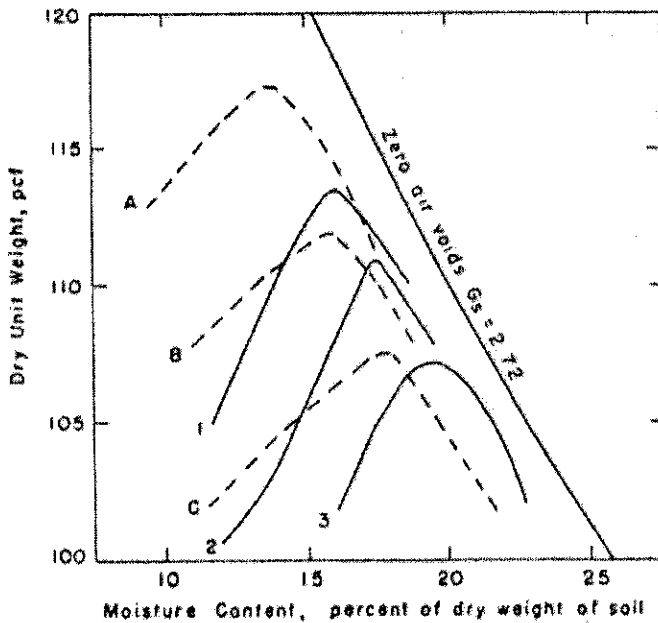
รูปที่ 2.5 เส้นโค้งการบดอัดของดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่างกัน

อาจมีงานวิจัยบางชิ้นที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างสภาพขอบเขตการบดอัดที่แตกต่างกันเช่น จากรายงานของ Waterways Experiment Station ในปี ค.ศ. 1949 โดยความร่วมมือระหว่าง British Road Research Laboratory และ U.S. Bureau of Reclamation ได้ทำการบดอัดดินในสนามด้วยอุปกรณ์ที่ต่างกันและเปรียบเทียบผลการบดอัดที่ได้โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินที่บดอัด โดยวิธีสูงกว่ามาตรฐานของ Proctor ทั้งนี้ในการบดอัดในสนามดินที่ใช้เป็นดินเหนียวปนดินตะกอน ความสูงของชั้นบดอัดแต่ละชั้นสูง 6 นิ้วและใช้จำนวนรอบของรถบดอัดเท่ากับ 6 รอบ ได้ผลดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักล้อหรือความดันล้อที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้งอย่างมีนัย หรือในปี 1960 Lewis จาก British Road Research Laboratory ได้ทำการบดอัดดินสี่ชนิดด้วยรถบดอัดห้าประเภทที่ต่างกัน ได้แก่ รถบดล้อเรียบหรือรถบดอัดทั่วไป (Smooth-wheel roller) รถบดตีนแกะ (Sheepsfoot roller) รถบดอัดสั่นสะเทือนล้อเหล็ก (Vibrating roller) รถบดอัดล้อยาง (pneumatic-tire roller) และกบสั่นสะเทือน (Vibrating baseplate compactor) พบว่ารถบดล้อยางที่ความดันลมยางสูงๆ สามารถบดอัดดินเหนียว ได้สูงสุด โดยรถบดตีนแกะจะให้ผลใกล้เคียงกัน และรถบดล้อยางที่ความดันลมยางสูงๆและรถบดอัดกบสั่นสะเทือนล้อเหล็กจะบดอัดดินเหนียวปนทรายได้ดีพอๆกัน ในขณะที่ดินเม็ดหยาบรถบดล้อเหล็กแบบสั่นสะเทือนจะบดอัดได้ดีที่สุด ในปีเดียวกัน Johnson และ Sallberg (1960) ได้รวบรวมผลจากการบดอัดในสนามโดยใช้รถบดล้อยาง และเปรียบเทียบกับผลการบดอัดในห้องปฏิบัติการซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6 ในรูปที่ 2.6 เส้นประ A และเส้นประ C คือเส้นโค้งการบดอัดแบบมาตรฐาน AASHTO (1970,1986) (พลังงานบดอัดต่อปริมาตรเท่ากับ 12223 lb-ft/ft³) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน AASHTO (1970,1986) (พลังงานบดอัดต่อปริมาตรเท่ากับ 56022 lb-ft/ft³) ส่วนเส้นประ B คือเส้นโค้งการบดอัดระหว่างมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน AASHTO (1970,1986) (พลังงานบดอัดต่อปริมาตรเท่ากับ 26483 lb-ft/ft³) เส้นที่บที่ 1 เป็นเส้นโค้งบดอัดในสนามโดยใช้รถบดล้อเรียบที่น้ำหนักล้อ 31250 lb คิดเป็นความดันลมยาง 150 psi เส้นที่บที่ 2 เป็นผลจากรถบดล้อเรียบที่น้ำหนักล้อ 25000 lb คิดเป็นความดันลมยาง 90 psi และเส้นที่บที่ 3 เป็นผลจากรถบดล้อเรียบที่น้ำหนักล้อ 15875 lb คิดเป็นความดันลมยาง 50 psi ตามลำดับ จากรูปพบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักล้อ (Wheel load) และความดันลมยางมีผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม ซึ่ง Johnson และ Sallberg สรุปว่าการเพิ่มน้ำหนักล้อเป็นการเพิ่มความลึกในการบดอัดดิน ในขณะที่การเพิ่มความดันยางโดยโดยไม่เพิ่มน้ำหนักล้อจะก่อให้เกิดการบดอัดดินในระดับตื้นเท่านั้น ต่อมาในปี 1969 Bureau of Reclamation โดย Tiedeman และ Fink ได้ทำการบดอัดดินเหนียวพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกต่ำ (Lean clay) โดยการบดอัดในสนามใช้รถบดล้อหนาม (Tamping roller) และรถบดสั่นสะเทือนล้อเหล็ก พบว่าเส้นโค้งการบดอัดจะมีความแตกต่างกัน โดยเส้นโค้งการบดอัดที่ได้จากรถบดล้อหนามจะแบนกว่าและความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าน้อยกว่าเส้นโค้งที่ได้จากรถบดล้อเหล็ก และยังพบว่าสำหรับรถบดตีนแกะหรือรถ

บดล้อยานนั้นการบดอัดเป็นลักษณะนวดดินไปในระหว่างการบดอัดซึ่งทำให้รบบคชนิดนี้เป็นรบบคชนิดเดียวที่สามารถบดอัดดินโดยไม่ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นที่บดอัดรวมทั้งโครงสร้างดินจะมีความสม่ำเสมอมากที่สุดด้วย

ตารางที่ 2.2 ชนิดของล้อบดและน้ำหนักล้อต่อความหนาแน่นแห้งที่ได้

ชนิดของรถบดอัด	น้ำหนักล้อ หรือ ความดัน	ความหนาแน่นแห้ง/ ρ_{dmax} Modified Proctor
รถบดล้อยาง	10000 lb	92%-94%
รถบดล้อยาง	20000 lb	92%-93%
รถบดล้อยาง	40000 lb	93%-94%
รถบดตีนแกะ	250 psi	92%
รถบดตีนแกะ	500 psi	91%-92%
รถบดตีนแกะ	750 psi	91%-92%



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งการบดอัดจากผลการทดลองของ Johnson และ Sallberg (1960)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าถึงแม้จะมีการศึกษาถึงสภาพการบดอัดที่แตกต่างกัน รวมทั้งพบว่าสภาพการบดอัดที่แตกต่างกันในสนามมีผลต่อผลการบดอัดดินในสนามด้วย อย่างไรก็ตามการศึกษาที่กล่าวถึงข้างต้นจะเน้นไปที่ความแตกต่างของสภาพการบดอัดในสนาม เพราะความหลากหลายของรถบดอัด และความเหมาะสมแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของดิน สำหรับงานวิจัยที่ทำการศึกษาความแตกต่างของสภาพการบดอัดในห้องปฏิบัติการยังมีอยู่จำกัด เช่น Donaghe และ

Torrey (1994) Winter และคณะ (1998) และ Omotosho (2004) เป็นต้น หรือในมาตรฐานการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ได้ระบุให้ใช้แบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีปริมาณกรดที่ผสมในดินเพิ่มขึ้น โดยแบบบดอัดขนาดมาตรฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.582 นิ้วจะใช้ได้สำหรับดินที่มีปริมาณกรดที่ค่ากระแรงแกรงเบอร์ 4 ไม่เกิน 20 เปอร์เซนต์ (Proctor, 1933) แต่ผู้เขียนพบว่าไม่มีงานวิจัยที่แสดงผลทดสอบเพื่อรองรับข้อกำหนดข้างต้นได้

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ได้้นำดินสองชนิดที่มีความแตกต่างกันอย่างมากมาทำการทดสอบการบดอัดดินชนิดที่หนึ่งเป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นคือดินลูกรังตะกอนปนทราย เก็บตัวอย่างจากบ่อขุดในเขตตำบลไชยมงคล อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เป็นบ่อขุดที่ปัจจุบันยังมีการขุดดินไปใช้ในโครงการก่อสร้างโครงสร้างดินและงานทางในพื้นที่ใกล้เคียง ดินชนิดที่สองเป็นดินที่มีความเชื่อมแน่น เก็บในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการขุดเปิดหน้าดินลงไป 2-3 เมตรก่อนเก็บดินขึ้นมา

ดินชนิดที่หนึ่งสามารถจำแนกกลุ่มสัญลักษณ์ตามมาตรฐาน USCS ได้เป็น SM โดยถูกเรียกเป็นดินทรายปนดินทรายแป้ง (Silty sand) ดินชนิดที่สองสามารถจำแนกกลุ่มสัญลักษณ์ได้เป็น CH โดยถูกเรียกเป็น ดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay) หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบ X-ray diffraction เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของดิน โดยหลักการกระเจิงแสงเมื่อรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นตกกระทบ โครงสร้างของผลึกซึ่งผลึกแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างไม่เหมือนกันทำให้สามารถจำแนกองค์ประกอบของแร่ในดินที่นำมาศึกษาได้ ในการทดสอบการบดอัดจะทำโดยแยกการบดอัดดินในแบบสองขนาดที่แตกต่างกัน แต่ทั้งสองแบบจะสอดคล้องกับตามมาตรฐาน ATSM D 667 ที่แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 ทั้งขนาดของแบบ ขนาดของค้อนบดอัด จำนวนชั้นและจำนวนครั้งในการบดอัด เพียงแต่การทดสอบในงานวิจัยนี้จะใช้บดอัดดินลงในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว โดยไม่คำนึงถึงปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดิน ทั้งนี้เพื่อนำผลทดสอบทดสอบการบดอัดดินในแบบทั้งสองขนาดมาเปรียบเทียบกัน

การบดอัดดินจะทำการบดอัดแบบมาตรฐานของ Proctor (ASTM D667) โดยใช้แบบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว และใช้ค้อนบดอัดขนาดหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว น้ำหนัก 5.5 ปอนด์ ระยะตกของค้อนบดอัดเท่ากับ 12 นิ้ว ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของแบบกับพื้นที่หน้าตัดของค้อนเท่ากับ 7.1 ทำการบดอัดดินลงในแบบแยกเป็นชั้นทั้งสิ้น 3 ชั้น แต่ละชั้นใช้ค้อนบดชั้นละ 25 ครั้ง เพื่อให้ได้พลังงานต่อปริมาตรเท่ากับ 12375 ปอนด์-ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต ตามมาตรฐาน ASTM D 667 (A) ดังตารางที่ 1.1 และเพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของสภาพขอบเขตที่ต่างกัน จึงได้นำดินตัวอย่างเดียวกันมาทำการบดอัดลงในแบบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว และใช้ค้อนบดอัดขนาดหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว น้ำหนัก 5.5 ปอนด์ ระยะตกของค้อนบดอัดเท่ากับ 12 นิ้ว ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของแบบกับพื้นที่หน้าตัดของค้อนเท่ากับ 16 ทำการบดอัดดินลงในแบบแยก

