



รายงานการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของสารจีโอพอลิเมอร์

ต่อการเพิ่มกำลังเฉือนของดินบดอัด

Efficacy of geopolymer on shear strength enhancement
of compacted soils

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของสารจีโอฟอลิเมอร์

ต่อการเพิ่มกำลังเฉือนของดินบดอัด

Efficacy of geopolymer on shear strength enhancement
of compacted soils

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดโช เผือกภูมิ

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2558 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบ และนางณิชชาภัทร สิทธิคุณ ในการตรวจสอบความถูกต้องของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กรกฎาคม 2560



บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพการบดอัดดินและเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารจีโอโพลีเมอร์ต่อการเสริมสร้างกำลังเฉือนของดินบดอัดดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ดินเหนียวที่มีพลาสติคิตีสูง (High plasticity clay, CH) ดินตะกอนที่มีพลาสติคิตีสูง (High plasticity silt, MH) และดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ โนนิลฟีนอลอีทอกซิเลต (Nonyl Phenol Ethoxylate) คอนเอต (CON-AID) และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulfate) สารจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบเกิดจากการนำเถ้าถ่านหิน (Fly ash) ผสมกับตัวกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AL) ซึ่งเกิดการผสมกันระหว่างโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) อัตราส่วน 1:1

จากการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพการบดอัดดิน โดยผันแปรความเข้มข้น 4 ระดับ (5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก สำหรับโนนิลฟีนอลอีทอกซิเลต และคอนเอต และ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์ สำหรับโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต) ผลการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานระบุว่าโนนิลฟีนอลอีทอกซิเลตและโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตไม่มีประสิทธิภาพที่จะทำให้ความหนาแน่นของการบดอัดเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามกลับส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดมีค่าลดลงและยังทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ของดินบดอัดมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับผลจากการบดอัดด้วยน้ำบริสุทธิ์ ส่วนคอนเอตซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบนั้น หากใช้ในระดับที่มีความเข้มข้นสูง (มากกว่า 20%) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินเม็ดละเอียด (ดินเหนียวที่มีค่าพลาสติคิตีสูงและดินตะกอนที่มีพลาสติคิตีสูง) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลจากการบดอัดด้วยน้ำบริสุทธิ์

จากการศึกษาประสิทธิภาพของจีโอโพลีเมอร์ต่อการเสริมสร้างกำลังเฉือนของดินบดอัดดินนั้น การทดสอบได้นำเถ้าถ่านหินผสมกับดินอัตราส่วนคงที่เท่ากับ 1:10 จากนั้นนำส่วนผสมนี้ไปทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วยสารกระตุ้นอัลคาไลน์ที่ผสมกับน้ำด้วยอัตราส่วนคงที่เท่ากับ 1:10 ในการทดสอบได้ผันแปรปริมาณสารละลายอัลคาไลน์จนกระทั่งได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และนำค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมนี้ไปบดอัดดินและทดสอบลอบกำลังเฉือนภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากเท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 MPa ในสภาวะที่ไม่มีกำบดตัวอย่างและมีการบดตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน ผลการศึกษาระบุว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินทรายผสมดินตะกอนและดินตะกอนที่มีพลาสติคิตีสูงที่บดอัดโดยใช้เถ้าถ่านหินและสารจีโอโพลีเมอร์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างดินที่ทำการบดอัดด้วยน้ำบริสุทธิ์ ส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวที่มีค่าพลาสติคิตีสูงที่ทำการบดอัดด้วยเถ้าถ่านหินและสารจี

โอพอลิเมอร์มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบผลจากการทดสอบการบดอัดด้วยน้ำบริสุทธิ์ และค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ผสมกับเถ้าถ่านหินและสารจีโอโพลิเมอร์ในสภาวะที่ปมตัวอย่างดินบดอัดเป็นเวลา 7 วัน มีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างดินที่บดอัดด้วยน้ำบริสุทธิ์ประมาณสองเท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินผสมสารจีโอโพลิเมอร์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินได้ โดยการเพิ่มความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายในจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำเถ้าถ่านหินและตัวกระตุ้นอัลคาไลน์ จากเทคนิคดังกล่าวกล่าวได้ว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้สารจีโอโพลิเมอร์ สำหรับการเสริมสร้างความแข็งแรงของเขื่อนดิน ความลาดชันของมวลดิน และมวลดินใต้ฐานรากเขื่อน



Abstract

The purpose of this research are to study the effect of surfactants on soil compaction efficiency and to study the efficiency of geopolymers on the shear strength of compacted soil. Soil samples use here are high plasticity clay (CH), high plasticity silt (MH), and silty sand (SM). The surfactants used here are Nonyl Phenol Ethoxylate, CON-AID, and Sodium Dodecyl Sulfate. The geopolymer used in this study is fly ash mixed with alkaline activator which this is the mixture of Sodium Hydroxide (NaOH) and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) with ratio of 1:1.

For the experimentally to study the effect of surfactants on soil compaction efficiency, the surfactant concentrations are varied 4 levels (5%, 10%, 15% and 20% by weight for Nonyl Phenol Ethoxylate and CON-AID and 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 molar for Sodium Dodecyl Sulfate). The modified compaction test results indicated that the soil compaction using Nonyl Phenol Ethoxylate and Sodium Dodecyl Sulfate has not capability to increasing the compacted soil density. On the other hand, the maximum dry densities are reduced and the optimum moisture content of the compacted soil changed as comparing to the compaction test results using tap water. CON-AID, which is anionic surfactant, can be increased the maximum dry density of fine grained soils (high plasticity clay and high plasticity silt) for high concentrations (more than 20%) as comparing with the test results using tap water.

Based on the study of the efficiency of the geopolymer on shear enhancement of the compacted soils, fly ash is mixed with the soil at a constant ratio of 1:10 and then performed the modified proctor test using alkaline activator mixed with water at a constant ratio of 1:10. The amount of alkaline solution is varied until the appropriate moisture content was obtained. This optimum moisture content was then applied to the soil for compaction and shearing test. The normal stresses are varied from 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 MPa for direct shear test on compacted samples under non-curing state and curing for 7 days. The results indicate that the optimum moisture content of silty sand and high plasticity silt mixed with fly ash based geopolymer is slightly higher than those of sample mixed with tap water. The optimum moisture content of high plasticity clay is however slightly decrease when they were mixed with fly ash based geopolymer. Soils mixed with fly ash based geopolymer tend to give a

higher state of the peak shear strength for curing sample about two times of soils mixed with tap water. This suggests that the fly ash based geopolymer can be enhancing the shear strength of soils by increasing of cohesion and friction angle by chemical reactions between tap water, fly ash and alkaline activator. Soil improvement techniques using geopolymer can be applied for strengthening the soil embankment, soil slope and earth dam foundation.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 ทฤษฎีการבודัดดินของ Proctor.....	7
2.3 เส้นโค้งการבודัดดิน.....	8
2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการבודัดดิน.....	9
2.5 พลังงานการבודัด.....	11
2.6 มาตรฐานก่อสร้างทั่วไป.....	13
2.7 การก่อสร้างและการבודัด ชั้นโครงสร้างทาง.....	14
2.8 งานศึกษาและการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารลดแรงตึงผิวในการבודัด.....	15
2.9 งานศึกษาและการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารจีโอพอลิเมอร์ในการבודัด.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ตัวอย่างดินและสารเคมี	20
3.1 กล่าวนำ.....	20
3.2 ตัวอย่างดิน เถ้าลอย และสารอัลคาไลน์.....	20
บทที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐานและการจำแนกประเภทของดิน	24
4.1 กล่าวนำ.....	24
4.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน.....	24
4.2.1 การหาปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ.....	24
4.2.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดิน.....	25
4.2.3 การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก.....	25
4.2.4 การหาขนาดคละของดิน.....	25
4.3 การจำแนกประเภทของดิน.....	27
บทที่ 5 การทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิว	29
5.1 กล่าวนำ.....	29
5.2 วิธีการทดสอบ.....	29
5.3 ผลการทดสอบ.....	30
5.3.1 ผลการทดสอบดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง.....	30
5.3.2 ผลการทดสอบดินทรายปนดินตะกอน.....	32
5.3.3 ผลการทดสอบดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง.....	32
5.4 สรุปผลการทดสอบ.....	39
บทที่ 6 การทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์	40
6.1 กล่าวนำ.....	40
6.2 การจัดเตรียมตัวอย่างและสารจีโอพอลิเมอร์.....	40
6.3 การทดสอบการบดอัดดิน.....	41
6.4 ผลการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 การทดสอบกำลังเฉือนของดินจากการบดอัดด้วยสารจีโอพอลิเมอร์.....	44
7.1 กล่าวนำ.....	44
7.2 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนแบบสามวงแหวน.....	44
7.3 การทดสอบกำลังเฉือน.....	46
7.4 ผลการทดสอบกำลังเฉือนและการวิเคราะห์ผล.....	47
บทที่ 8 สรุปผลงานวิจัย.....	54
8.1 สรุปและวิจารณ์ผล.....	54
8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	55
บรรณานุกรม.....	56
ประวัตินักวิจัย.....	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (2549).....	12
2.2	ข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (2549).....	12
2.3	ขนาดคละของหินคลุก (มทช.206-2554).....	13
2.4	ขนาดคละของวัสดุรองพื้นทางลูกรัง (มทช.203-2554).....	14
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Phummiphan, 2014)...	22
4.1	ตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์การคละขนาดของดินเม็ดหยาบ.....	26
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วยระบบ Unified Soil Classification (USCS).....	28
4.3	คุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วยระบบ The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).....	28
5.1	ค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินเหนียวที่มีพลาสติกซิติสูง (High plasticity clay, CH) ที่ทำการบดอัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด.....	36
5.2	ค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) ที่ทำการบดอัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด.....	37
5.3	ค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินตะกอนที่มีพลาสติกซิติสูง (High plasticity silt, MH) ที่ทำการบดอัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด.....	38
6.1	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดินทั้ง 3 ชนิด โดยใช้น้ำและสารจีโอพอลิเมอร์.....	42
7.1	เปรียบเทียบค่าความชื้นที่เหมาะสมที่วัดได้จากแบบเหล็กมาตรฐานและค่าความชื้นของตัวอย่างที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างดินบดอัดที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	48
7.2	เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่วัดได้จากแบบเหล็กมาตรฐานและค่าความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างดินบดอัดที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน.....	48
7.3	ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานภายในของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทดสอบโดยไม่มีกรรมและบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน.....	53

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (Typical compaction curve)..... 8
2.2	เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ..... 10
2.3	กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ (Horpibulsuk et al., 2005)..... 11
3.1	ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด สำหรับใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ..... 21
3.2	แสดงตัวอย่างดินที่ถูกจัดเตรียมไว้เพื่อการทดสอบการบดอัด (ก) ดินจากบ้านหนองบง อำเภอมือง จังหวัดนครราชสีมา (ข) ดินตะกอนประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ และ (ค) ดินจากด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา (ก่อนทำการทุบให้เพื่อย่อยดินและร่อนผ่านตะแกรง)..... 21
3.3	การกระจายขนาดของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดิน..... 22
3.4	สารอัลคาไลน์ (Alkaline liquid, AL) หรือสารกระตุ้น ที่ใช้ในการบดอัดโดยนำมาผสมกับเถ้าถ่านหิน (Coal fly ash) ซึ่งส่วนผสมนี้จะเรียกว่าสารจีโอพอลิเมอร์..... 23
4.1	การกระจายตัวของเม็ดดินที่ได้จากการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงและวิธีไฮโดรมิเตอร์ (1) ดินจากบ้านหนองบง ตำบลสุรนารี อำเภอมือง นครราชสีมา (2) ดินตะกอนประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ (3) ดินจากบ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย นครราชสีมา..... 27
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) โดยใช้สาร Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก..... 31
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) โดยใช้สาร CON-AID ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก..... 31
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) โดยใช้สาร Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์..... 32

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) โดยใช้สาร Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก.....	33
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) โดยใช้สาร CON-AID ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก.....	33
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) โดยใช้สาร Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์.....	34
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินตะกอนที่มีพลาสติกซิติสูง (High plasticity silt, MH) โดยใช้สาร Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก.....	34
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินตะกอนที่มีพลาสติกซิติสูง (High plasticity silt, MH) โดยใช้สาร CON-AID ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก.....	35
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินตะกอนที่มีพลาสติกซิติสูง (High plasticity silt, MH) โดยใช้สาร Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์.....	35
6.1 การจัดเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมรวมและสารละลายตัวกระตุ้นอัลคาไลน์.....	41
6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (ก) แบบเหล็ก (ข) ภาพตัดขวางแบบเหล็กมาตรฐาน (ค) ดัชนีที่ใช้ในการบดอัด.....	41
6.3 ผลการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์และน้ำ.....	43
7.1 แบบเหล็กทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร จำนวนสามวงแหวน และมีส่วนของปลอกด้านบนซึ่งจะถูกถอดออกขณะที่นำไปทดสอบกำลังเฉือน.....	45

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.2 การติดตั้งแบบเหล็กสามวงแหวนในขณะที่ทำการทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างดินบดอัด ในขณะที่ทดสอบทำการติดตั้งปั๊มไฮดรอลิกสำหรับให้แรงกดในแนวตั้งฉากและแรงเฉือน และมีการติดตั้งเกจวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและแนวเฉือนด้วย.....	45
7.3 มุมมองด้านข้างของเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบสามวงแหวน.....	46
7.4 ความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนสำหรับตัวอย่างดินทรายปนดินตะกอน.....	49
7.5 ความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนสำหรับตัวอย่างดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง.....	49
7.6 ความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนสำหรับตัวอย่างดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง.....	50
7.7 ลักษณะของรอยเฉือนบนตัวอย่างหลังจากการทดสอบ.....	51
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนสูงสุดและกำลังเฉือนคงค้างกับความเค้นตั้งฉากของการทดสอบดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทดสอบด้วยน้ำและสารจีโอพอลิเมอร์ในกรณีที่ไม่มีการบ่มตัวอย่างและมีการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน (WO = ทดสอบด้วยน้ำกรณีที่ไม่มีการบ่มตัวอย่าง, W7 = ทดสอบด้วยน้ำกรณีที่มีการบ่มตัวอย่าง 7 วัน, GO = ทดสอบด้วยจีโอพอลิเมอร์กรณีที่ไม่มีการบ่มตัวอย่าง, G7 = ทดสอบด้วยสารจีโอพอลิเมอร์กรณีที่มีการบ่มตัวอย่าง 7 วัน).....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมดิน เช่น การก่อสร้างถนน สนามบิน เขื่อนดินถม พื้นที่โรงงาน บ่อฝังกลบขยะ ฯลฯ จำเป็นต้องบดอัดดินและวัสดุมวลรวมด้วยเครื่องมือและเครื่องจักรตามชนิดและประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้าง การบดอัดดินหรือวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้ในการก่อสร้างมีจุดประสงค์เพื่อทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น ความพรุน อัตราส่วนช่องว่าง ซีดจำกัดเหลว และขีดจำกัดพลาสติก) คุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ (ค่าความซึมผ่าน) และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ (กำลังรับแรงแบกทาน และกำลังรับแรงเฉือน) เป็นไปตามมาตรฐานและทำให้โครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมดินนั้นมีเสถียรภาพที่ดี

ความหนาแน่นและค่ากำลังเฉือนของดินบดอัดนับเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับโครงสร้างทางวิศวกรรมดิน ปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมดิน เช่น การก่อสร้างถนน เขื่อนดินถม เขื่อนกักเก็บกากของเสียในพื้นที่เหมือง เป็นต้น ในทางปฏิบัตินั้นการบดอัดดินในภาคสนามจะทำได้ก็ต่อเมื่อทราบผลทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, MDD) การบดอัดในภาคสนามทำโดยอาศัยรถบดอัดจนได้ความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิธีการบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งานจะต้องใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน ถ้าหากมีน้ำอยู่มากเกินไป น้ำจะไปหุ้มเคลือบรอบๆ มวลดิน เป็นผลให้เกิดแรงดันในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore pressure) ซึ่งเป็นผลให้เม็ดดินถูกผลักแยกตัวห่างจากกัน หรือหากมีน้ำอยู่น้อยเกินไปจะทำให้การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเป็ยติดกันเท่าที่ควร

โดยปกติการบดอัดดินจะให้น้ำเป็นสารหล่อลื่นเพื่อลดแรงตึงผิวและแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน การใช้สารลดแรงตึงผิวผสมในน้ำขณะบดอัดเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินและยังช่วยลดปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ใช้ในการบดอัดอีกด้วย หรือใช้พวกสารจีโอพอลิเมอร์ในการบดอัดดินเพื่อให้ดินบดอัดมีกำลังสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามหากจะใช้สารลดแรงตึงผิวและสารจีโอพอลิเมอร์สำหรับบดอัดในสนามจริงนั้นจะต้องมีการศึกษาผลในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งโดยทั่วไปจะมีเฉพาะการทดสอบกำลังกดแบบไม่จำกัด (Unconfined compression test) เท่านั้น ซึ่งยังขาดการทดสอบและวิเคราะห์เพื่อหาลำดับกำลังเฉือนของดินบดอัด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อทดสอบความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, MDD) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ของตัวอย่างดิน 3 ชนิด ที่นิยมใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยที่ตัวอย่างดินจะถูกผสมกับเถ้าถ่านและสารซีโอพอลิเมอร์
- 2) เพื่อหาค่าล้งเหนือนของดินบดอัดโดยใช้ส่วนผสมของเถ้าถ่านและสารซีโอพอลิเมอร์ และประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าล้งเหนือนของดินบดอัด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างดินและวัสดุผสมรวมที่ใช้ไม่จำนวน 3 ชนิด ซึ่งคัดเลือกดินและวัสดุผสมรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างทาง การก่อสร้างเขื่อนดิน และการก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะทดสอบ เพื่อหาการลดขนาดของเม็ดดินและวัสดุผสมรวมที่ใช้ในการศึกษา และจำแนกดินตามระบบ USCS และระบบ AASHTO
- 2) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานได้แก่ ชีดจำกัดเหลว ชีดจำกัดพลาสติก โดยผลที่ได้จำใช้ประกอบการจำแนกดินตามระบบ USCS และระบบ AASHTO
- 3) ทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) โดยส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว และส่วนผสมของเถ้าถ่านหินและสารซีโอพอลิเมอร์ ในการทดสอบใช้โมลขนาด 4 นิ้ว ทำการทดสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งที่สูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด
- 4) ทดสอบค่าล้งเหนือนของดินบดอัดด้วยสารซีโอพอลิเมอร์โดยใช้ค่าความชื้นที่เหมาะสมที่ได้การทดสอบข้อ (3) ตัวอย่างจะถูกบ่มไว้เป็นระยะเวลา 0 และ 7 วัน การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบค่าล้งเหนือนแบบสามแหวงภายใต้ความเค้นตั้งฉากอย่างน้อย 4 ระดับ เพื่อนำผลมาวิเคราะห์หาค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานของตัวอย่างดินบดอัด

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การบดอัดในภาคสนามเป็นกระบวนการที่ใช้แรงหรือน้ำหนัก (พลังงาน) จากเครื่องจักรกล กระทำให้เม็ดดินเบียดตัวชิดกันเพื่อเพิ่มความหนาแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัวและลดการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) เครื่องจักรกลที่ใช้ในการบดอัดโดยทั่วไป ประกอบด้วย รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง รถบดตีนแกะ รถบดชนิดสั้นสะเทือน เป็นต้น โดยการเลือกใช้เครื่องจักรชนิดใดขึ้นอยู่กับประเภทของดินหรือวัสดุที่จะบดอัด วิธีบดอัดดินให้ได้ความหนาแน่นสูงตามความต้องการหรือตามจุดประสงค์ของการใช้งาน การบดอัดต้องอาศัยน้ำเป็นตัวหล่อลื่น หากใช้ปริมาณน้ำ (ความชื้น) มากเกินไป น้ำจะไปหุ้ม

เคลือบรอบเม็ดดิน และเกิดแรงดันน้ำขึ้นในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน เป็นผลให้เม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน และความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณน้ำที่ใช้สูงขึ้น หรือถ้าการบดอัดมีน้ำอยู่น้อยเกินไปจะทำให้การหล่อลื่นไม่ดีพอที่จะช่วยให้การบดอัดเม็ดดินเบียดชิดกันเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลและข้อเท็จจริงดังกล่าว Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับความหนาแน่นของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ในการทดสอบการบดอัดดินในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้างถนน สนามบิน (Runway) เชื่อมดิน พื้นโรงงาน ฯลฯ ในปัจจุบัน ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้นหลายเท่าตัว พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นจะต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีทดสอบการบดอัดดินโดยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อให้ได้ฐานดินมีความหนาแน่นสูงขึ้น รับน้ำหนักได้มากขึ้น ซึ่งเรียกว่าวิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test)

ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ผสมกับน้ำด้วยความเข้มข้นที่ต่างกันนำมาใช้แทนน้ำในการบดอัดดินและวัสดุมวลรวม โดยคาดว่าสารลดแรงตึงผิวจะช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินซึ่งทำให้ได้ความหนาแน่นที่สูงขึ้นและใช้ปริมาณความชื้นขณะบดอัดน้อยลง จึงส่งผลให้แรงดันในช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลงด้วย การบดอัดจะกระทำได้ง่ายขึ้นและให้ความหนาแน่นที่ตามต้องการ นอกจากนี้ยังใช้สารซิโอพอลิเมอร์ในการบดอัดดินเพื่อเสริมกำลังเหนือนของดินให้เพิ่มขึ้นอีกด้วย

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง (บางส่วนได้สรุปมาในข้อเสนอโครงการนี้แล้ว) ซึ่งจะรวมถึงทฤษฎีในการบดอัดดิน การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม การทดสอบคุณสมบัติของดินบดอัด ข้อกำหนด มาตรฐานและคุณสมบัติของดินและวัสดุมวลรวมที่นำมาบดอัดในงานทางด้านวิศวกรรม เช่น การก่อสร้างถนน การก่อสร้างเชื่อมดิน การก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะ การก่อสร้างพื้นผิวสนาม และการบดอัดดินในส่วนของอาคาร ชนิดของสารลดแรงตึงผิว การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของดินและวัสดุมวลรวม รวมถึงการใช้สารซิโอพอลิเมอร์ในงานทางด้านวิศวกรรมประเภทต่างๆ ที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงจะถูกสรุปไว้ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างดินและวัสดุผสมรวม

ตัวอย่างดินและวัสดุผสมรวมที่ใช้ 3 ชนิด ซึ่งคัดเลือกดินและวัสดุผสมรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างทาง การก่อสร้างเขื่อนดิน และการก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะ จะถูกเก็บจากแหล่งต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยจะมีการเดินทางไปเก็บอย่าง 3 ครั้ง

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติจะจำแนกเป็น 5 กลุ่ม คือ 1) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การหาขนาดคละของเม็ดดิน (Sieve analysis) การทดสอบขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก 2) การทดสอบการบดอัดดินและวัสดุผสมรวมโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นการบดอัดตามมาตรฐานการบดอัดทั่วไป 3) การทดสอบการบดอัดดินและวัสดุผสมรวมโดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นระดับต่างกัน 4) การทดสอบการบดอัดดินและวัสดุผสมรวมโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์ และ 5) การทดสอบกำลังเหนียวของดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์

กลุ่มที่ 1: การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของดินที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติ ได้แก่ การหาขนาดคละของเม็ดดิน การทดสอบขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก ผลการทดสอบเบื้องต้นจะนำไปจำแนกชนิดของดินด้วยระบบ USCS และ AASHTO

กลุ่มที่ 2: การทดสอบการบดอัดดินและวัสดุผสมรวมแบบมาตรฐานโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ในการทดสอบจะเลือกใช้โมลขนาด 4 นิ้ว การทดสอบในกลุ่มนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินและวัสดุผสมรวมที่จะนำมาทดสอบ

กลุ่มที่ 3: การทดสอบการบดอัดดินและวัสดุผสมรวมโดยใช้สารลดแรงตึงผิว ในการทดสอบจะเลือกใช้โมลที่มีขนาดเดียวกันกับกลุ่มที่ 2 (4 นิ้ว) ในการทดสอบมีการผันแปรระดับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวอย่างน้อย 4 ระดับ เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

กลุ่มที่ 4: การทดสอบการบดอัดดินและวัสดุผสมรวมโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์ ในการทดสอบจะเลือกใช้โมลที่มีขนาดเดียวกันกับกลุ่มที่ 2 (4 นิ้ว) เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

กลุ่มที่ 5: การทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ด้านกำลังเหนียวของดินและวัสดุผสมรวม การทดสอบในกลุ่มนี้จะเลือกค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ทำให้ตัวอย่างดินมีความหนาแน่นแห้งสูงที่สุดในการจัดเตรียมตัวอย่าง จากนั้นตัวอย่างจะถูกทดสอบกำลังเหนียวภายใต้ความเค้นตั้งฉาก 4 ระดับ โดยมีการทดสอบตัวอย่างทันทีที่บดอัดดินแล้วเสร็จ (ไม่มีการบ่มตัวอย่าง) และมีการทดสอบกำลังเหนียวหลังจากผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะนำไปเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดโดยใช้น้ำและสารลดแรงตึงผิว และการใช้น้ำและใช้สารจีโอพอลิเมอร์

ขั้นตอนที่ 5 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ และตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

ขั้นตอนที่ 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปแบบของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ เช่น Engineering Geology (JIF = 1.212) หรือ International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (JIF = 1.244) หรือ Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (JIF = 0.673)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอนี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และหน่วยงานเอกชนที่รับเหมา ในการบดอัดดินในเชิงวิศวกรรมประเภทต่างๆ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

- 1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
- 2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
- 3) สร้างนักวิจัยระดับ Postdoctoral อย่างน้อย 1 คน
- 4) สร้างนักวิจัยระดับ Postgraduate อย่างน้อย 1 คน

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมถึงไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นดิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กรมทางหลวง
- 2) กรมทางหลวงชนบท

- 3) กรมชลประทาน (เกี่ยวกับการบดอัดเขื่อนแกนดินเหนียว)
- 4) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมธรณี
- 5) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างถนน เขื่อน บ่อฝังกลบขยะ และงานทางด้านโยธาที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดดินในเชิงวิศวกรรมทั่วไป
- 6) องค์การบริหารส่วนตำบล และองค์การบริหารส่วนจังหวัด