เป็นชั้นทั้งสิ้น 3 ชั้น แต่ละชั้นใช้ก้อนบดชั้นละ 25 ครั้ง เพื่อให้ได้พลังงานต่อปริมาตรเท่ากับ 12375 ปอนด์-ฟุตต่อลูกบาศก์ฟุต ตามมาตรฐาน ASTM D 667 (C) ดังตารางที่ 1.1

กรวดที่ใช้ในการศึกษานี้จะเป็นกรวดที่เก็บมาจากบ่อดินบริเวณเดียวกับที่เก็บตัวอย่างดินทรายปนดินทรายแป้ง โดยนำมาล้างแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดร่อนเปิด 3/8 นิ้ว และค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 หลังจากนั้นจึงทำการคัดเอาเฉพาะกรวดที่มีรูปร่างกลม โดยปริมาณกรวดที่ผสมลงในดินทรายปนดินทรายแป้ง แสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และตารางที่ 3.2 สำหรับแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วตามลำดับ เนื่องจากดินทรายปนดินทรายแป้งที่นำมาผสมมีความชื้นประมาณ 0.012 ดังนั้นเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์กรวดจึงได้ดังแสดงในตาราง สำหรับปริมาณกรวดที่ผสมลงในดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูง แสดงดังตารางที่ 3.3 สำหรับแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และตารางที่ 3.4 สำหรับแบบบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วตามลำดับ เนื่องจากดินเหนียวที่นำมาผสมมีความชื้นประมาณ 0.088 ดังนั้นเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์กรวดจึงได้ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 3.1 ปริมาณกรวดที่ผสมลงในดินทรายปนดินทรายแป้งบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

ดินทรายปนดินทรายแป้ง [กรัม]	กรวด [กรัม]	ดินและกรวด [กรัม]	กรวดโดยน้ำหนัก [%]
4000	0	4000	0.00
3200	800	4000	20.20
2800	1200	4000	30.26
2700	1600	4000	40.30

ตารางที่ 3.2 ปริมาณกรวดที่ผสมลงในดินทรายปนดินทรายแป้งบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว

ดินทรายปนดินทรายแป้ง [กรัม]	กรวด [กรัม]	ดินและกรวด [กรัม]	กรวดโดยน้ำหนัก [%]
6000	00	6000	0.00
4800	1200	6000	20.20
4200	1800	6000	30.26
3600	2600	6000	40.30

ตารางที่ 3.3 ปริมาณกรวดที่ผสมลงในดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูงบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

ดินเหนียวความชื้นพลาสติกสูง [กรัม]	กรวด [กรัม]	ดินและกรวด [กรัม]	กรวดโดยน้ำหนัก [%]
4000	0	4000	0.00
3200	800	4000	21.51
2800	1200	4000	31.97
2700	1600	4000	42.23

ตารางที่ 3.4 ปริมาณกรวดที่ผสมลงในดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูงบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว

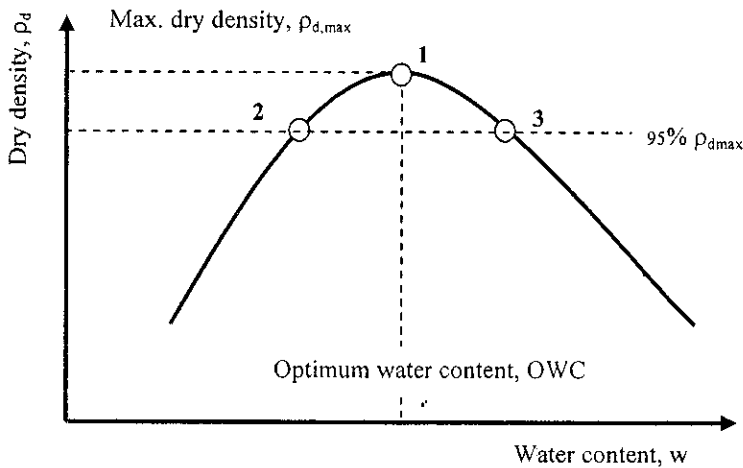
ดินเหนียวความชื้นพลาสติกสูง [กรัม]	กรวด [กรัม]	ดินและกรวด [กรัม]	กรวดโดยน้ำหนัก [%]
6000	00	6000	0.00
4800	1200	6000	21.51
4200	1800	6000	31.97
3600	2600	6000	42.23

นำดินที่ถูกบดอัดที่ความชื้นที่เหมาะสม (จุดที่ 1 ในรูปที่ 3.1) ด้วยอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของแบบบดอัดและพื้นที่หน้าตัดค้อนบดอัดต่างกันมาทำการศึกษาการกระจายขนาดโพรงในดิน โดยนำดินไปทำให้แห้งโดยวิธี Critical Point Drying, CPD (Gillott, 1969 และ Diamond, 1970) ซึ่งเป็นวิธีการไล่น้ำออกจากดินโดยไม่ทำให้ดินเกิดการหดตัว วิธี CPD ทำได้โดยนำดินไปแช่ liquid CO₂ แล้วเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิจนได้ค่าของ Critical point ที่ทำให้ liquid CO₂ เปลี่ยนเป็น Gas CO₂ เป็นผลให้โครงสร้างดินเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดในระหว่างการทำให้ดินแห้ง

การหาการกระจายโพรงในดินทำได้โดยเครื่องอัดแรงดันปรอท (Mercury porosimeter) โดยแปลงความดันปรอทเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดคาพิลลารี (Capillary tube) โดยสมการของ Washburn (1921)

$$P = -4\gamma \cos \theta / d \quad 3.1$$

โดย P คือความดันปรอท คือ γ Surface tension ของปรอท (484 dynes/cm^2) θ เป็นมุมสัมผัส (Contact angle) และ d เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดคาพิลลา



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่เก็บดินไปหาการกระจายขนาดโพรงในดิน

นอกจากดินที่บดอัดที่ความชื้นที่เหมาะสมแล้ว สำหรับการทดสอบการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะเก็บตัวอย่างดินที่ 95% ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดทั้งทางด้านแห้งซึ่งคือจุดที่ 2 ดังรูปที่ 3.1 และทางด้านเปียก (ความชื้นมากกว่า OWC) ซึ่งคือจุดที่ 3 ดังรูปที่ 3.1 ตามลำดับ เพื่อไปผ่านขบวนการไล่น้ำโดยวิธี CPD แล้วนำไปหาการกระจายขนาดโพรงในดิน ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อการบดอัดดินด้วย นอกจากนี้ตัวอย่างดินที่จุดที่ 1 จุดที่ 2 และจุดที่ 3 จะถูกนำไปดูด้วยกล้อง SEM โดยใช้ตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 mm แล้วเคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering ก่อนนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 4

ผลทดสอบ

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่นำมาศึกษา

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำดินสองชนิดที่มีความแตกต่างกันอย่างมากมาทำการทดสอบการบดอัด ดินชนิดที่หนึ่งเป็นดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่นคือดินลูกรังตะกอนปนทราย เก็บตัวอย่างจากบ่อขี้มใน เขตตำบลไชยมงคล อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เป็นบ่อขี้มที่ปัจจุบันยังมีการขุดดินไปใช้ใน โครงการก่อสร้างโครงสร้างดินและงานทางในพื้นที่ใกล้เคียง ดินชนิดที่สองเป็นดินที่มีความเชื่อมแน่น เก็บในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการขุดเปิดหน้าดินลงไป 2-3 เมตรก่อนเก็บดินขึ้นมา

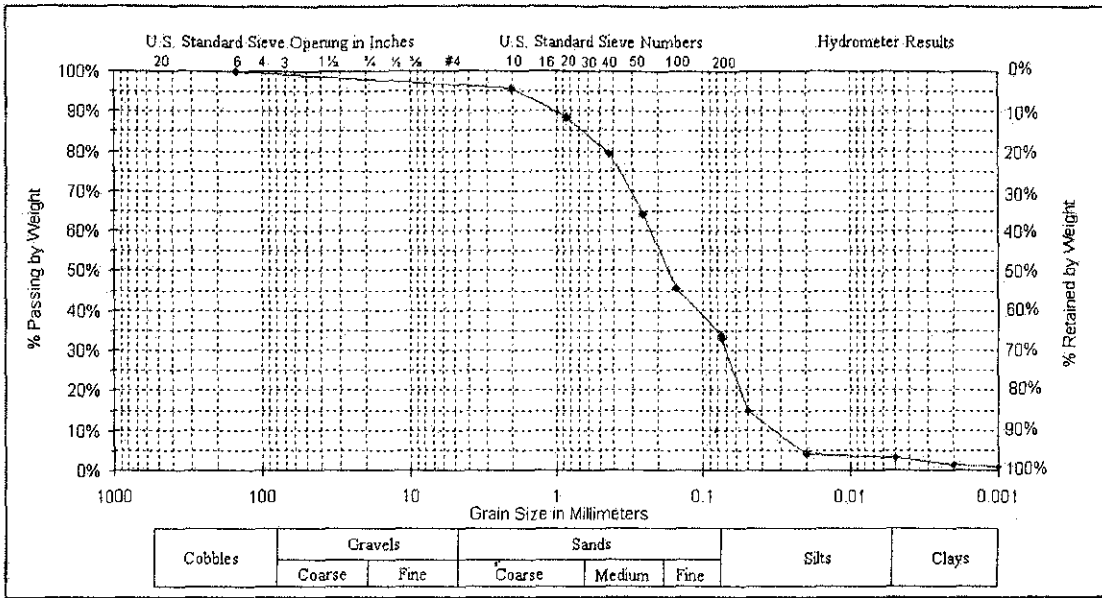
ดินชนิดที่หนึ่งสามารถจำแนกกลุ่มสัญลักษณ์ตามมาตรฐาน USCS จัดกลุ่มได้เป็น SM ซึ่งเป็นดินทรายแป้ง (Silty sand) ดินชนิดที่สองสามารถจำแนกกลุ่มสัญลักษณ์ได้เป็น CH เป็นดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay) มีการกระจายขนาดของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ คุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่างที่ 1 และดินตัวอย่างที่ 2