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้เสนอผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีการบดอัดดิน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบดอัด การปรับปรุงคุณภาพของดินเชิงกลศาสตร์ รวมทั้งการบดอัดที่ใช้สารลดแรงตึงผิวและการใช้สารจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

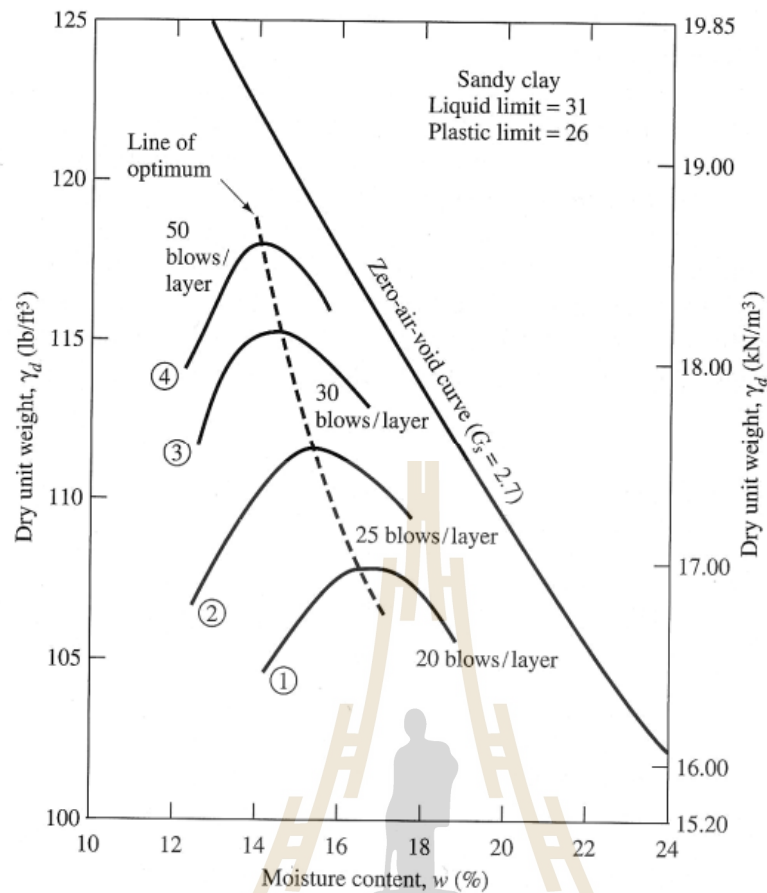
2.1 กล่าวนำ

งานบดอัดดินเป็นงานก่อสร้างที่สำคัญอีกงานหนึ่งในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค เช่น การก่อสร้างคันดิน (Raised embankment) งานถมดินหลังกำแพงกันดิน (Backfill behind retaining wall) บดอัดกลบดิน (Backfilled trench) ตลอดจนงานเขื่อนดิน (Earth dam) ซึ่งการบดอัดดินเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างมีความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีการบดอัดดิน การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในภาคสนามเพื่อประกอบการออกแบบโครงสร้างดังกล่าว การทบทวนวรรณกรรมวิจัย การค้นคว้าบทความและข้อมูลที่เกี่ยวข้องมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลการศึกษาจากผลงานของผู้วิจัยที่ดำเนินมาก่อนนำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งเนื้อหาของการทบทวนวรรณกรรมในเบื้องต้นได้ดำเนินการพอสังเขปดังต่อไปนี้

2.2 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor

ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R. Proctor โดยเริ่มต้นที่มีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles เขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินโดยตีพิมพ์ในหนังสือ Engineering News-Record (Proctor, 1933) แล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า Proctor Test

Proctor ได้กล่าวถึงกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดดังแสดงในรูปที่ 2.1 ไว้ว่าประสิทธิภาพของการบดอัดดินถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน โดยแบ่งการบดอัดดินเป็น 2 ด้านคือ ด้านแห้งและด้านเปียก สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมากๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมากเนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (Capillary moisture) ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมากๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารีและส่งผลให้แรงเสียดทานลดลง ถ้าเติมน้ำเพิ่มเข้าไปอีกจนกระทั่งน้ำไปสลายแรงเสียดทาน น้ำก็จะ



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นการบดอัดดิน (Typical compaction curve)

ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เต็มช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยเรียกจุดที่ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า Maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่จุดนี้ว่า Optimum moisture content หลังจากจุดนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของน้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมากๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป

2.3 เส้นโค้งการบดอัดดิน

ทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ในการบดอัดดิน คือ สมการความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักดินแห้งกับระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังสมการต่อไปนี้

$$\gamma_{dry} = \left(\frac{G_s}{1-e} \right) \gamma_w = \left(\frac{G_s}{1 - \frac{wG_s}{S_r}} \right) \gamma_w \quad (2.1)$$

การบดอัดดินให้แน่นที่สุดในทางทฤษฎีคือ การพยายามทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งมากที่สุด ($\gamma_{d,max}$) ถ้าพิจารณาจากสมการที่ (2.1) การที่ดินจะมีหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดนั้น ดินจะต้องมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำที่สุด (e_{min}) และจากความสัมพันธ์ที่ว่า $e = wG_s/S_r$ การที่จะควบคุมค่า e ให้เท่ากับ e_{min} นั้นจะต้องให้ดินมีความอึดตัวด้วยน้ำ ($S_r = 1$) และค่าความชื้นเท่ากับค่าความชื้นที่เหมาะสม ($w = OMC$) (Optimum moisture content) ค่า OMC หมายถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ไม่แห้งจนเกินไป (เพราะถ้าแห้งเกินไปดินจะไม่อยู่ในสภาพอึดตัวด้วยน้ำ) และไม่มากเกินไป (เพราะจะทำให้อัตราส่วนช่องว่างมากขึ้น)

ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในมวลดิน (แกนนอน) มาสร้างความสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักดินแห้ง (แกนตั้ง) ของการบดอัดดิน ซึ่งเรียกว่าเส้นโค้งการบดอัดดิน (Compaction curve) ดังรูปที่ 1.1 พบว่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งในตอนแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในมวลดินมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{d,max}$) และเรียกปริมาณน้ำ ณ จุดนี้ว่า ปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content, w_{opt}) และเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้จะทำให้หน่วยน้ำหนักดินแห้งลดลง

ในทางปฏิบัติแล้ว การบดอัดดินให้อยู่ในสภาพทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยาก เพราะการบดอัดดินนอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำแล้ว ยังขึ้นกับระดับพลังงานกล (Mechanical energy) ที่กระทำกับดินที่บดอัดอีกด้วย โดยพลังงานที่ให้กับดินขณะทำการบดอัดจะต้องมีค่าสูงเพียงพอต่อการขับไล่ฟองอากาศให้ออกจากมวลดิน จนกระทั่งดินมีสภาพเข้าใกล้สภาวะไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids) จากรูปที่ 1 เมื่อเพิ่มพลังงานการบดอัดดิน จะพบว่าเส้นโค้งการบดอัดดินจะเคลื่อนตัวมาทิศทางบนซ้าย โดยหน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุดจะมีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะมีค่าลดลง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเส้นโค้งการบดอัดดินจะถูกควบคุมด้วยเส้นไร้ช่องว่างอากาศ (Zero air voids line) และเส้นโค้งการบดอัดดินจะไม่ตัดเส้นไร้ช่องว่างอากาศ สมการเส้นไร้ช่องว่างอากาศสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 และแทนค่า $S_r = 1$ นั่นคือ

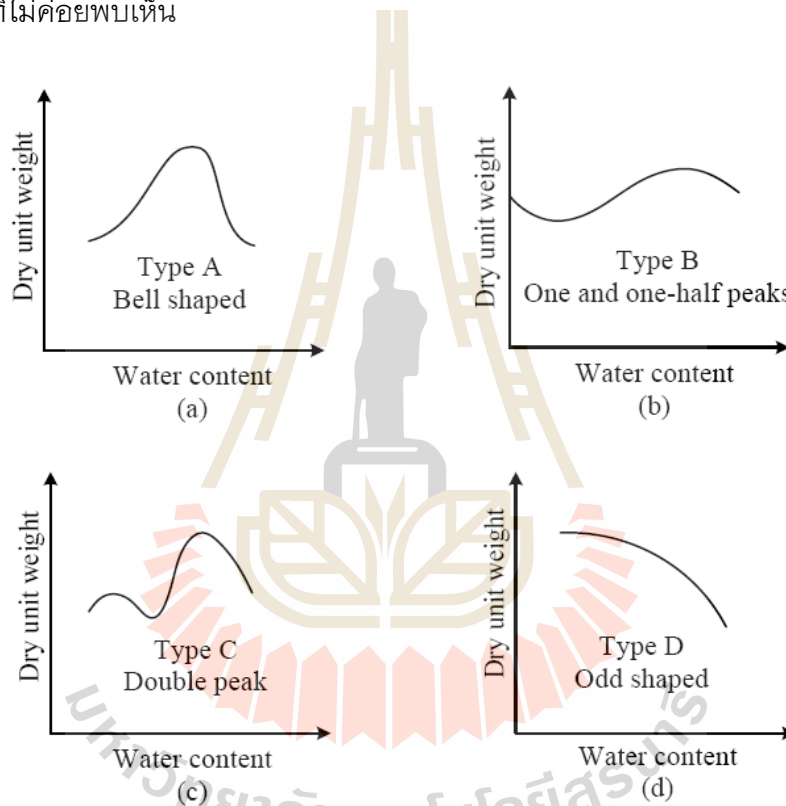
$$\text{Zero air voids line: } \gamma_{dry} = \left(\frac{G_s}{1 - wG_s} \right) \gamma_w \quad (2.2)$$

2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการบดอัดดิน

ตามที่กล่าวแล้วข้างต้นแล้วว่าปริมาณความชื้นในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนาแน่นของดินบดอัด นอกเหนือจากปริมาณความชื้นแล้ว ยังมีปัจจัยอีกสองปัจจัย ได้แก่ ชนิดของดิน

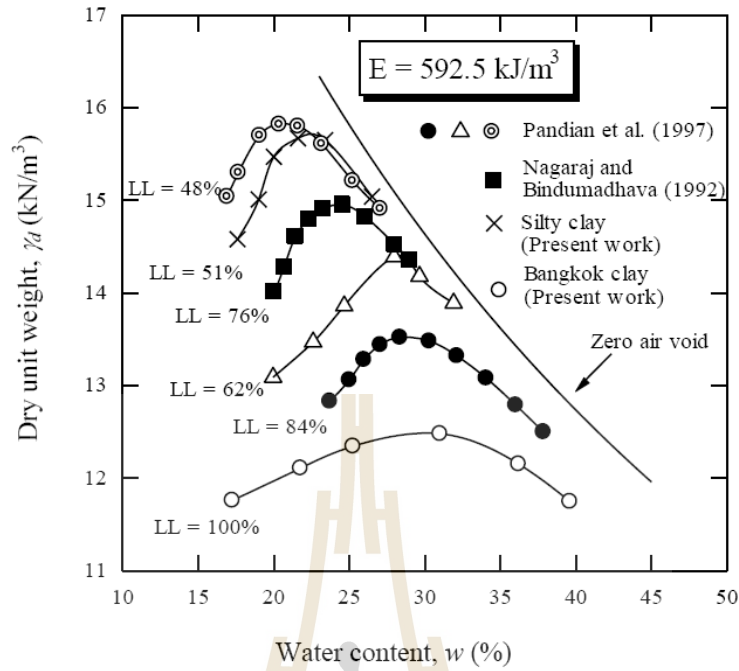
และพลังงานในการบดอัด ชนิดของดินในที่นี้ครอบคลุมถึง การกระจายของเม็ดดิน รูปร่างของเม็ดดินความถ่วงจำเพาะของดินและปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียว

Lee and Suedkamp (1972) ศึกษากราฟการบดอัดดินของดินที่แตกต่างกัน 35 ชนิด พบว่ากราฟเหล่านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ชนิด A เป็นกราฟที่มีจุดยอดเพียงจุดเดียว โดยทั่วไปมักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวประมาณร้อยละ 30-70 ชนิด B คือกราฟที่มี 1 จุดยอดและครึ่งจุดยอด ชนิด C คือกราฟที่มีสองจุดยอด กราฟชนิด B และ C มักพบในดินที่มีขีดจำกัดเหลวน้อยกว่าร้อยละ 30 ชนิด D คือกราฟที่ไม่แสดงจุดยอดที่ชัดเจน คือดินที่มีขีดจำกัดเหลวมากกว่าร้อยละ 70 อาจแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบชนิด C หรือ D ซึ่งเป็นลักษณะกราฟที่ไม่ค่อยพบเห็น



รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการบดอัดดินของดินชนิดต่างๆ

Horpibulsuk et al. (2005) ได้ทำการบดอัดดินเหนียว ผลระบุว่าเส้นกราฟการบดอัดผันแปรอย่างมากกับขีดจำกัดเหลว โดยที่ขีดจำกัดเหลวมีค่ามากจะทำให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แสดงผลการทดสอบการบดอัดของดินชนิดต่างๆ ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เห็นได้ว่าขีดจำกัดเหลวมีอิทธิพลต่อเส้นกราฟการอัดตัวคายน้ำ เนื่องจากขีดจำกัดเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่สะท้อนผลของแร่ดินเหนียวและของเหลวในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore fluid)



รูปที่ 2.3 กราฟการบดอัดของดินเหนียวชนิดต่างๆ (Horpibulsuk et al., 2005)

2.5 พลังงานการบดอัด

การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการนั้นมีจุดประสงค์เพื่อหาปริมาณน้ำสูงสุด (Optimum moisture content) ที่ทำให้เกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) เพื่อกำหนดค่าความหนาแน่นของดินบดอัดในภาคสนาม ในการบดอัดสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยที่การทดสอบทั้งสองวิธีนี้จะแตกต่างกันที่พลังงานที่ใช้ในการบดอัด กล่าวคือการบดอัดแบบมาตรฐานจะใช้พลังงานในการบดอัดเท่ากับ $600 \text{ kN}\cdot\text{m/m}^3$ แต่การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานจะใช้พลังงานในการบดอัดเท่ากับ $2,700 \text{ kN}\cdot\text{m/m}^3$ โดยขนาดของโมลที่ใช้จะมี 2 ขนาด คือ 4 และ 6 นิ้ว พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E = \frac{NB \times NL \times W \times H}{V_m} \tag{2.3}$$

เมื่อ NB คือ จำนวนการตกระทบของค้อนใน 1 ชั้น (Number of blows per layer) NL คือจำนวนชั้นของการบดอัด (Number of layers) W คือน้ำหนักของค้อน (Weight of hammer) H คือระยะตกระทบของค้อน (Height of drop of hammer) ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดงมาตรฐานการบดอัดทั้งสองวิธีที่กล่าวในข้างต้น

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (2549)

ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมล	4 นิ้ว (101.6 mm)	4 นิ้ว (101.6 mm)	6 นิ้ว (152.4 mm)
2. ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (116.43 mm)	4.584 นิ้ว (116.43 mm)	4.584 นิ้ว (116.43 mm)
3. ปริมาตรของโมล	0.0333 ft ³ (944 cm ³)	0.0333 ft ³ (944 cm ³)	0.075 ft ³ (2,124 cm ³)
4. น้ำหนักของค้อน	5.5 lbs (2.5 kg)	5.5 lbs (2.5 kg)	5.5 lbs (2.5 kg)
5. ระยะยก	12 นิ้ว (304.8 mm)	12 นิ้ว (304.8 mm)	12 นิ้ว (304.8 mm)
6. จำนวนชั้น	3	3	3
7. จำนวนครั้งที่กระทันต์ต่อชั้น	25	25	56
8. พลังงานในการบดอัด	12,375 lbs·ft/ft ³ (600 kN·m/m ³)	12,375 lbs·ft/ft ³ (600 kN·m/m ³)	12,375 lbs·ft/ft ³ (600 kN·m/m ³)
9. วัสดุที่ทดสอบ	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm) อาจใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ≤ 20%	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm) อาจใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ≥ 20% และดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 อาจใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว ≥ 20% และดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว < 30%

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดในการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (2549)

ลำดับที่	วิธีการ		
	A	B	C
1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโมล	4 นิ้ว (101.6 mm)	4 นิ้ว (101.6 mm)	6 นิ้ว (152.4 mm)
2. ความสูงของโมล	4.584 นิ้ว (116.43 mm)	4.584 นิ้ว (116.43 mm)	4.584 นิ้ว (116.43 mm)
3. ปริมาตรของโมล	0.0333 ft ³ (944 cm ³)	0.0333 ft ³ (944 cm ³)	0.075 ft ³ (2,124 cm ³)
4. น้ำหนักของค้อน	10 lbs (4.54 kg)	10 lbs (4.54 kg)	10 lbs (4.54 kg)
5. ระยะยก	18 นิ้ว (457.2 mm)	18 นิ้ว (457.2 mm)	18 นิ้ว (457.2 mm)
6. จำนวนชั้น	5	5	5
7. จำนวนครั้งที่กระทันต์ต่อชั้น	25	25	56
8. พลังงานในการบดอัด	56,250 lbs·ft/ft ³ (2,700 kN·m/m ³)	56,250 lbs·ft/ft ³ (2,700 kN·m/m ³)	56,250 lbs·ft/ft ³ (2,700 kN·m/m ³)
9. วัสดุที่ทดสอบ	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm) อาจใช้กับดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ≤ 20%	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm) อาจใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ≥ 20% และดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 1/8 นิ้ว ≤ 20%	ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm) อาจใช้ดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว ≥ 20% และดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว < 30%

2.6 มาตรฐานก่อสร้างทั่วไป

1) มาตรฐานวัสดุลูกรังชนิดทำผิวจราจร (มทข.206-2554)

วัสดุลูกรังชนิดทำผิวจราจร หมายถึง ลูกรัง หรือวัสดุผสมรวม ซึ่งนำมาเสริมบนชั้นรองพื้นทางเพื่อใช้เป็นผิวจราจร วัสดุที่นำมาใช้จะต้องปราศจากก้อนดินเหนียว (Clay lump) Shale รากไม้ หรือวัชพืชอื่น ๆ ขนาดวัสดุใหญ่สุดต้องไม่โตกว่า 5 cm ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไม่มากกว่า 2/3 ของขนาดผ่านตะแกรง เบอร์ 40 ค่าขีดเหลว (Liquid limit) ไม่มากกว่าร้อยละ 35 ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity index) อยู่ในระหว่างร้อยละ 4 ถึง 11 ค่าจำนวนส่วนร้อยละของความสึกหรอ (Percentage of wear) ไม่มากกว่า 60 ค่า CBR จากห้องทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบ มีมวลคละผ่านตะแกรง ดังตารางที่ 3

2) มาตรฐานหินคลุก (มทข.203-2554)

วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก หมายถึง วัสดุซึ่งมีการคละขนาดกันอย่างสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก ซึ่งนำมาเสริมบนชั้นรองพื้นทางหรือชั้นคันทาง วัสดุที่นำมาใช้ต้องปราศจากก้อนดินเหนียว (clay lump) วัสดุจำพวก Shale รากไม้ หรือวัชพืช อื่นๆ มีอัตราส่วนคละขนาดสม่ำเสมอประกอบด้วยส่วนหยาบและส่วนละเอียด ส่วนหยาบเป็นหินโม่มะและส่วนละเอียดเป็นวัสดุชนิดเดียวกับส่วนหยาบ หากมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุส่วนละเอียดชนิดอื่นเจือปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมทางหลวงชนบทก่อน ค่าขีดเหลวไม่มากกว่าร้อยละ 25 ค่าดัชนีความเป็นพลาสติกไม่มากกว่าร้อยละ 6 ค่าจำนวนส่วนร้อยละของความสึกหรอไม่มากกว่าร้อยละ 40 ค่า CBR จากห้องทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐานตาม มทข.(ท) 501.3 หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง มีมวลคละผ่านตะแกรง ดังแสดงในตาราง 4

ตารางที่ 2.3 ขนาดคละของหินคลุก (มทข.206-2554)

ขนาดของตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ			
	ชนิด ก	ชนิด ข	ชนิด ค	ชนิด ง
2"	-	-	-	-
1"	100	100	100	100
3/8"	50-85	60-100	-	-
เบอร์ 4	25-65	50-85	55-100	70-100
เบอร์ 10	25-50	40-70	40-100	55-100
เบอร์ 40	15-30	25-45	20-50	30-70
เบอร์ 200	8-15	8-25	8-20	8-25

ตารางที่ 2.4 ขนาดคละของวัสดุรองพื้นทางลูกรัง (มทช.203-2554)

ขนาดของตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักผ่านตะแกรงเป็นร้อยละ		
	ชนิด ก	ชนิด ข	ชนิด ค
2"	100	100	-
1"	-	79-95	100
3/8"	30-65	40-75	50-85
เบอร์ 4	25-55	30-60	35-65
เบอร์ 10	15-40	20-45	25-50
เบอร์ 40	8-20	15-30	15-30
เบอร์ 200	2-8	5-20	5-15

2.7 การก่อสร้างและการบดอัด ชั้นโครงสร้างทาง

1) งานชั้นดินถมคันทาง

งานชั้นรองพื้นทาง หมายถึงการก่อสร้างวัสดุบนชั้นดินเดิม ได้บดอัดแล้วเสร็จ โดยใช้วัสดุดินถม นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำแล้วทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้รูปแบบความหนาชั้นละไม่เกิน 20 cm ความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากผลการทดสอบบดอัดแบบมาตรฐาน

2) งานชั้นรองพื้นทาง (Subbase)

งานชั้นรองพื้นทาง หมายถึงการก่อสร้างวัสดุบนชั้นคันทาง หรือบนชั้นวัสดุคัดเลือกที่ได้ก่อสร้างแล้วเสร็จ โดยใช้วัสดุลูกรัง หรือมวลรวมดิน นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำแล้วทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้รูปแบบ ความหนาชั้นละไม่เกิน 15 cm ความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากผลการทดสอบบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

3) งานพื้นทาง (Base)

งานชั้นพื้นทาง หมายถึงการก่อสร้างงานชั้นบนสุดของโครงสร้างทาง ทำหน้าที่รองรับผิวจราจรและแบกทานน้ำหนักที่ถ่ายมาจากผิวจราจร กระจายน้ำหนักลงสู่ฐานด้านล่าง วัสดุที่ใช้ก่อสร้างได้แก่หินคลุก หินโม่ กรวดโม่ ตะกรันเหล็ก ที่มีขนาดคละสม่ำเสมอจากใหญ่ไปหาเล็ก ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานวัสดุพื้นทาง นำมาคลุกเคล้าผสมน้ำ ทำการปรับเกลี่ยแต่งและบดอัดแน่นให้ได้ตามรูปแบบ หนาชั้นละไม่เกิน 15 cm ความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 modified proctor density

2.8 งานศึกษาและการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับใช้สารลดแรงตึงผิวในการบำบัด

Rahman et al. (2013) ศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อคุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของดินซิลท์ (Silty soil) การทดสอบการบำบัดดินใช้ Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ที่มีความเข้มข้น 0, 5, 10 และ 20% ผลการทดสอบระบุว่าสารลดแรงตึงผิวมีผลทำให้ขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกมีค่าลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น และในการบำบัดพบว่าเมื่อค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นและในทางกลับกันค่าความชื้นที่เหมาะสมจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความชื้นผ่านของดินมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากผลการทดสอบกำลังแบบอัดตัวไม่คายน้ำพบว่าค่าความเค้นยึดติดมีค่าลดลงจาก 319 kPa เหลือเพียง 50 kPa เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 20%

Arasan (2010) ได้ทำการทดสอบหาค่าสถานะของดินเหนียว ค่าความชื้นผ่าน กำลังเฉือน อัตราการบวมตัวและความสามารถในการอัดตัวของดินเหนียวที่ใช้ตาด (Clay liner) โดยผสมสารเคมี อนินทรีย์ (Inorganic chemical) จากบทความวิจัยของนักวิจัยหลายท่าน ซึ่งได้ข้อสรุปว่าสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดดินเหนียวมีผลให้ค่าขีดจำกัดเหลวและการบวมตัวของดินเหนียวบำบัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดเพิ่มขึ้นสำหรับดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูง (High plasticity clay) ในทางตรงข้ามพบว่าค่าขีดจำกัดเหลวและการบวมตัวของดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกต่ำ (Low plasticity clay) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดสูงขึ้นสำหรับดินเหนียว สำหรับค่าความชื้นผ่านของดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกสูงจะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ และดินเหนียวที่มีสภาพพลาสติกต่ำจะมีค่าความชื้นผ่านลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้เพิ่มขึ้น

Akbulut et al. (2013) ได้ทดสอบคุณสมบัติของดินเหนียวบำบัดโดยใช้สารเคมี 4 ชนิด ได้แก่ Cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC), Quaternised ethoxylated fatty amine (QEFA), Linear alkylbenzene sulphonic acid (LABSA) และ Sodium lauryl ether sulphate (SLES) ผลการศึกษาระบุว่า ค่าความหนาแน่นสูงสุดจากการบำบัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีทั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้น ค่าความชื้นที่เหมาะสมในการบำบัดเมื่อใช้ LABSA และ SLES มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ CTAC และ QEFA ค่าความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีเพิ่มขึ้น เมื่อนำดินไปทดสอบกำลังเฉือนพบว่าการใช้สารเคมีทั้ง 4 ชนิดมีผลทำให้มุมเสียดทานภายในของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและค่าความเค้นยึดติดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้เพิ่มขึ้น

Akbulut et al. (2012) ศึกษาผลกระทบของการใช้สารลดแรงตึงผิวต่อสภาพเหนียว (Consistency) ของดิน โดยใช้สารเคมี 7 ชนิด ได้แก่ Trimethylglycine, Hydroxyethylcellulose, Octyl phenol ethoxylate, Linear alkylbenzene sulfonate acid, Sodium lauryl ether sulfate, Cetyl trimethyl ammonium chloride และ Quaternised ethoxylated fatty amine ผลการทดสอบระบุว่าค่าสภาพเหนียวของดินมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเปลี่ยนไป สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกส่งผลให้ความเป็นพลาสติกของดินมีค่าสูงขึ้น (จากดิน CH เป็น MC) เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น