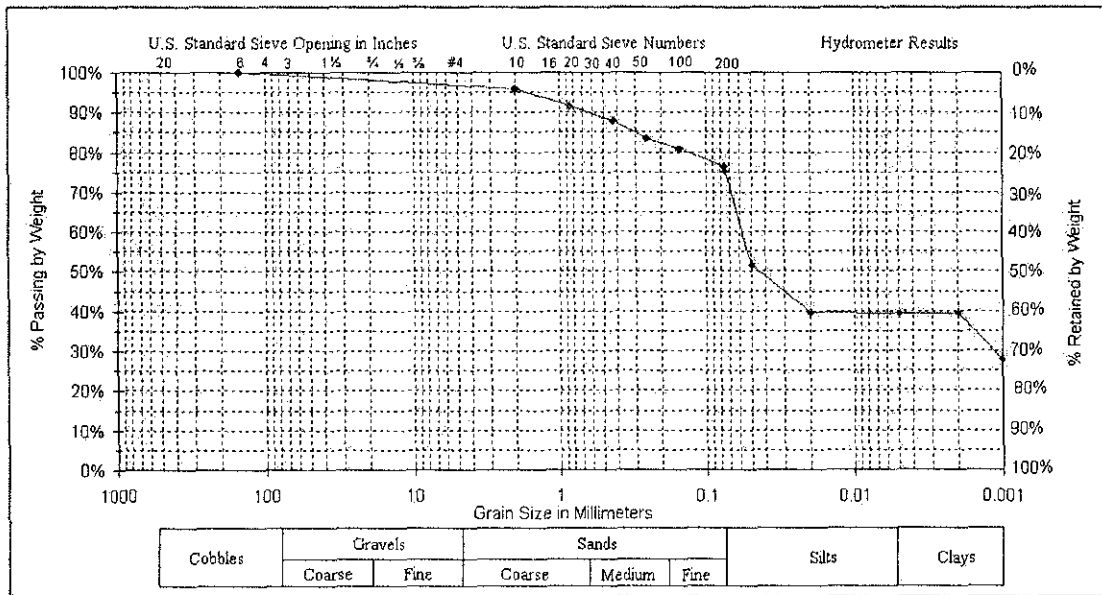
Soil Properties	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	กรวด
Physical Properties :			
1. Specific Gravity	2.67	2.70	2.62
2. Liquid Limit, %	NP	75	-
3. Plastic Limit, %	NP	25	-
Unified Soil Classification	SM	CH	

4.2 ผลทดสอบ X - ray diffraction

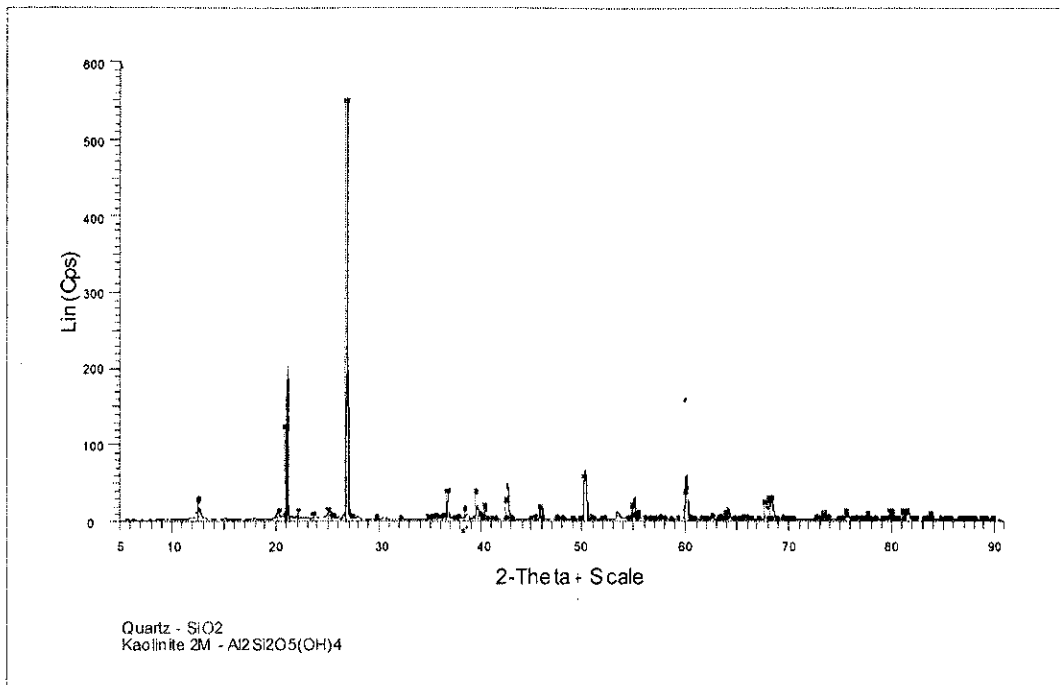
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลทดสอบ X - ray diffraction ของดินทรายปนดินทรายแป้ง (Silty sand) และดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay) ดินทรายปนดินทรายแป้ง จากการวิเคราะห์พบว่าดินทรายปนดินทรายแป้งมีแร่ Quartz (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก มุม 2θ ที่ให้ค่า Lin Counts สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 26.7 องศา สำหรับดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูงมีแร่ Silica (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก มุม 2θ ที่ให้ค่า Lin Counts สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 26.7 องศา การที่ดินทั้งสองชนิดมีแร่ Silica เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากดินทั้งสองชนิดมีทรายปนอยู่มากพอควร



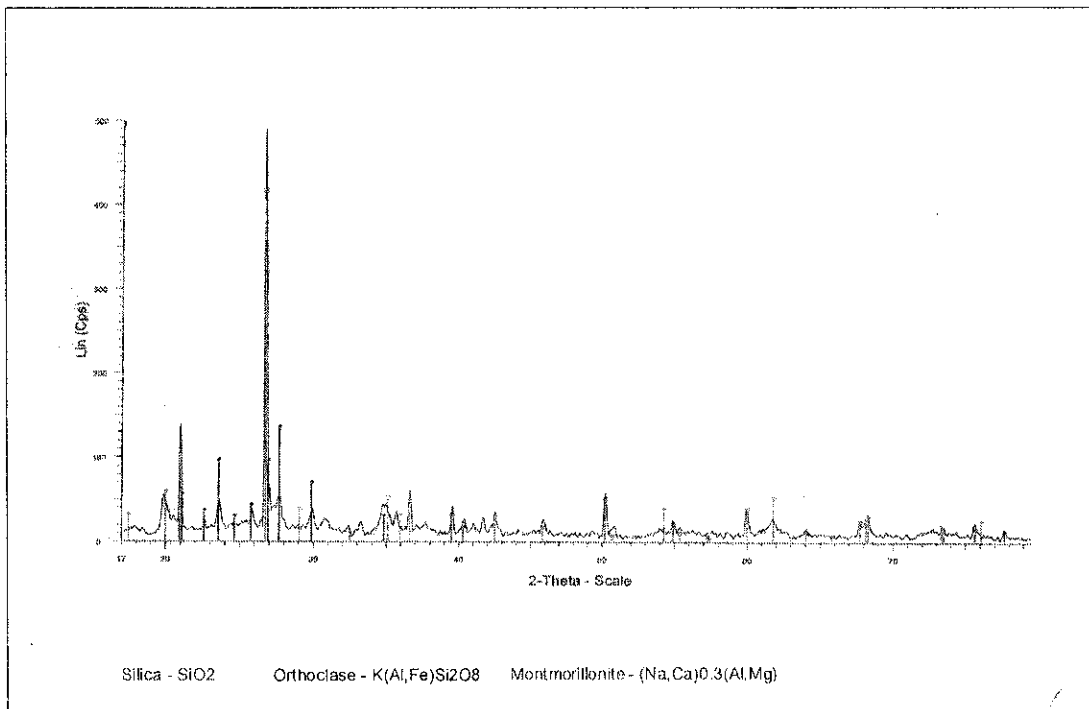
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดผละของดินทรายปนดินทรายแป้ง



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดผละของดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูง



รูปที่ 4.3 Diffractogram ของดินทรายปนดินทรายแป้ง



รูปที่ 4.4 Diffractogram ของดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูง

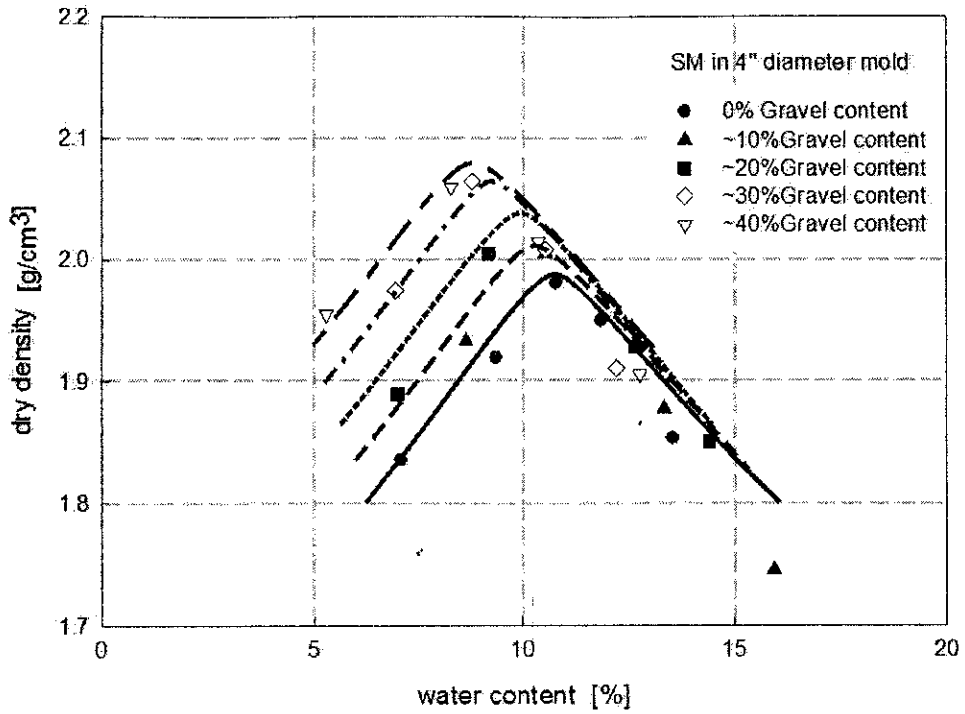
4.3 ผลทดสอบการบดอัด

4.3.1 อิทธิพลของขนาดแบบบดอัดดินที่ใช้

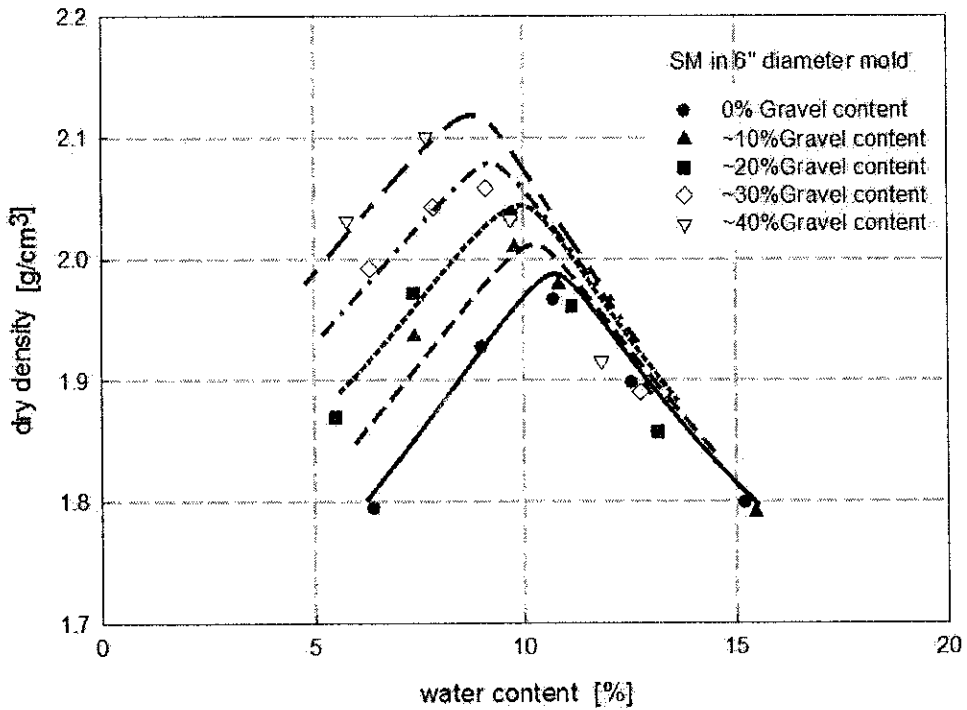
รูปที่ 4.5 แสดงผลการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งที่ปริมาณกรวดต่างๆ โดยทำการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว และบดอัดที่พลังงานต่อปริมาตรตามมาตรฐาน Proctor (12375 lb-ft/ft^3) และรูปที่ 4.6 แสดงผลการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งที่ปริมาณกรวดต่างๆ โดยทำการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว และบดอัดที่พลังงานต่อปริมาตรตามมาตรฐาน Proctor พบว่าที่ปริมาณกรวดเท่ากับ 0 % ผลการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด(Maximum Dry Density) มีค่าเท่ากับ 1.985 g/cm^3 ทั้งดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วและดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และปริมาณความชื้นเหมาะสม(Optimum Water Content) สำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วและดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วมีค่าเท่ากันเท่ากับ 10.8% โดยมีค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ที่ 80%