Masada et al. (1992) ทดสอบกำลังแบกทานของดินอ่อนด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anion) สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cation) และสารลดแรงตึงผิวไร้ประจุ (Nonion) ผลการทดสอบระบุว่ากำลังแบกทานของดิน Silty clay ที่ใช้สารลดแรงตึงผิวไร้ประจุจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นดินที่ผสมกับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก และสำหรับสารลดแรงตึงผิวประจุลบจะใกล้เคียงกับดินที่ทดสอบโดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่น แต่สำหรับดิน Silty sand นั้นสารลดแรงตึงผิวประจุบวกจะให้กำลังแบกทานที่สูงที่สุด ส่วนสารลดแรงตึงผิวสองชนิดที่เหลือนั้นจะให้กำลังแบกทานใกล้เคียงกับดินที่ทดสอบโดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่น และยังพบว่าอัตราส่วนช่องว่างของดินจะมีการลดลงเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว

Park et al. (2006) ศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อคุณสมบัติของดิน 2 ชนิด ได้แก่ คาโอไลน์ท์ (Kaolinite) และทราย (Sand) สารเคมีที่ใช้ได้แก่ Octylphenol polyoxyethylene (Triton X-100) และ Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ผลการศึกษาพบว่าค่าความซึมผ่านของดินไม่มีผลกระทบจากสารลดแรงตึงผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งค่าความซึมผ่านมีการลดลงเพียงเล็กน้อยจาก 1×10^{-7} cm/s (ทดสอบด้วยน้ำบริสุทธิ์) เป็น 0.3×10^{-7} cm/s (ทดสอบด้วย Triton X-100 และ SDS)

จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยข้างต้น พอจะสรุปเบื้องต้นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อการบดอัดของดินประเภทต่างๆ มีผลกระทบมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ และชนิดของดิน ซึ่งจะมีผลทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการบดอัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีเพิ่มขึ้น สำหรับดินบางประเภทจะมีค่าความซึมผ่านสูงขึ้นและดินบางประเภทจะมีค่าความซึมผ่านลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้มีค่าสูงขึ้น นักวิจัยบางท่านพบว่าสารลดแรงตึงผิวมีผลให้กำลังเฉือนของดินลดลง แต่บางท่านพบว่าผลทำให้กำลังของดินสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวข้างต้นไม่ได้สรุปในประเด็นเกี่ยวกับการใช้เพื่อลดพลังงานในการบดอัดดินสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมแต่อย่างใด

2.9 งานศึกษาและการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารจีโอพอลิเมอร์ในการบำบัด

การศึกษาการใช้สารจีโอพอลิเมอร์มีอย่างแพร่หลายทั้งในเทคโนโลยีการใช้ทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีต การใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกและวัสดุทนไฟ รวมถึงการศึกษาด้านการเพิ่มกำลังของดินในภาคสนาม ในหัวข้อนี้นำเสนอโดยมุ่งไปที่การใช้สารจีโอพอลิเมอร์ในการเพิ่มกำลังของดินในภาคสนามและงานที่เกี่ยวข้อง

Davidovits (1978) ได้ทำการวิจัยโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุใหม่สำหรับเคลือบผิวและกาหนดความร้อน และใช้เป็นกาวยาเซรามิกที่มีอุณหภูมิสูงให้เกิดการประสานใหม่สำหรับวัสดุทนไฟทนต่อการทอหุ้มของเสียที่เป็นพิษและกัมมันตรังสี และใช้เป็นส่วนผสมซีเมนต์สำหรับคอนกรีต คุณสมบัติและการใช้สารจีโอพอลิเมอร์ได้มีความสนใจในสาขาวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมหลายสาขาวิชา ได้แก่ เคมีอนินทรีย์ที่ทันสมัย เคมีกายภาพ เคมีคอลลอยด์ ธรณีวิทยาและในกระบวนการวิศวกรรมประเภทอื่น สารจีโอพอลิเมอร์เป็นส่วนหนึ่งของวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และเทคโนโลยีที่เป็นหนึ่งในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์วัสดุศาสตร์ พอลิเมอร์เป็นวัสดุอินทรีย์ เช่น คาร์บอนหรือโพลีเมอร์อนินทรีย์ (เช่น ซิลิคอน) โพลีเมอร์อินทรีย์ประกอบด้วยชั้นของพอลิเมอร์ธรรมชาติ (ยางเซลลูโลส) โพลีเมอร์อินทรีย์สังเคราะห์ (เส้นใยสังทอพลาสติกฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ) วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์โพลีเมอร์ที่ทำจากซิลิคอนซึ่งเป็นแร่ส่วนใหญ่ที่มาจากแหล่งแร่ทางธรณีวิทยา

ณัฐ มากุล และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ (2556) ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหิน ในการศึกษาใช้เถ้าลอย 2 แหล่ง คือ เถ้าถ่านหินแม่เมาะจากจังหวัดลำปาง และเถ้าถ่านหินจากจังหวัดระยอง และกำหนดอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 สมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ศึกษาในสภาวะสด ได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายใต้ 3 วิธี การบ่มคือ (ก) บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (ข) บ่มในเตาอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และ (ค) บ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับความถี่เท่ากับ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต และกำลังแมกนีตรอนเท่ากับ 100, 300 และ 450 วัตต์เป็นระยะเวลา 5, 15 นาทีและ 30 นาทีตามลำดับ สำหรับสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ภายหลังจากการบ่ม ได้แก่ การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น โครงสร้างระดับจุลภาค ค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิที่วัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป หมู่ฟังก์ชัน และความพรุนของตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่าค่าความต้องการน้ำของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง เมื่อทำการบ่มจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยระยอง ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 ด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C มีกำลังอัดสูงสุด ส่วนจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 บ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง มีกำลังอัดสูงสุด ขณะที่การบ่มด้วยไมโครเวฟให้กำลังอัดสูงสุดคือตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

แก้าลอยแม่เมาะที่มีอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 ที่กำลัง 450 วัตต์ นอกจากนั้นการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่า มีการสร้างพันธะในทุกตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ทำให้เกิดโครงสร้างที่สามารถรับกำลังอัดได้ ในขณะที่โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมแก้าลอยมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและพลังงานในระดับต่ำ และจากการวิเคราะห์ความพรุนพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมแก้าลอยแม่เมาะที่ผ่านการบ่มในเตาอบมีการกระจายโพรงอากาศอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดโพรง เล็กกว่าแก้าลอยระยอง รวมถึงมีปริมาณของโพรงอากาศน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น

สมิทร ส่งพิริยะกิจ (2548) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้แก้าลานหินและทรายเป็นวัสดุดิบ สารกระตุ้นที่ใช้เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำ ในการศึกษาเขาได้กำหนดอัตราส่วนระหว่างแก้าลานหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมมีค่าเท่ากับ 25°C และ 45°C เมื่อหล่อตัวอย่างแล้วเสร็จเขาได้แบ่งตัวอย่างเป็น 2 ส่วน ซึ่งได้นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30°C และ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30°C กำลังอัดของตัวอย่างถูกทดสอบและประเมินที่อายุการบ่มเท่ากับ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิสูงให้มียุคกำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและกำลังอัดยังคงเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่ามีค่ากำลังอัดต่ำกว่าในช่วงแรก แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มเช่นเดียวกัน จนกระทั่งในที่สุดจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำ

Alonso and Palomo (2001) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา ผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารกระตุ้นสูงเกินกว่าค่าเหมาะสม การก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างดินขาวเผาต่อ Ca(OH)_2 ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

Satyanarayana et al. (2004) ศึกษาผลอิทธิพลของแก้าลานหินและปูนขาวต่อการเพิ่มกำลังของดิน ซึ่งพวกเขาพบว่าสัดส่วนระหว่างดิน แก้าลอย และปูนซีเมนต์ควรมีค่าเท่ากับ 70:30:4 ซึ่งจะช่วยให้ส่วนผสมมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับนำไปใช้ในการก่อสร้างถนนและเขื่อน

Sukmak and Horpibulsuk (2013) ได้นำดินตะกอนเป็นวัสดุดิบผสมร่วมกับแก้าลานหินในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง กำลังอัดของตัวอย่างที่ได้มีค่าสูงถึง 12 ถึง 14 MPa ซึ่งคณะผู้วิจัยได้สรุปว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการผลิตบล็อกจีโอโพลิเมอร์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก้าลานหิน ปริมาณและความเข้มข้นของสารกระตุ้น ส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตดินตะกอนจีโอโพลิเมอร์ คือ อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อแก้าลอยเท่ากับ 0.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตบล็อกคือ 75°C และทำการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

Sharma et al. (1992) ศึกษาเสถียรภาพของดินที่มีการขยายตัวโดยใช้ส่วนผสมของเถ้าถ่านหินและตะกั่วจากเตาเผาอิฐ พบว่าส่วนผสมของดิน เถ้าถ่านหินและตะกั่วจากเตาเผาอิฐในสัดส่วนของ 6:12:18 สามารถลดความเค้นที่เกิดจากการบวมตัวของดินได้ โดยความเค้นจากการบวมตัวลดจาก 248 kN/m^2 เหลือ 17 kN/m^2 ส่วนกำลังรับแรงอัดแบบไม่จำกัดเพิ่มขึ้นถึง 300%

Kalidas (2014) ศึกษาการเพิ่มเสถียรภาพของดินถมด้วยสารซีโอพอลิเมอร์ ผลการศึกษาพบว่าค่า CBR เริ่มต้นอยู่ที่ 5.5 และเมื่อเพิ่มเถ้าลอยเป็น 5%, 10% และ 20% ค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 7.61, 6.59 และ 6.09 ตามลำดับ ในงานวิจัยยังสรุปอีกว่าองค์ประกอบที่เหมาะสมของเถ้าถ่านหินที่ควรเพิ่มลงในดินเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของดินควรมีค่าเท่ากับ 5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นความเครียดอัดของดินเมื่อมีการเพิ่ม 5% เมื่อเพิ่มเถ้าลอยไปยังดินโดยใช้การทดสอบการกดอัดแบบไม่จำกัด ในงานวิจัยยังสรุปอีกว่าการใช้เถ้าถ่านหินยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบดอัดของดินถมอีกด้วย

Bagewadi and Rakaraddi (2015) ศึกษาประสิทธิภาพของซีโอพอลิเมอร์ต่อการเพิ่มกำลังอัดของตัวอย่างดิน ในงานวิจัยพบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ผสมซีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของซีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยที่กำลังรับแรงอัดของดิน Black Cotton ผสมกับซีโอพอลิเมอร์ 20% โดยน้ำหนักมีกำลังอัดสูงสุดที่ระยะการบดอัดตัวอย่าง 28 วัน

จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะศึกษาประสิทธิภาพของซีโอพอลิเมอร์ต่อกำลังอัดแบบไม่จำกัดของคอนกรีตและของดินเท่านั้น ซึ่งยังไม่มีการศึกษาและทดสอบกำลังเฉือนของดินในเชิงของค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานภายใน ซึ่งตัวแปรตามกฎกำลังเฉือนของคูลอมบ์นี้เป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างขนาดใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการบดอัดมวลดินและปรับปรุงคุณภาพมวลดิน อาทิ การวิเคราะห์เสถียรภาพของเขื่อนดินถม การวิเคราะห์และออกแบบเสถียรภาพของดินที่เป็นดินคันทาง เป็นต้น

บทที่ 3

ตัวอย่างดินและสารเคมี

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะอธิบายถึงการเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทดสอบในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สารเคมีประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ (ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวและสารจีโอพอลิเมอร์) แก้วถ่านหิน (FA) และการจัดเตรียมสารผสมระหว่างแก้วถ่านหินกับสารจีโอพอลิเมอร์ (FA geopolymer) สำหรับใช้ในการทดสอบบดอัดดิน