รูปที่ 4.7 แสดงผลการบดอัดดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงที่ปริมาณกรวดต่างๆ โดยทำการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว และบดอัดที่พลังงานต่อปริมาตรตามมาตรฐาน Proctor (12375 lb-ft/ft^3) และรูปที่ 4.8 แสดงผลการบดอัดดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงที่ปริมาณกรวดต่างๆ โดยทำการบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว และบดอัดที่พลังงานต่อปริมาตรตามมาตรฐาน Proctor พบว่าที่ปริมาณกรวดเท่ากับ 0 % ผลการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด(Maximum Dry Density) มีค่าเท่ากับ 1.53 g/cm^3 ทั้งดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วและดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว และปริมาณความชื้นเหมาะสม(Optimum Water Content) สำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วและดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วมีค่าเท่ากันเท่ากับ 25% โดยมีค่าระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ที่ 85%

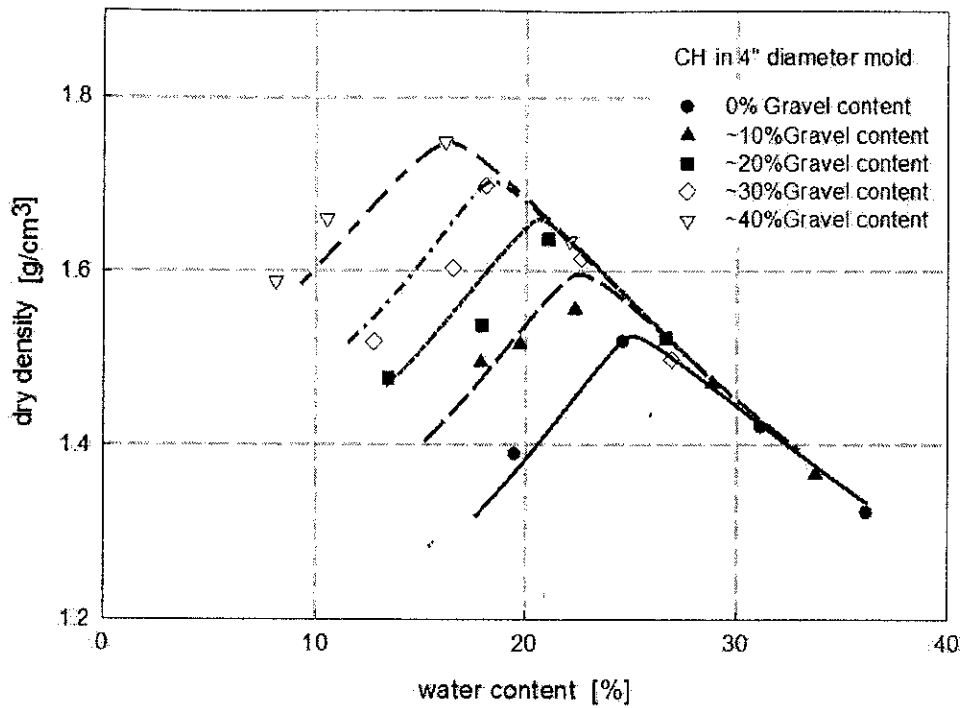
ซึ่งความหนาแน่นแห้งสูงสุดในดินที่ไม่ผสมกรวดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของแบบที่ใช้ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Donaghe และ Townsend (1976) ซึ่งระบุค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการบดอัดในแบบขนาด 4 นิ้วและ 6 นิ้วจะมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย (อยู่ในช่วง 0.06 g/cm^3) นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการบดอัดในดินทั้งสองชนิด โดยไม่ผสมกรวดเพิ่ม และทำการเปลี่ยนน้ำหนักก้อน ระยะเวลา จำนวนชั้นบดอัด พบว่าการเปลี่ยนแปลงปัจจัยข้างต้น ไม่มีผลต่อผลการบดอัดดินทั้งสอง



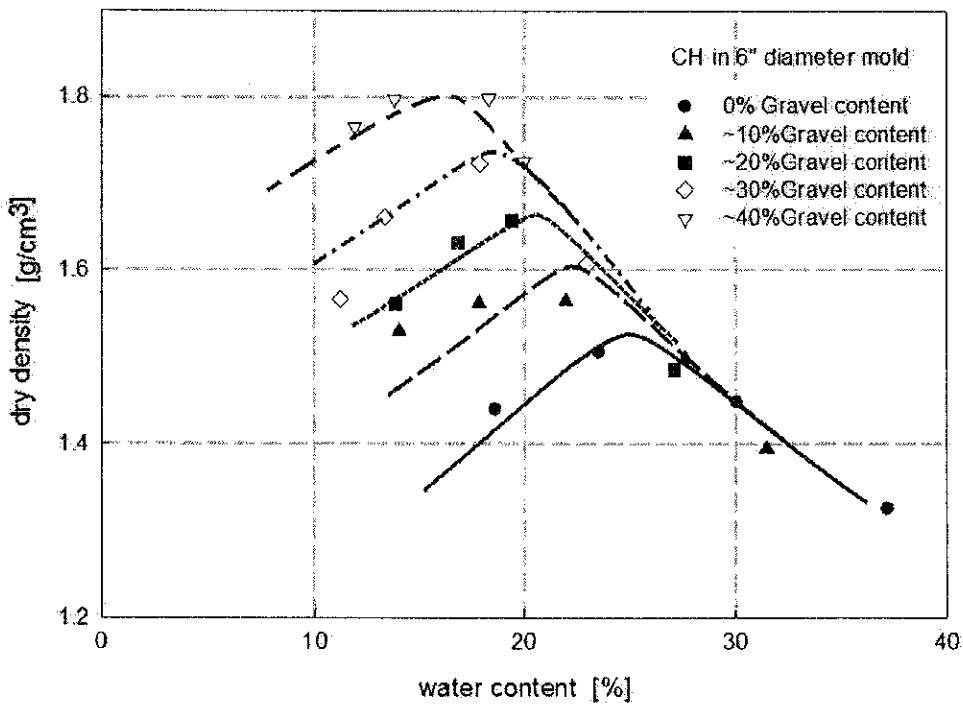
รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการบดอัดของดินทรายปนดินทรายแป้งผสมกรวดปริมาณต่างๆ บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว



รูปที่ 4.6 เส้นโค้งการบดอัดของดินทรายปนดินทรายแป้งผสมกรวดปริมาณต่างๆ บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งการบดอัดของดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงผสมกรวดปริมาณต่างๆ บดอัดในแบบ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว



รูปที่ 4.8 เส้นโค้งการบดอัดของดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงผสมกรวดปริมาณต่างๆ บดอัดในแบบ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว

4.3.2 อิทธิพลของปริมาณกรวดในดิน

จากหัวข้อที่ 4.3.1 รูปที่ 4.5 เป็นเส้นโค้งผลการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งที่ผสมกรวดในปริมาณ 0% 20% 30% และ 40% โดยประมาณ สำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และรูปที่ 4.6 เป็นเส้นโค้งผลการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งที่ผสมกรวดในปริมาณ 0% 20% 30% และ 40% โดยประมาณ สำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จากรูปเมื่อเพิ่มปริมาณกรวดที่ผสมในดินทรายปนดินทรายแข็ง ความหนาแน่นแห้งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรวดที่ผสมในดิน ในขณะที่ความชื้นที่เหมาะสมจะลดลงตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับเส้นโค้งผลการบดอัดดินเหนียวความชื้นสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 สรุปคุณลักษณะการบดอัดของดินทรายปนดินทรายแข็งที่ผสมกรวดในปริมาณต่างๆ โดยตารางที่ 4.2 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และ ตารางที่ 4.3 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จากตารางข้างต้นพบว่าสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วเมื่อผสมกรวดลงไปดินจาก 0% ถึง 40% โดยประมาณ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.97 g/cm³ เป็น 2.09 g/cm³ และสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วเมื่อผสมกรวดลงไปดินจาก 0% เป็น 40% โดยประมาณ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นจาก 1.97 g/cm³ เป็น 2.13 g/cm³

ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 สรุปคุณลักษณะการบดอัดของดินเหนียวความชื้นสูงที่ผสมกรวดในปริมาณต่างๆ โดยตารางที่ 4.3 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และ ตารางที่ 4.3 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จากตารางข้างต้นพบว่าสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วเมื่อผสมกรวดลงไปดินจาก 0% ถึง 40% โดยประมาณ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.53 g/cm³ เป็น 1.75 g/cm³ และสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วเมื่อผสมกรวดลงไปดินจาก 0% เป็น 40% โดยประมาณ ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นจาก 1.53 g/cm³ เป็น 1.80 g/cm³

ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสมของดินทรายปนดินทรายแข็งบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

Gravel content [%]	ρ_{dmax} [g/cm ³]	w_{opt} [%]	ρ'_{dmax} [g/cm ³]	w'_{opt} [%]
0.0	1.97	10.8	1.97	10.8
10.1	2.01	10.4	1.96	11.6
20.2	2.05	10.0	1.94	12.5
30.3	2.07	9.3	1.90	13.3
40.3	2.09	8.8	1.84	14.7

ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสมของดินทรายปนดินทรายแป้งบดอัด
ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว

Gravel content [%]	ρ_{dmax} [g/cm ³]	w_{opt} [%]	ρ'_{dmax} [g/cm ³]	w'_{opt} [%]
0.0	1.97	10.8	1.97	10.8
10.1	2.01	10.4	1.96	11.6
20.2	2.07	10.0	1.95	12.5
30.3	2.10	9.3	1.93	13.3
40.3	2.13	8.8	1.89	14.7

ตารางที่ 4.4 แสดงความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสมของดินเหนียวความชื้นพลาสติกสูง
บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

Gravel content [%]	ρ_{dmax} [g/cm ³]	w_{opt} [%]	ρ'_{dmax} [g/cm ³]	w'_{opt} [%]
0.0	1.53	25	1.53	25
10.1	1.60	23	1.53	25.7
20.2	1.66	21	1.51	26.8
30.3	1.71	19	1.47	27.9
40.3	1.75	17	1.41	29.4

ตารางที่ 4.5 แสดงความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นเหมาะสมของดินเหนียวความชื้นพลาสติกสูง
บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว

Gravel content [%]	ρ_d [g/cm ³]	w [%]	ρ'_d [g/cm ³]	w' [%]
0.0	1.53	25	1.53	25
10.1	1.60	23	1.53	25.7
20.2	1.67	21	1.52	26.8
30.3	1.74	19	1.50	27.9
40.3	1.80	17	1.46	29.4