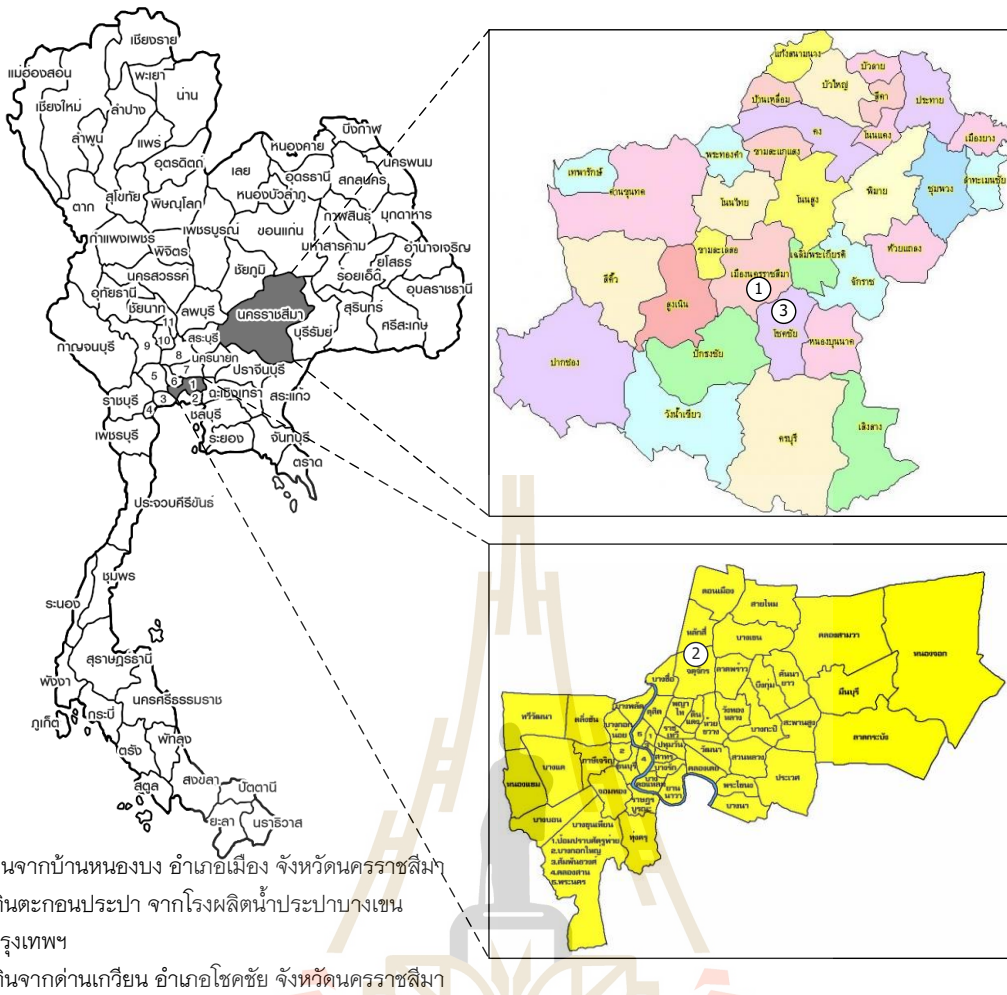
3.2 ตัวอย่างดิน แก้วถ่านหิน และสารอัลคาไลน์

1) ตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บจากพื้นที่ 3 แหล่ง หลักเกณฑ์ในการคัดสรรดินตัวอย่างนั้น ตัวอย่างดินต้องมีความแตกต่างกัน โดยได้เก็บตัวอย่างจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ 1) ดินจากบ้านหนองบง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ดินบริเวณนี้จะเป็นดินทรายปนดินเหนียว 2) ดินตะกอนประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ ดินชนิดนี้จะเป็นดินตะกอนปนดินเหนียว และ 3) ดินจากด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา ดินชนิดนี้เป็นดินที่ใช้ในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาซึ่งเป็นดินเหนียว รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด สำหรับใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดินตัวอย่างที่ทำการเก็บเป็นตัวอย่างที่ถูกรบกวน (disturbed soil sample) โดยได้ทำการบรรจุไว้ในถุงพลาสติกเพื่อรักษาความชื้นตามธรรมชาติของดิน รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างดินที่ถูกจัดเตรียมไว้เพื่อการทดสอบการบดอัด

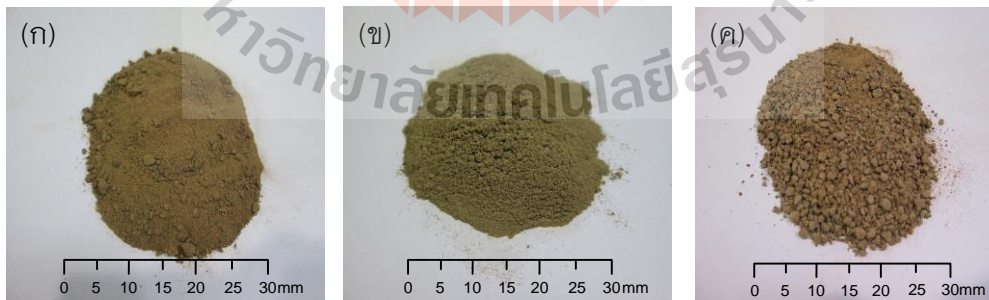
2) ตัวอย่างแก้วถ่านหิน

แก้วถ่านหิน (Fly ash, FA) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของกากของเสียที่เป็นผลผลิตซึ่งได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 แก้วถ่านหินดังกล่าวนี้มีขนาดอนุภาคเล็กมาก จัดเป็นอนุภาคขนาดเล็กละเอียด (Fine) ตามมาตรฐานการจำแนกขนาดอนุภาคของเม็ดดิน (ASTM D 4643) และแก้วถ่านหินมีรูปร่างเป็นเม็ดกลม (spherical shaped) ตามมาตรฐาน ASTM D 618 เพื่อใช้สำหรับการจำแนกแก้วถ่านหินซึ่งได้แบ่งแก้วถ่านหินออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ “Class F” และ “Class C” โดย Class F มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก และ Class C มีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 อยู่ในช่วงระหว่าง 50-70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่แก้วถ่านหินจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ อย่างไรก็ตาม



- (1) ดินจากบ้านหนองบง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
- (2) ดินตะกอนประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ
- (3) ดินจากด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา

รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด สำหรับใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

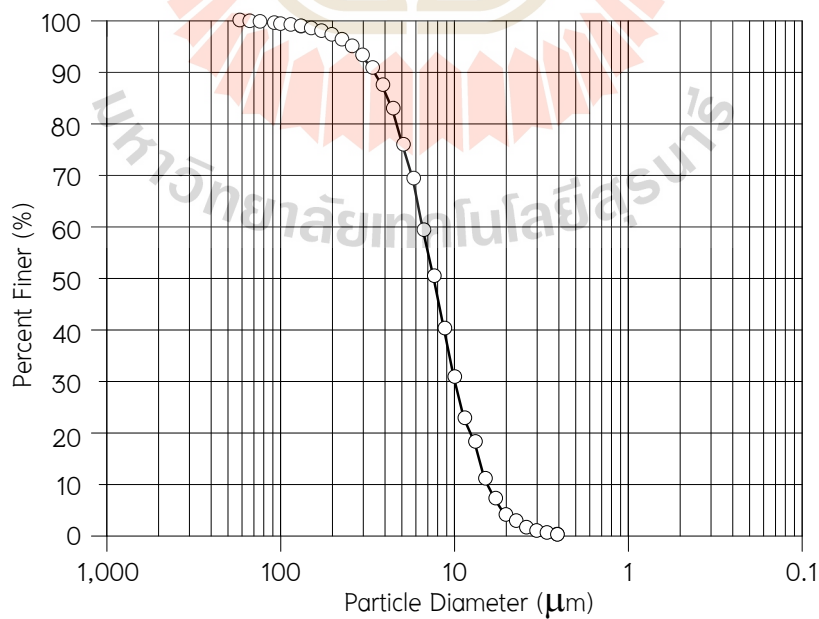


รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างดินที่ถูกจัดเตรียมไว้เพื่อการทดสอบการบดอัด (ก) ดินจากบ้านหนองบง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา (ข) ดินตะกอนประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ และ (ค) ดินจากด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา (ก่อนทำการทุบให้เพื่อย่อยดินและร่อนผ่านตะแกรง)

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (Phummiphan, 2014)

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์
SiO ₂	36
Al ₂ O ₃	16.80
Fe ₂ O ₃	17.64
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	70.44 (>70 Minimum)
CaO	26.73
SO ₃	-
K ₂ O	1.83
TiO ₂	0.48
MnO ₂	0.15
Br ₂ O	-

เถ้าถ่านหินที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จำแนกเป็น Class F (Phummiphan, 2014) โดยผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃, และ Fe₂O₃ มากกว่า 70.44% (>70%) โดยน้ำหนัก (ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์การคละขนาดเพียงตัวอย่างเดียวเท่านั้น โดยมีการสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 311) ส่วนขนาดของอนุภาคที่ผ่านตะแกรงมาตรฐาน 50 เปอร์เซ็นต์ (D₅₀) ของเถ้าถ่านหินเท่ากับ 30.25 ไมครอน รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างเถ้าถ่านหิน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าถ่านหินแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งได้จากการทดสอบ Laser particle size analysis ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินเท่ากับ 2.35



รูปที่ 3.3 การกระจายขนาดของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดิน

3) สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดินมี 3 ชนิด ได้แก่ (1) Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) เป็นสารเคมีที่ใช้เพื่อเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) (2) CON-AID เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) ใช้สำหรับปรับปรุงดินบดอัด ซึ่งได้รับบริจาคจากบริษัท CON-AIS Asia co., LTD. สำนักงานในประเทศไทย ตั้งอยู่ที่ซอยเจริญใจ แขวงคลองตันเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110 (3) Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

4) สารอัลคาไลน์

สารอัลคาไลน์ (Alkaline liquid, AL) หรือสารกระตุ้น (รูปที่ 3.4) เป็นสารเคมีที่จัดเตรียมสำหรับการทดสอบการบดอัดดิน ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) โดยสารเคมีทั้งสองนี้อยู่ในสถานะของเหลว โซเดียมซิลิเกตประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และน้ำบริสุทธิ์ปริมาณ 15.5%, 32.75 % และ 51.75 % โดยน้ำหนัก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีความเข้มข้น 12.5 โมลาร์ (mol/dm^3) สาเหตุที่คัดเลือกสารเคมีทั้งสองชนิดให้อยู่ในสถานะสารละลายเพราะมีความสะดวกและง่ายต่อการผสมสำหรับนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ



Sodium hydroxide, NaOH

Sodium silicate, Na_2SiO_3

รูปที่ 3.4 สารอัลคาไลน์ (Alkaline liquid, AL) หรือสารกระตุ้น ที่ใช้ในการบดอัดโดยนำมาผสมกับเถ้าถ่านหิน (Coal fly ash) ซึ่งส่วนผสมนี้จะเรียกว่าสารจีโอพอลิเมอร์

บทที่ 4

การทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐาน และการจำแนกประเภทของดิน

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบคุณสมบัติชั้นพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การหาปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก และการหาขนาดคละของดิน ผลการศึกษาคุณสมบัติชั้นพื้นฐานจะนำไปใช้ในการจำแนกประเภทของดินทางวิศวกรรมและการเกษตรกรรม ได้แก่ การจำแนกดินระบบ United State Department of Agriculture (USDA) ระบบ Unified Soil Classification (USCS) และระบบ The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ผลการจำแนกจะดินจะมีความสำคัญมากเนื่องจากต้องใช้เป็นเครื่องมือในการสื่อสารบอกถึงชนิดหรือประเภทของดินระหว่างวิศวกรให้เข้าใจตรงกัน และยังสามารถคาดคะเนคุณสมบัติด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ของดินได้หากทราบชนิดของดินด้วยการเทียบเคียงกับฐานข้อมูลที่มีก่อนหน้า

4.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินประกอบด้วย การหาปริมาณความชื้นของดินตามธรรมชาติ การทดสอบเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก การหาขนาดคละของดิน ผลที่ได้จะนำไปจำแนกประเภทของดินตามระบบการจำแนกดินที่เสนอโดย “สมาคมมาตรฐานด้านคุณสมบัติวัสดุและการทดสอบอเมริกัน (American Society for Testing and Materials, ASTM)”

4.2.1 การหาปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าปริมาณน้ำที่อยู่ในช่องว่างตามธรรมชาติของมวลดิน ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ “ASTM D 2216-98 Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass” ซึ่งจัดทำการรอบตัวอย่างดินที่เก็บจากภาคสนามภายใต้อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เพื่อให้ในน้ำในช่องว่างระเหยออกไปจนหมดจนกระทั่งเหลือแต่อนุภาคที่เป็นเม็ดดินเพียงอย่างเดียว

ผลการทดสอบระบุว่าดินที่เก็บจากบ้านหนองบง ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 30% ดินที่เก็บจากบ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา มีความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 10.5% และดินที่เก็บจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน การประปานครหลวง กรุงเทพฯ มีความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 5.6%

4.2.2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดิน

การทดสอบความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินใช้ตัวอย่างดินที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (เป็นดินตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4) ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินมีความสำคัญในการคำนวณคุณสมบัติของดินต่างๆ จาก ความสัมพันธ์องค์ประกอบดิน ความถ่วงจำเพาะเป็นค่าเฉพาะของเม็ดดินเท่านั้น ไม่รวมส่วนของน้ำและอากาศ วิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D854

ผลการทดสอบระบุว่าดินที่เก็บจากบ้านหนองบง ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.68 ดินที่เก็บจากบ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา มีความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.67 และดินที่เก็บจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน การประปานครหลวง กรุงเทพฯ มีความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.56

4.2.3 การทดสอบหาขีดจำกัดของอัตราเตอร์เบอร์ก

การทดสอบหาขีดจำกัดอัตราเตอร์เบอร์กใช้ตัวอย่างดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.42 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 40) จุดประสงค์เพื่อหาค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) และพิกัดความเหลว (Liquid limit, LL) ในการการทดสอบดำเนินการด้วยวิธีการของ Casagrande (1932) โดยใช้วิธีตกระทบ (Percussion method) และการปั้นดินตัวอย่าง การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D4318 ค่าพิกัดเหลวเป็นค่าความชื้นที่วัดได้จากดินที่ผ่านการทดสอบด้วยการปาดดินในถ้วยทองเหลืองเพื่อแบ่งครึ่งที่กึ่งกลางด้วยเครื่องตัด (grooving tool) จนกระทั่งเมื่อเคาะถ้วยตกระทบด้วยระยะตกระทบ 1 เซนติเมตร ด้วยอัตรา 2 ครั้งต่อวินาที แล้วดินไหลมาชนกันเป็นระยะ 0.5 นิ้ว (13 mm) ที่จำนวนครั้งของการเคาะ 25 ครั้งพอดี ส่วนการทดสอบหาพิกัดพลาสติกทำได้ด้วยการผสมน้ำกับมวลดินแล้วทำการนวดดินให้เข้ากัน จากนั้นนำดินมาปั้นให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว (3 mm) จะพบว่าดินเริ่มมีการแตกพอดี