ทำการคำนวณความหนาแน่นแห้งสูงสุดเฉพาะส่วนของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (Minus No.4 sieve fraction) หรือ ดินบดอัดคัดกรวด ตามสมการที่ 4.1 และความชื้นที่เหมาะสมในดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ตามสมการที่ 4.2 โดยทั้งสองสมการพิสูจน์มาจากการวิเคราะห์สถานะของส่วนประกอบในดิน จากจากปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ในดินและความหนาแน่นของกรวด

$$\rho'_d = \frac{\rho_d \rho_g}{(\rho_g - \rho_d)X + \rho_g} \quad 4.1$$

$$w' = w(1 + X) \quad 4.2$$

โดยที่ ρ'_d คือค่าความหนาแน่นแห้งในส่วนเฉพาะของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 w' คือความชื้นของดินในส่วนเฉพาะที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 X คืออัตราส่วนโดยน้ำหนักของกรวดต่อดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ρ_g ความหนาแน่นของกรวด

รูปที่ 4.9 ถึง 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและความชื้นของดินบดอัดคัดกรวด โดยรูปที่ 4.9 และ 4.10 เป็นผลทดสอบการบดอัดในดินทรายปนดินทรายแป้งที่ถูกบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วตามลำดับ และรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นผลทดสอบการบดอัดในดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงที่ถูกบดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วตามลำดับ จากรูปจะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดจะเกาะกลุ่มกันอยู่เป็นช่วงแคบๆ แต่สามารถแจกแจงรายละเอียดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดคัดกรวด ได้โดยคำนวณจากสมการที่ 4.1 และ 4.2 และแสดงผลในตารางที่ 4.2 ถึง 4.5

ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 สรุปคุณลักษณะการบดอัดของดินทรายปนดินทรายแป้งคัดกรวด โดยตารางที่ 4.2 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และ ตารางที่ 4.3 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จากตารางข้างต้นพบว่าสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงจาก 1.97 g/cm³ เป็น 1.84 g/cm³ และมีความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นจาก 10.8% เป็น 14.7% เมื่อมีกรวดผสมเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% และสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงจาก 1.97 g/cm³ เป็น 1.89 g/cm³ และมีความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 10.8% เป็น 14.7% เมื่อมีกรวดผสมเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% ส่วนคุณลักษณะการบดอัดของดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงคัดกรวดแสดงดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตารางที่ 4.4 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และตารางที่ 4.5 เป็นของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จากตารางข้างต้นพบว่าสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงจาก 1.53 g/cm³ เป็น 1.41 g/cm³ และมีความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นจาก 25% เป็น 29.4% เมื่อมีกรวดผสมเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% และสำหรับดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าลดลงจาก

1.53g/cm³ เป็น 1.46 g/cm³ และมีความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 25% เป็น 29.4% เมื่อมีกรวดผสมเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 40% ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด กับความชื้นที่เหมาะสมของดินทรายปนดินทรายแฉ่งคัดกรวด แสดงดังรูปที่ 4.13 และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด กับความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงคัดกรวดแสดงดังรูปที่ 4.14

การเพิ่มขึ้นของความชื้นที่เหมาะสมและการลดลงของความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดคัดกรวดเมื่อปริมาณกรวดที่ผสมในดินเพิ่มขึ้นส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการที่เมื่อกรวดจะรับเอาพลังงานบดอัดไปบางส่วนทำให้พลังงานบดอัดที่ถ่ายเทลงสู่ดินเม็ดเล็กมีปริมาณลดลง โดยพลังงานที่กรวดรับไว้จะมีค่าแปรตามปริมาณกรวดที่ผสมในดิน

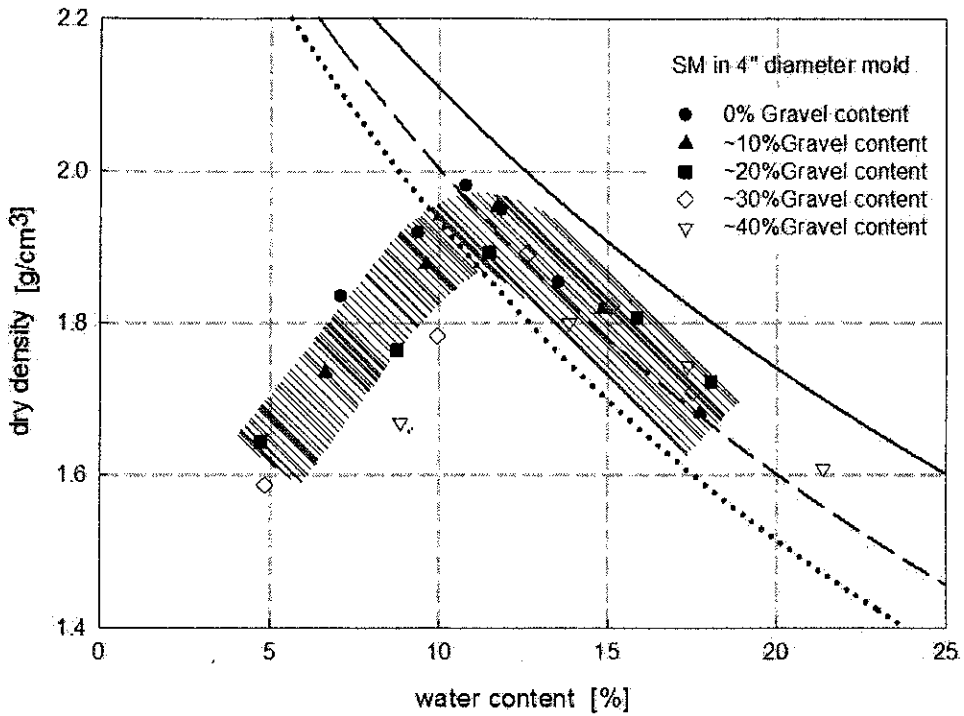
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณกรวดที่ผสมในดินของดินทรายนดินทรายแฉ่ง และดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูง แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ โดยความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นความหนาแน่นแห้งสูงสุดมวลรวมความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินคัดกรวด และความหนาแน่นแห้งสูงสุดมวลรวมตามทฤษฎีที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 ซึ่งเสนอโดย Shockley (1948) สำหรับคำนวณความหนาแน่นแห้งของดินปนกรวดที่ปริมาณกรวดต่างๆ โดยสมมติให้ช่องว่างระหว่างกรวดจะถูกเติมเต็มด้วยดินเม็ดเล็ก

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

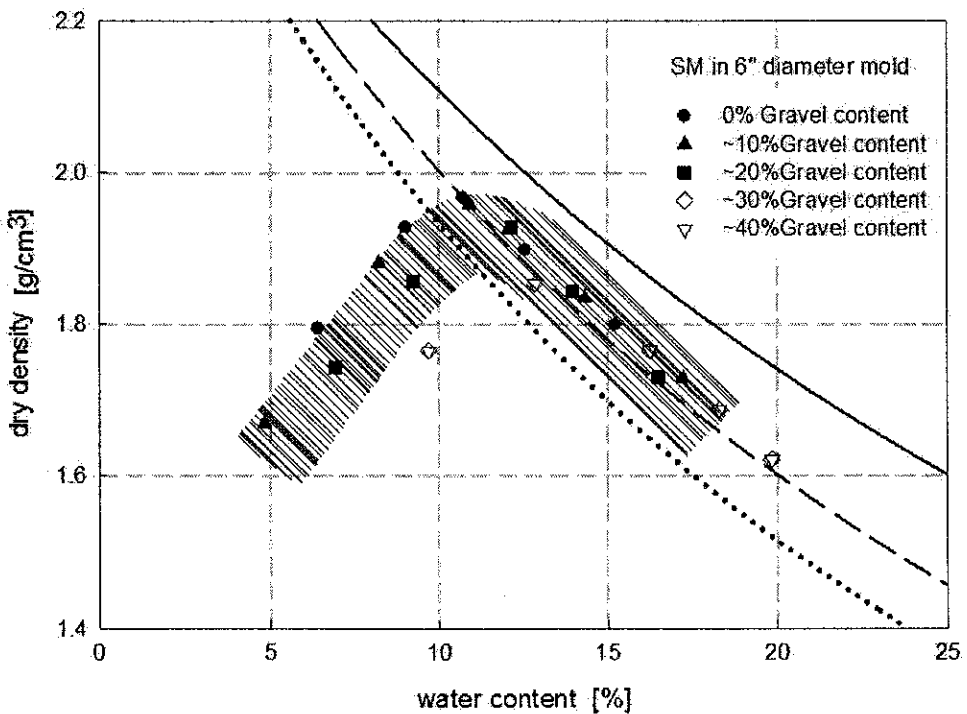
โดย $\rho_{d\max T}$ เป็นความหนาแน่นแห้งสูงสุดทางทฤษฎี P_f เป็นเปอร์เซ็นต์ของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 P_c เป็นเปอร์เซ็นต์กรวดที่ผสมในดิน และ $\rho_{d\max f}$ เป็นความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะพบว่าเมื่อปริมาณกรวดมีค่าไม่เกิน 10 % ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมวลรวมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 มีค่าเท่ากัน โดยจะเห็นได้จากค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินคัดกรวดที่ปริมาณกรวด 10% ซึ่งมีค่าแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินที่ไม่ผสมกรวด เมื่อปริมาณกรวดมีค่าถึง 20% สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดมวลรวมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 ได้ แต่มีความแตกต่างไม่มากนัก และเมื่อปริมาณกรวดมีค่ามากกว่า 20% ขึ้นไป ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดมวลรวมที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 และความหนาแน่นแห้งสูงสุดมวลรวมจากผลทดสอบ จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนและมีความแตกต่างกันเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อมีกรวดผสมในดินในปริมาณที่น้อยกว่า 10% กรวดจะยังไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของดินเม็ดเล็กในระหว่างการบดอัด แต่เมื่อปริมาณกรวดมีค่ามากกว่า 20% ขึ้นไปกรวดจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของดินเม็ดเล็กอย่างมากในระหว่างการบดอัดทำให้สามารถเห็นความแตกต่าง

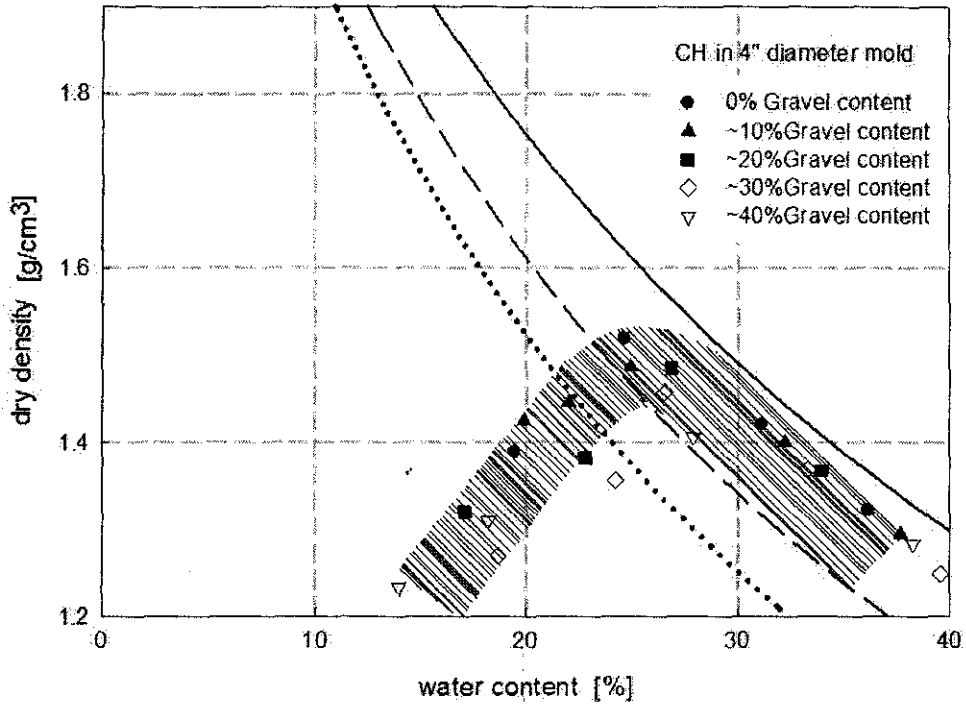
ระหว่างความหนาแน่นสูงสุดมวลรวมที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.3 กับความหนาแน่นแห้งสูงสุดมวลรวมที่วัดได้จากการทดสอบ