ผลการทดสอบระบุว่าค่าพิกัดพลาสติกและพิกัดความเหลวของดินที่เก็บจากบ้านหนองบง ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีค่าเท่ากับ 12.1% และ 12.7% ตามลำดับ ดินที่เก็บจากบ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา มีพิกัดพลาสติกและพิกัดความเหลวเท่ากับ 38.8% และ 68.0% ตามลำดับ ส่วนค่าพิกัดพลาสติกและพิกัดความเหลวของดินที่เก็บจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน การประปานครหลวง กรุงเทพฯ มีค่าเท่ากับ 32.0% และ 55.0% ตามลำดับ ผลที่ได้นำไปใช้ในการจำแนกประเภทของดินดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.3

4.2.4 การหาขนาดคละของดิน

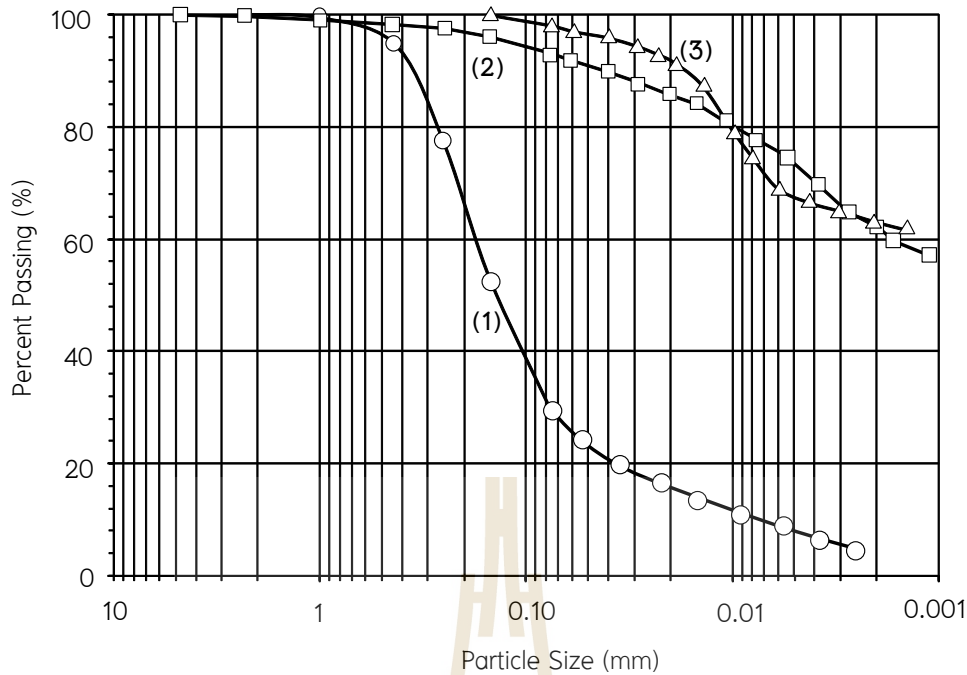
การทดสอบหาขนาดคละของดินดำเนินการ 2 วิธี คือ 1) การวิเคราะห์โดยใช้ตะแกรง (sieve analysis) วิธีนี้ใช้กับการวิเคราะห์การคละขนาดของดินเม็ดหยาบ (กรวดและทราย) ที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.075 mm และเม็ดดินไม่จับตัวกัน ในการการทดสอบได้ใช้ตะแกรงดัง

รายละเอียดในตารางที่ 4.1 และ 2) การวิเคราะห์โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer analysis) วิธีนี้ใช้วิเคราะห์การกระจายขนาดของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 mm แต่ถ้าดินที่ทำการทดสอบมีทั้งดินเม็ดละเอียดและเม็ดหยาบผสมกันจะใช้ทั้งสองวิธีนี้ร่วมกัน การทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM 422

ตารางที่ 4.1 ตะแกรงที่ใช้ในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์การกระจายขนาดของดินเม็ดหยาบ

No.	Sieve	Opening (mm)
1	1/2"	12.7
2	3/8"	9.52
3	No.4	4.75
4	No.10	2.00
5	No.20	0.85
6	No.40	0.43
7	No.60	0.25
8	No.100	0.15
9	No.200	0.08
10	Pan	0.00

เนื่องจากดินตัวอย่างค่อนข้างจะจับตัวกันแน่น การทดสอบได้เลือกใช้วิธีการทดสอบร่อนด้วยตะแกรงแบบเปียก (wet sieve) ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับดินที่มีเม็ดละเอียดผสมกับดินเม็ดหยาบ ในการทดสอบต้องนำตัวอย่างดินไปแช่น้ำอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้ดินอ่อนตัวและแยกตัวออกจากกัน จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.075 mm (เบอร์ 200) ด้วยการฉีดล้างด้วยน้ำ จนกระทั่งมั่นใจว่าดินเม็ดละเอียดหลุดออกไปจนหมด (สังเกตได้จากน้ำที่ผ่านการล้างมีความใส) นำดินที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 ไปอบให้แห้ง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วค่อยนำมาทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบร่อนด้วยตะแกรงแบบแห้ง ส่วนตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ให้นำไปทดสอบด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ ผลการทดสอบได้แสดงการกระจายตัวของเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.1 ผลที่ได้นำไปใช้ในการจำแนกประเภทของดินดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.3



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของเม็ดดินที่ได้จากการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงและวิธีไฮโดรมิเตอร์

- (1) ดินจากบ้านหนองบง ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา
- (2) ดินตะกอนประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ
- (3) ดินจากบ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย นครราชสีมา

4.3 การจำแนกประเภทของดิน

ในหัวข้อนี้เสนอผลการจำแนกดินด้วยระบบ Unified Soil Classification (USCS) และระบบ The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ซึ่งทั้งสองระบบนี้อาศัยข้อมูลพื้นฐานในการจำแนกคล้ายกัน คือ การกระจายและขนาดของเม็ดดิน สถานภาพของดินเหนียว (PL, LL, และ PI) รวมทั้งอินทรีย์สารที่เจือปนอยู่ในดิน

การจำแนกดินด้วยระบบ AASHTO มีจุดประสงค์เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นดินคั่นทาง (subgrade) ในงานก่อสร้างถนน (ASTM D3282 และ AASHTO M145) โดยแบ่งดินออกเป็น 7 กลุ่ม ได้แก่ ดินในกลุ่ม A-1, A-2 และ A-3 ซึ่งถูกจำแนกเป็นดินเม็ดหยาบ และดินในกลุ่ม A-4, A-5, A-6 และ A-7 ถูกจำแนกว่าเป็นดินเม็ดละเอียด นอกจากนี้ยังมีดินอีกกลุ่มหนึ่ง คือ A-8 ซึ่งเป็นดินที่มีอินทรีย์วัตถุปะปนอยู่

การจำแนกดินระบบ USCS นี้ถูกเสนอโดย Casagrande ในปี 1942 เพื่อใช้ในงานก่อสร้างสนามบินภายใต้การดำเนินงานของกองทัพหน่วยวิศวกร (Army Corps of Engineers) ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 และด้วยความร่วมมือของสำนักงานการพัฒนาดินของสหรัฐอเมริกา (U.S. Bureau of Reclamation) ระบบนี้ถูกปรับปรุงอีกครั้งในปี 1952 และใช้กันอย่างกว้างขวางใน

งานทางปฐพีวิศวกรรมและงานก่อสร้างต่างๆ (ASTM D2487) ระบบนี้จำแนกดินออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ดินเม็ดหยาบ (coarse grained soil) จำพวกกรวดและทราย ซึ่งเป็นดินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 200 (ใหญ่กว่า 0.075 mm) มากกว่า 50% โดยน้ำหนักของดินทั้งหมด และดินเม็ดละเอียด (fine grained soil) เป็นดินจำพวกตะกอนทรายและดินเหนียว ซึ่งเป็นดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (เล็กกว่า 0.075 mm) มากกว่า 50% โดยน้ำหนักของดินทั้งหมด ถ้าเป็นดินเม็ดหยาบจะใช้ข้อมูลการกระจายตัวของเม็ดดินในการจำแนก ซึ่งจะแยกดินกรวดและทรายออกจากกันด้วยขนาดของตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาด 4.75 mm) ถ้าในสัดส่วนของดินเม็ดหยาบมีกรวดมากกว่าจะกำหนดให้เป็นดินประเภทกรวด และถ้าสัดส่วนของทรายมากกว่าจะกำหนดให้เป็นทราย สัมประสิทธิ์ที่หาได้จากกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน (C_u และ C_c) จะเป็นตัวระบุว่ามีการคละขนาดดีหรือคละขนาดไม่ดี และถ้าเป็นดินเม็ดละเอียดจะใช้แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่าง PI และ LL ช่วยในการจำแนกดินให้ละเอียดขึ้น ผลการจำแนกได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วยระบบ Unified Soil Classification (USCS)

สถานที่เก็บตัวอย่าง	w (%)	SG (-)	LL (%)	PI (%)	ผลการจำแนกดิน
บ้านหนองบง ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา	3.0	2.68	12.70	0.60	ดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, (SM))
บ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา	10.5	2.67	68.00	29.20	ดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH)
โรงผลิตน้ำประปาบางเขน การประปานครหลวง กรุงเทพฯ	5.6	2.56	55.00	23.00	ดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH)

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติพื้นฐานของดินด้วยระบบ The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

สถานที่เก็บตัวอย่าง	w (%)	SG	LL (%)	PI (%)	ผลการจำแนกดิน
บ้านหนองบง ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา	3.0	2.68	12.70	0.60	A-2-4
บ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา	10.5	2.67	68.00	29.20	A-7-5
โรงผลิตน้ำประปาบางเขน การประปานครหลวง กรุงเทพฯ	5.6	2.56	55.00	23.00	A-7-5

บทที่ 5

การบดอัดดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

5.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test, ASTM D1557) ของดินจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM), ดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) และ ดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) โดยใช้น้ำและสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ โนนิลฟีนอลอีทอกซิเลต (Nonyl Phenol Ethoxylate, NP9), คอนเอต (CON-AID) และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS) การทดสอบมีจุดประสงค์เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินทั้ง 3 ชนิด และศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการบดอัดดินด้วยวิธีแบบสูงกว่ามาตรฐาน

5.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการบดอัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1557 ที่ใช้พลังงานในการบดอัด 56,000 lbs·ft/ft³ (2,700 kN·m/m³) อุปกรณ์ในการทดสอบประกอบด้วยแบบเหล็ก (Mould) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร) สูง 4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร) คิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 0.0333 ft³ (944 cm³) การบดอัดใช้ค้อนหรือตุ้มน้ำหนักขนาด 10 ปอนด์ (4.54 กิโลกรัม) พลังงานการบดอัดต่อปริมาตร 1 หน่วย (E) สามารถคำนวณจากสมการ ระยะยกของค้อนเท่ากับ 18 นิ้ว (457.2 มิลลิเมตร) ซึ่งได้ทำการบดอัดดินจำนวน 5 ชั้น แต่ละชั้นกระทำด้วยค้อนจำนวน 25 ครั้ง โดยที่พลังงานการบดอัดคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{NB \times NL \times W \times H}{V_m} \quad (5.1)$$

เมื่อ NB คือ จำนวนการตกระทบของค้อนต่อชั้น (number of blows per layer)

NL คือ จำนวนชั้นของการบดอัด (number of layers)

W คือ น้ำหนักของค้อน (weight of hammer)

H คือ ระยะตกระทบของค้อน (height of drop of hammer)

V_m คือ ปริมาตรของแบบเหล็ก (volume of mould)

สารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด (Nonyl Phenol Ethoxylate, CON-AID และ Sodium Dodecyl Sulfate) ได้ถูกจัดเตรียมให้มีความเข้มข้นต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่เป็น Nonyl Phenol Ethoxylate และ CON-AID ส่วนสารลดแรงตึงผิวที่เป็น Sodium Dodecyl Sulfate มีความเข้มข้นต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์ เมื่อมีการเตรียมสารลดแรงตึงผิวเสร็จเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ถูกนำไปผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดีกับสารลดแรงตึงผิวที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันไป โดยในการทดสอบจะดำเนินการจากความเข้มข้นที่มีค่าน้อย จากนั้นจะทำการเพิ่มความเข้มข้นจนกระทั่งความหนาแน่นของดินมีแนวโน้มลดลง หลังจากบดอัดแต่ละตัวอย่างดินจะถูกประเมินค่าความหนาแน่นแห้งและความชื้นของตัวอย่างดินที่บดอัดเพื่อจะนำไปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น ผลที่ได้จะสามารถกำหนดความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถเปรียบเทียบความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดเพื่อศึกษาผลกระทบสารลดแรงตึงผิวอีกด้วย