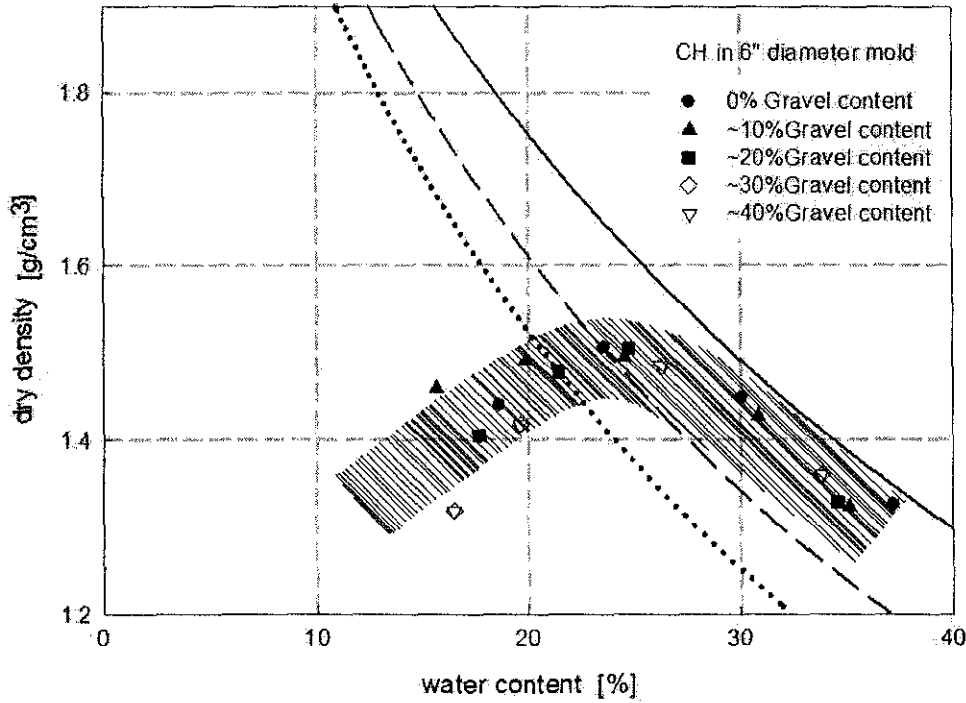
รูปที่ 4.9 เส้นโค้งการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งโดยการคัดกรวดออก ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว



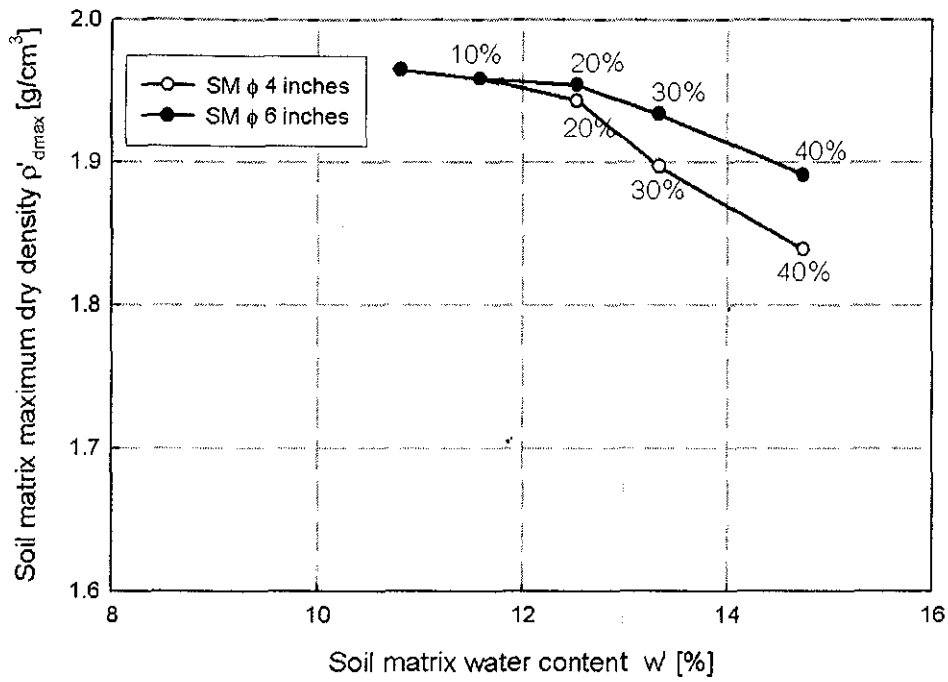
รูปที่ 4.10 เส้นโค้งการบดอัดดินทรายปนดินทรายแข็งโดยการคัดกรวดออก ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว



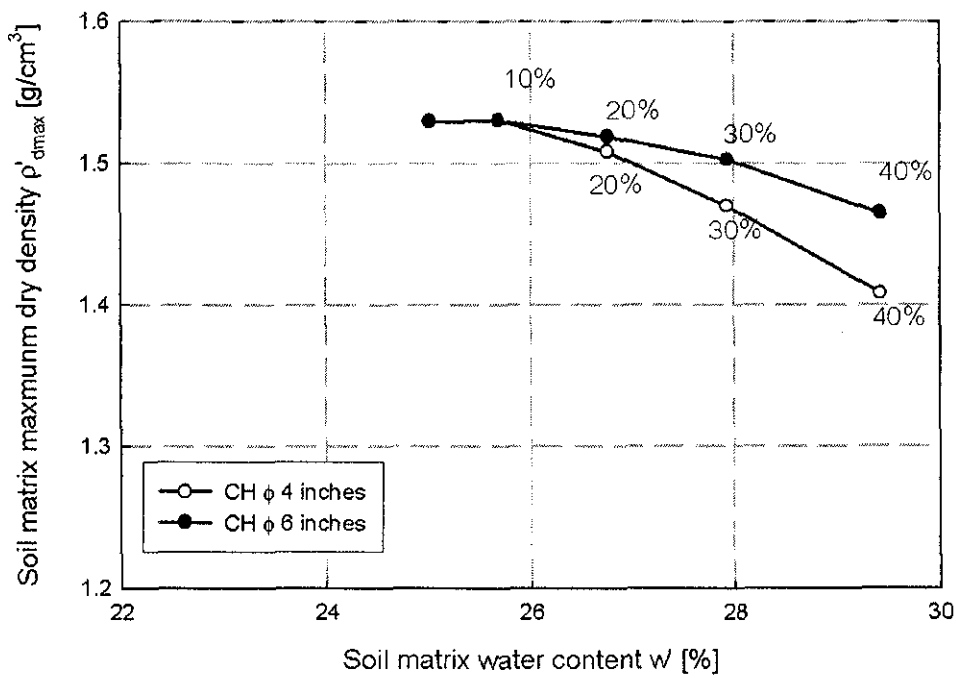
รูปที่ 4.11 เส้นโค้งการบดอัดดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูงโดยการคัดกรวดออก ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว



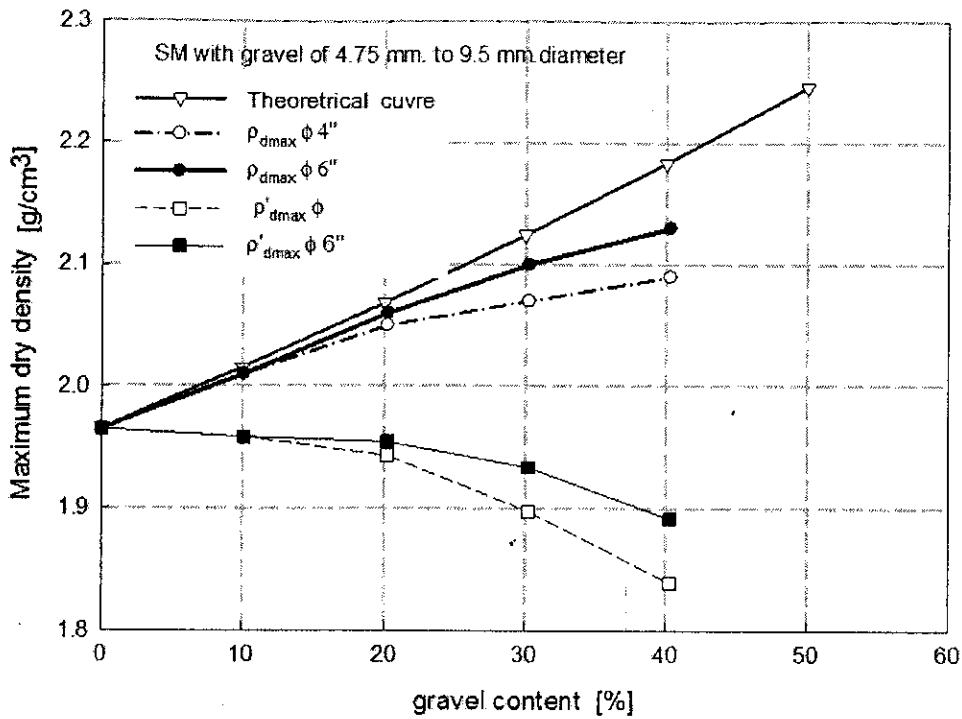
รูปที่ 4.12 เส้นโค้งการบดอัดดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูงโดยการคัดกรวดออก ในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว



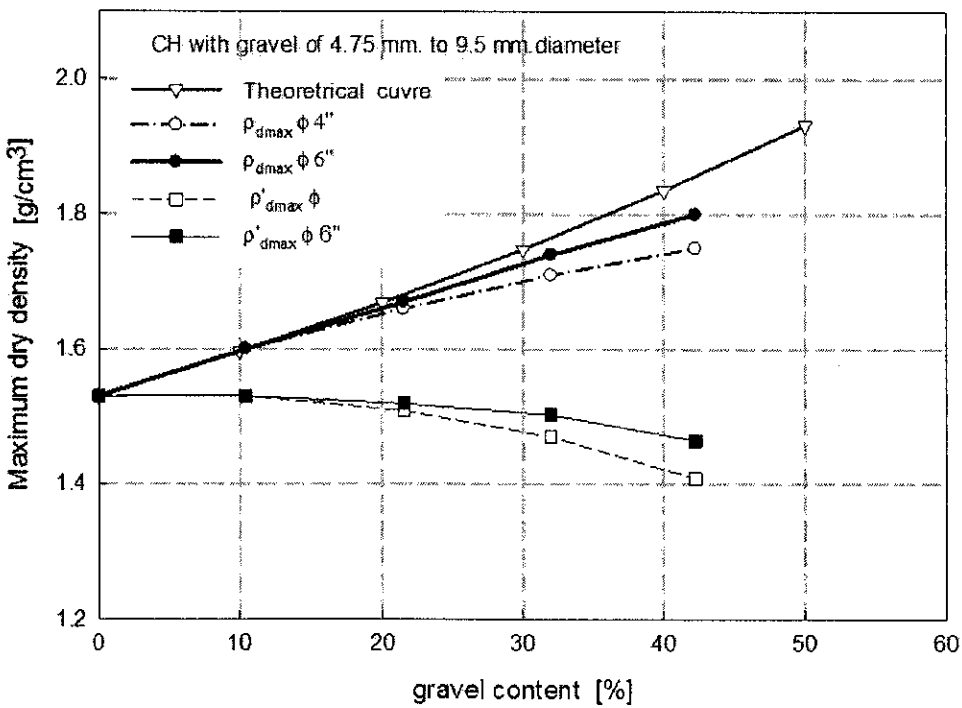
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับความชื้นที่เหมาะสมของดินทรายปนดินทรายแป้งคัดกรวด



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวความ เป็นพลาสติกสูงคัดกรวด



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดตามปริมาณกรวดระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบกับค่าทางทฤษฎีของดินทรายปนดินทรายแป้ง



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดตามปริมาณกรวดระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบกับค่าทางทฤษฎีของดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูง

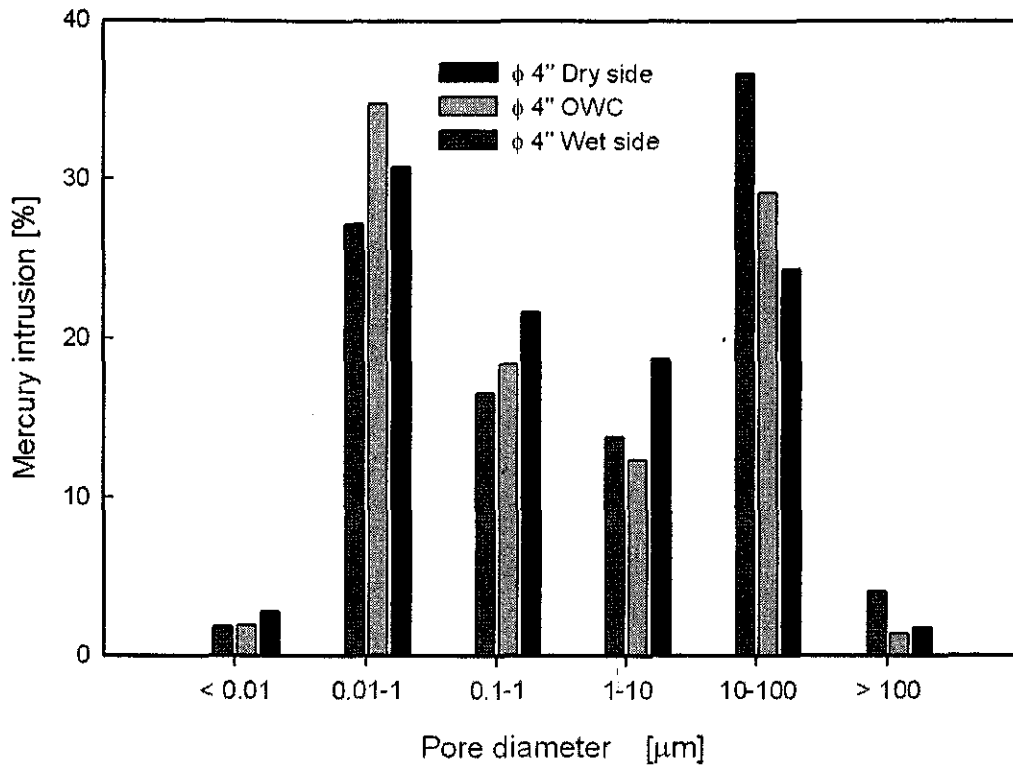
นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นแห่งสูงสุดมวลรวมของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วและของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ปริมาณกรวดมากกว่า 20% ขึ้นไป แสดงดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 สำหรับดินทรายปนดินทรายแป้ง และดินเหนียวความชื้นเป็นพลาสติกสูง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะในมาตรฐานการทดสอบการบดอัดที่กำหนดให้เปลี่ยนขนาดของแบบบดอัดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วเป็นแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้วที่ปริมาณกรวดมากกว่า 20%

4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

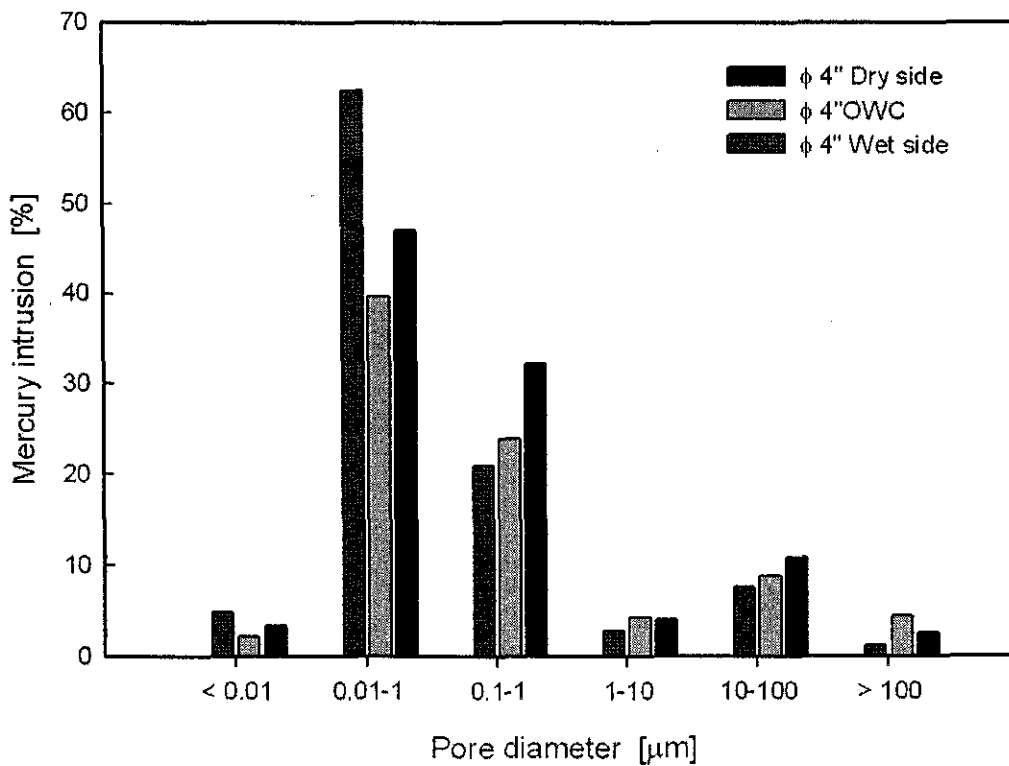
รูปที่ 4.17 การกระจายขนาดของโพรงในดินทรายปนดินทรายแป้ง โดยแสดงปริมาตรโพรงขนาดต่างๆเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาตรโพรงทั้งหมดของดินทรายปนดินทรายแป้งบดอัดภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่บดอัดที่ความชื้นต่างๆซึ่งอาจมีความหนาแน่นแห่งไม่เท่ากัน ดังนั้นการกระจายขนาดของโพรงในดินจึงแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาตรโพรงทั้งหมดในดิน แบ่งเป็นโพรงขนาดใหญ่กว่า 100 μm ขนาดระหว่าง 10 μm - 100 μm ขนาดระหว่าง 1 μm -10 μm ขนาดระหว่าง 1 μm -0.1 μm และขนาดเล็กกว่า 0.1 μm จากรูปที่ 4.17 โดยสัดส่วนของปริมาณโพรงขนาดใหญ่ (โพรงขนาดระหว่าง 10 μm ถึง 100 μm) จะเพิ่มขึ้นตามความชื้นบดอัดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่สัดส่วนของปริมาณโพรงขนาดกลางถึงเล็ก (โพรงขนาด 0.01 μm ถึง 10 μm) จะลดลง โพรงขนาดกลางถึงเล็กส่วนมากเป็นโพรงที่อยู่ระหว่างโครงสร้างดิน (Inter-aggregate pore) ซึ่งเกิดจากการจับกันของเม็ดดินเนื่องจาก Suction ในดิน การที่โพรงขนาดกลางถึงเล็กมีปริมาณลดลงน่าจะเป็นผลมาจากค่า Suction ในดินที่ลดลงตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น และจากการลดลงของ Suction ในดินเป็นผลให้การจับตัวกันระหว่างเม็ดดินลดลง ทำให้โพรงระหว่างโครงสร้างเม็ดดินลดลงตามไปด้วย ในขณะที่โพรงขนาดใหญ่ส่วนมากเป็นโพรงระหว่างเม็ดดิน (Inter-pellet pore) ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องจากการลดลงของ Suction ในดินเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้การจับตัวระหว่างโครงสร้างดินลดลง โพรงส่วนใหญ่ในดินจึงเป็นโพรงระหว่างเม็ดดิน เป็นผลให้สัดส่วนของปริมาณโพรงขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีโพรงอีกประเภทซึ่งเป็นโพรงขนาดเล็กมาก มีขนาดเล็กกว่า 0.01 μm จากรูปที่ 4.17 จะพบว่าปริมาณโพรงขนาดนี้มีได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะเมื่อความชื้นบดอัดดินเปลี่ยนแปลงไป

รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายขนาดของโพรงขนาดต่างๆเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาตรโพรงทั้งหมดในดินเหนียวบดอัดภายใต้เงื่อนไขการบดอัดต่างๆ แบ่งโพรงออกเป็นโพรงขนาดต่างๆดังนี้ โพรงขนาดใหญ่กว่า 100 μm ขนาดระหว่าง 10 μm -100 μm ขนาดระหว่าง 1 μm -10 μm ขนาดระหว่าง 1 μm -0.1 μm และขนาดเล็กกว่า 0.1 μm จากรูปที่ 4.18 พบว่าโพรงขนาดใหญ่กว่า 1 μm เป็นโพรงส่วนน้อยในดินเหนียวบดอัด โพรงที่มีขนาดระหว่าง 0.01 μm -1 μm เป็นโพรงส่วนใหญ่ในดินเหนียวบดอัด และพบว่าเมื่อความชื้นในดินบดอัดเพิ่มขึ้นสัดส่วนของโพรงที่มีขนาดระหว่าง 0.01 μm ถึง 0.1 μm

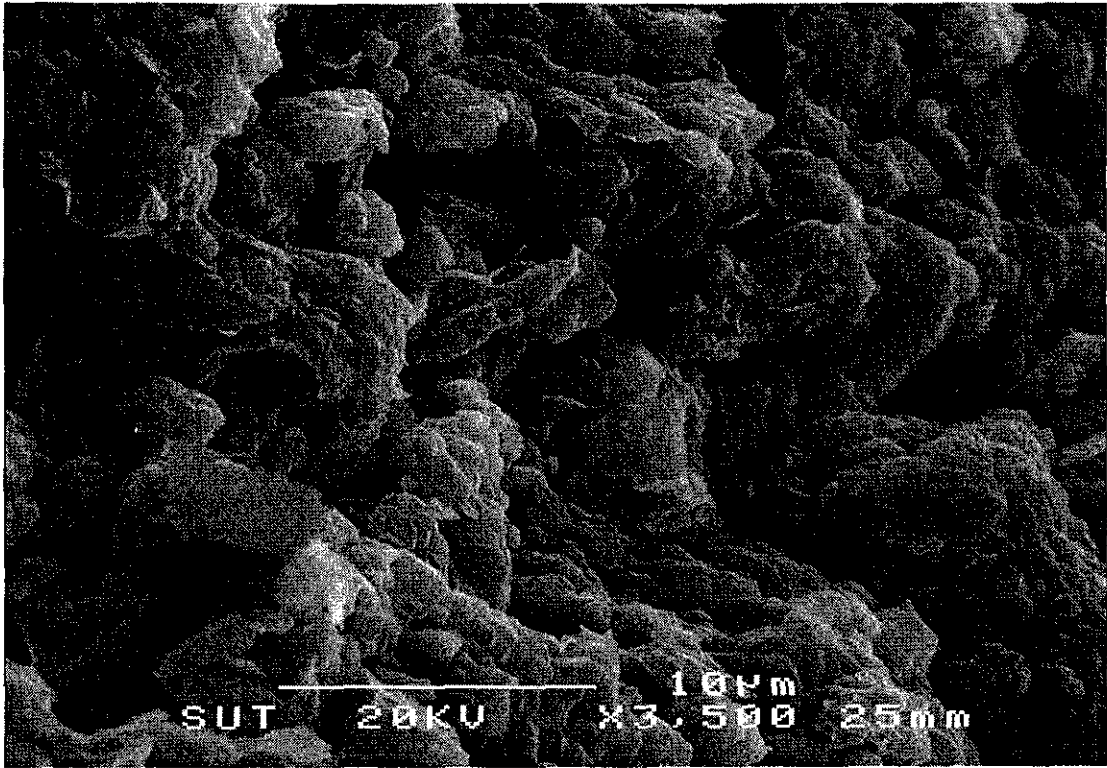
จะเพิ่มขึ้น ส่วนสำคัญของโพรงที่มีขนาดระหว่าง $0.1 \mu\text{m}$ ถึง $1 \mu\text{m}$ กลับลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะการจัดเรียงโครงสร้างของดินบดอัดเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความชื้นเปลี่ยนไป รูปที่ 4.19 แสดงการจัดเรียงโครงสร้างของดินบดอัดด้วยความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งจะเห็นว่ามีดินลักษณะจับกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) ในขณะที่ดินเหนียวที่บดอัดด้วยความชื้นสูงกว่าความชื้นที่เหมาะสม จะมีการจับกันของอนุภาคเม็ดดินที่เป็นระเบียบมากกว่า ดังรูปที่ 4.18 และหากเปรียบเทียบกันระหว่างรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แล้วจะเห็นได้ชัดเจนว่าโพรงขนาดระหว่าง $0.1 \mu\text{m}$ - $1 \mu\text{m}$ ในรูปที่ 4.19 จะมีมากกว่าในรูปที่ 4.20



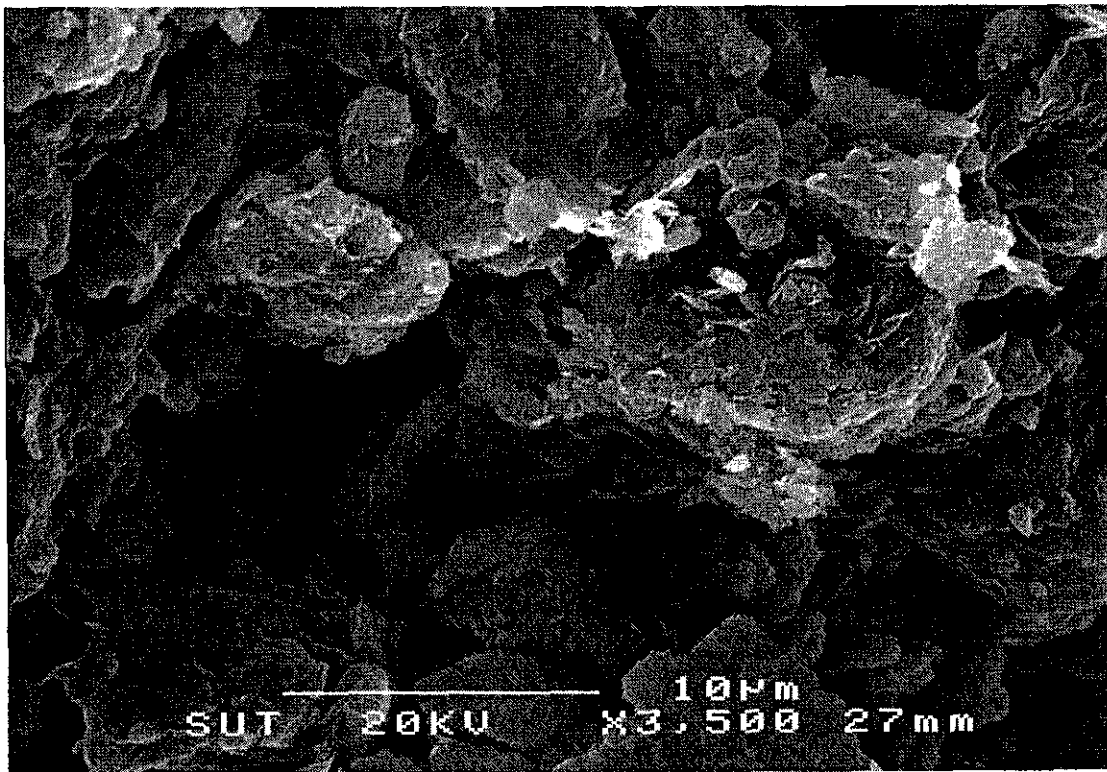
รูปที่ 4.17 การกระจายขนาดโพรงในดินทรายปนดินทรายแป้ง



รูปที่ 4.18 การกระจายขนาดโพรงในดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูง



รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงบดอัดทางด้านแฉ่ง



รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวความเป็นพลาสติกสูงบดอัดทางด้านเป็ยก

บทที่ 5

สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของสภาพขอบเขตในการบดอัดซึ่งกำหนดไว้ในมาตรฐานทดสอบการบดอัดดินได้แก่ขนาดของแบบที่ใช้ในการบดอัดดิน ซึ่งตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ กำหนดให้ขนาดของแบบที่ใช้ในการบดอัดขึ้นกับปริมาณกรวดที่ผสมอยู่ดิน โดยต้องมีการเปลี่ยนขนาดของแบบที่ใช้ตามมาตรฐานทดสอบการบดอัดดิน จากผลการทดสอบจะเริ่มสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างคุณลักษณะการบดอัดของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และคุณลักษณะการบดอัดของดินที่บดอัดในแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เมื่อปริมาณกรวดที่ผสมในดินมีค่าเกินกว่า 20% นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของแบบบดอัดไม่มีผลกระทบต่อผลการบดอัดดินเมื่อปริมาณกรวดในดินมีค่าน้อยกว่า 20% ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในมาตรฐานทดสอบการบดอัดดินทั้งกับดินเหนียวและกับดินที่ไม่มีความเชื่อมโยงแน่น ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของดินบดอัด พบว่าในดินไม่มีความเชื่อมโยงแน่นการกระจายโพรงมีลักษณะเป็นแบบ Bimodal โดยมีปริมาณโพรงขนาดใหญ่และปริมาณโพรงขนาดเล็กในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของปริมาณโพรงขนาดใหญ่และปริมาณโพรงขนาดเล็กน่าจะขึ้นกับการกระจายขนาดของเม็ดดินของดินที่ไม่มีความเชื่อมโยงแน่นด้วย ในขณะที่ดินเหนียวการกระจายโพรงกลับมีลักษณะเป็น Unimodal โดยมีปริมาณโพรงขนาดเล็กเป็นปริมาณโพรงส่วนใหญ่ในดิน อย่างไรก็ตามพบว่าถึงแม้ดินทั้งของประเภทจะมีโครงสร้างทางจุลภาคแตกต่างกันแต่ผลกระทบเนื่องจากสภาพขอบเขตต่อคุณลักษณะการบดอัดของดินทั้งสองประเภทมิได้ขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคของดิน

เอกสารอ้างอิง

- AASHTO (1970, 1986), Standard Specification for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing, part 1.
- ASTM (1985), 1985 Annual Books of ASTM Standards, Section 4, Construction, Volume 04.08, Soil and Rock; Building Stones.
- Barden, L. and Sides, G.R. (1970), Engineering behavior and structure of compacted clay. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96, No. SM4, pp. 1171.
- Basheer, I.A. (2001), Empirical modeling of the compaction curve of cohesive soils. Can. Geotech. J., Vol. 38, pp. 29-45.
- Diamond, S. (1970) Pore-size distribution in clays: Clays and Clay Minerals 18, 7-23
- Diaz-Zorita, M., Grove, J.H., Perfect, E. (2001), Laboratory compaction of soil using small mold procedure. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 65, pp. 1593-1598.
- Donaghe, R.T., 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 materials, pp. 248-277.
- Donaghe, R.T., Torrey, V.H. (1994), A compaction test method for soil-rock mixtures in which equipment size effect are minimized. Geotechnical Testing Journal, Vol. 17, No.3, pp. 363-370.
- Gillott, J.E. (1969), Study of fabric of fine-grained sediments with a scanning electron microscope: J. Sediment. Petrol. 39, 90-105.
- Gurtag, Y., Sridharan, A. (2002), Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils, Geotechnique, Vol. 52, No. 10, pp. 761-763.
- 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.

- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. (1981), *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 733 pp.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Katkan, W.(2005), Phenomenological modeling of compaction curve, *Proc. Ground Improvement and Geosynthesis*, Bangkok, Thailand, pp. 131-137.
- Johnson, A.W. and Sallberg, J.R. (1960), Factors that Influence Field Compaction of Soils: Compaction Characteristics of Field Equipment, Bulletin No. 272, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Langfelder, L.J., Chen, C.F., Justice, J.A. (1968), Air permeability of compacted cohesive soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94, No. SM4, pp. 999.
- Lewis, W.A. (1960), Full scale compaction studies at the British Road Research Laboratory, Highway Research Board Bulletin No. 254, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-12.
- Olson, R.E (1963), Effective stress theory of soil compaction, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 89, No. SM2, pp. 27-45.
- Omotosho, O. (2003), Influence of gravelly exclusion on compaction of lateritic soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 22, pp. 351-359.
- 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 size. Technical Data Sheet No. 2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, June, 1948.
- Sridharan, A., Sivapullaiah, P. V. (2005), Mimi compaction test apparatus for fine grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 3, pp. 240-245.
- Teidemann, D.A. and Fink, R.E. (1969), Compaction of Cohesive Soil with Vibratory Roller – Cawker City Test Embankment, Report No. EM-766, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Waterways Experiment Station (1949), Soil Compaction Investigation: Compaction studies on silty clay, report No. 2, Technical memorandum No. 3-271, U.S. Corps of Engineers, Vicksburg, Miss.

Washburn, E.W. (1921), The dynamics of capillary flow, The Physical Review, Vol. 17 No.3, pp. 273-283.

Winter, M.G., Holmgeirsdttir, Th., Suhardi (1998), The effect of large particles on acceptability for earthwork compaction. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 31, pp. 247-268.

ประวัตินักวิจัย

นายอวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2516 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(เกียรตินิยม) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี 2539 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมปฐพี จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ในปี 2541 และวิศวกรรมคหุฎิบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ในปี 2548

นายอวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ได้เริ่มปฏิบัติงานในตำแหน่งอาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี 2541 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผลงานวิจัยที่ผ่านมาคือแบบจำลองการไหลและการเสียดรูปในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยการหาคุณลักษณะการอุ้มน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้แบบจำลองย้อนกลับ ปัจจุบันมีผลงานวิจัยตีพิมพ์ในระดับนานาชาติกว่า 10 เรื่อง และมีส่วนร่วมในโครงการก่อสร้างและโครงการที่ปรึกษาหลายโครงการ