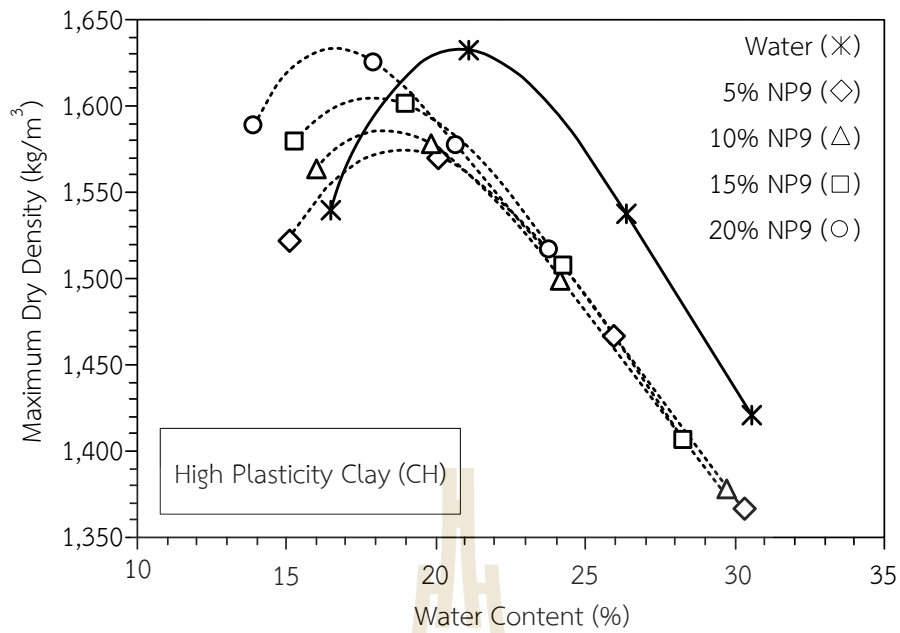
5.3 ผลการทดสอบ

5.3.1 ผลการทดสอบดินเหนียวที่มีพลาสติกซิติสูง

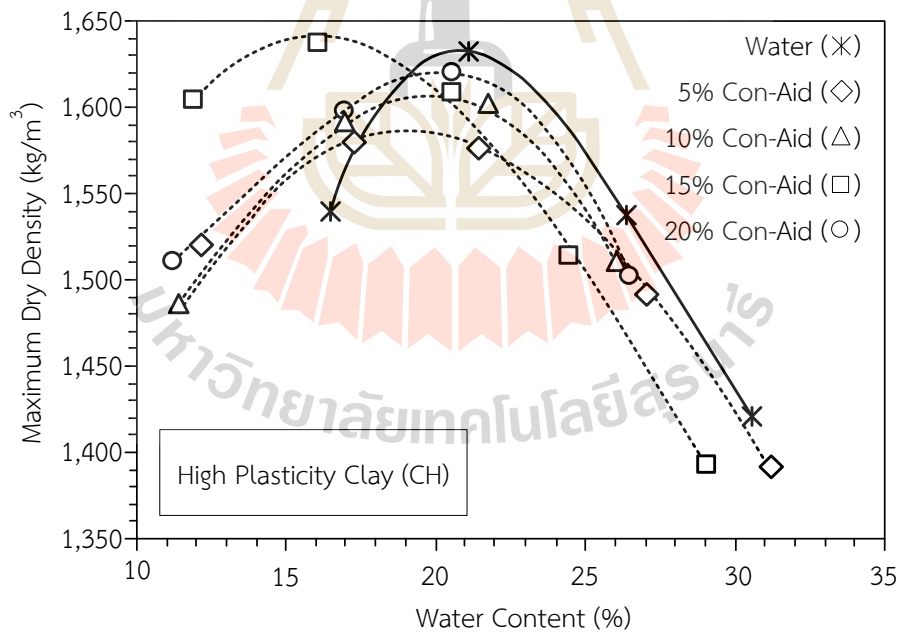
จากการทดสอบการบดอัดดินเหนียวที่มีพลาสติกซิติสูง (High plasticity clay, CH) ด้วย Nonyl Phenol Ethoxylate ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนักได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดมีค่าต่ำกว่าการทดสอบด้วยน้ำ ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 20% ค่าความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบด้วยน้ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า Nonyl Phenol Ethoxylate ความเข้มข้นต่ำกว่า 20% ไม่มีผลทำให้ดินบดอัดมีความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.1

ผลจากการทดสอบด้วย CON-AID มีแนวโน้มเหมือนกับการทดสอบด้วย Nonyl Phenol Ethoxylate กล่าวคือความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนักมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดมีค่าต่ำกว่าการทดสอบด้วยน้ำ และความเข้มข้น 20% ค่าความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดใกล้เคียงกับการทดสอบด้วยน้ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า CON-AID ความเข้มข้นต่ำกว่า 20% ไม่มีผลทำให้ดินบดอัดมีความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการทดสอบด้วย Nonyl Phenol Ethoxylate ดังแสดงในรูปที่ 5.2

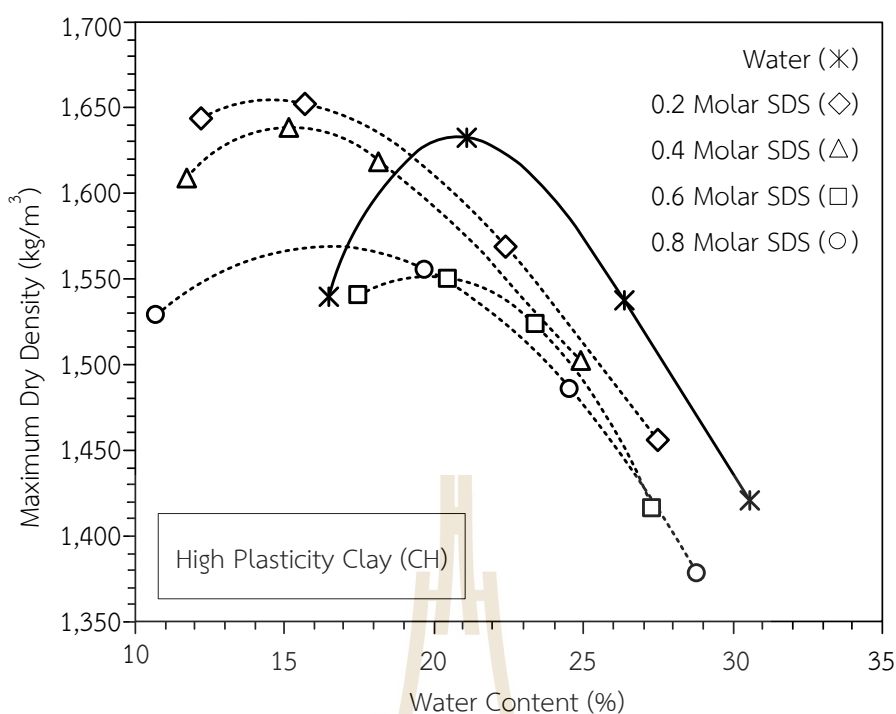
ผลจากการทดสอบด้วย Sodium Dodecyl Sulfate พบว่ายิ่งความเข้มข้นของ Sodium Dodecyl Sulfate เพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดจะมีค่าลดลงตามลำดับ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ไม่สามารถทำให้การบดอัดดินมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) โดยใช้สาร Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) โดยใช้สาร CON-AID ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก



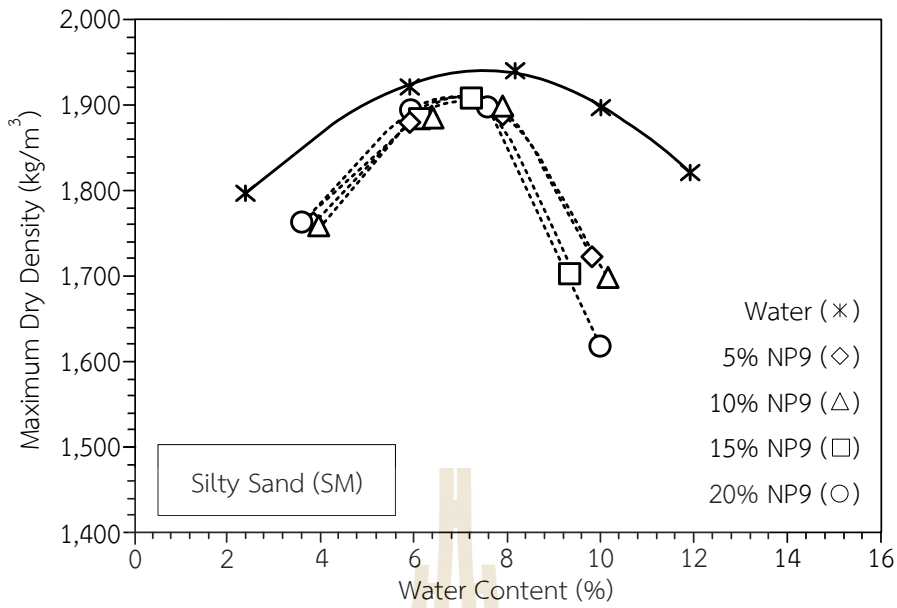
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) โดยใช้สาร Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์

5.3.2 ผลการทดสอบดินทรายปนดินตะกอน

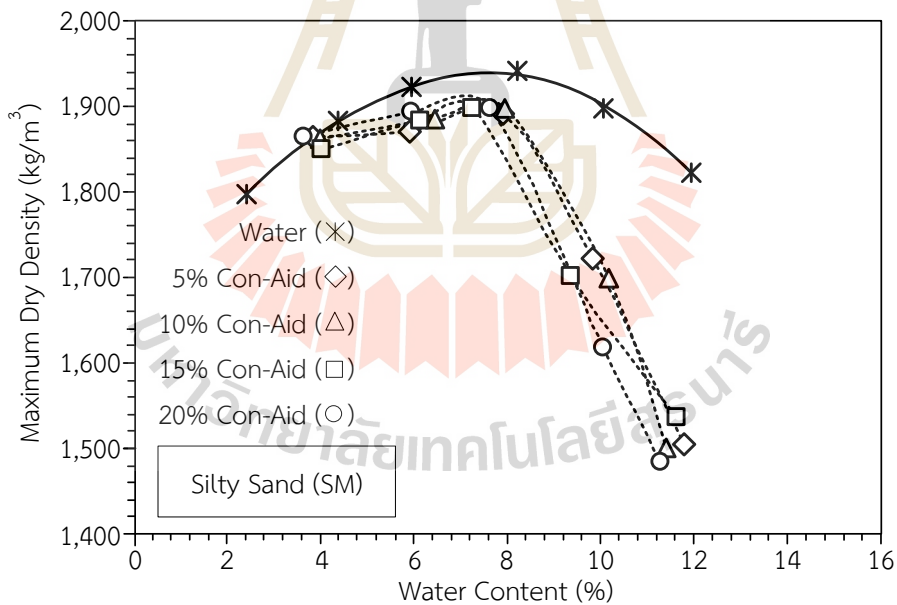
จากการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) ด้วย Nonyl Phenol Ethoxylate และ CON-AID ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก และ Sodium Dodecyl Sulfate ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์ ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดมีค่าต่ำกว่าการทดสอบด้วยน้ำทุกระดับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.4 ถึง 5.6

5.3.3 ผลการทดสอบดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง

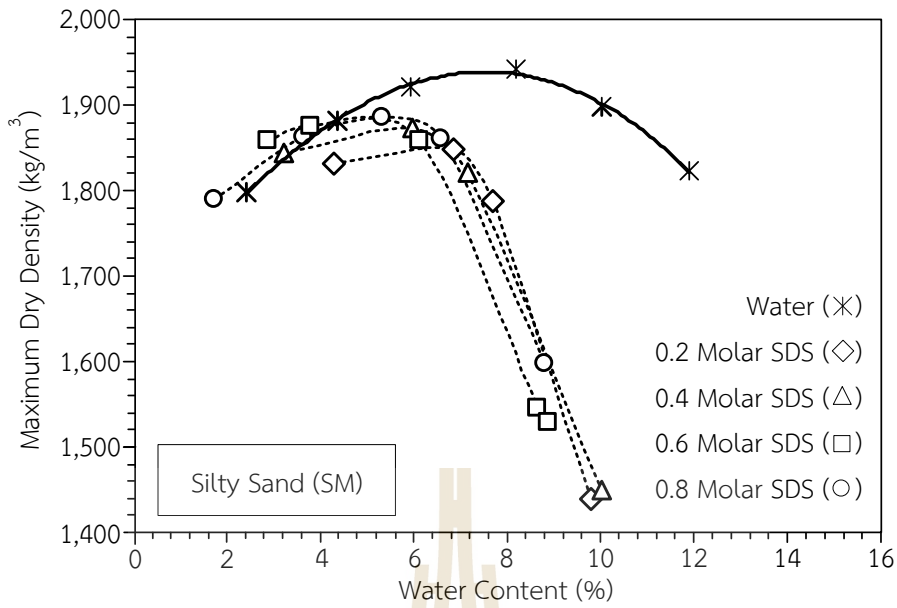
จากการทดสอบการบดอัดดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) ด้วย Nonyl Phenol Ethoxylate ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก และ Sodium Dodecyl Sulfate ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์ ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินบดอัดมีค่าต่ำกว่าการทดสอบด้วยน้ำทุกระดับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ส่วนผลการทดสอบด้วย CON-AID พบว่าความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดเพิ่มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น รูปที่ 5.7 ถึง 5.9 แสดงผลการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอนโดยใช้สารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด ตารางที่ 5.1 ถึง 5.3 สรุปค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินทั้ง 3 ชนิด จากการบดอัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิวด้วยระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน



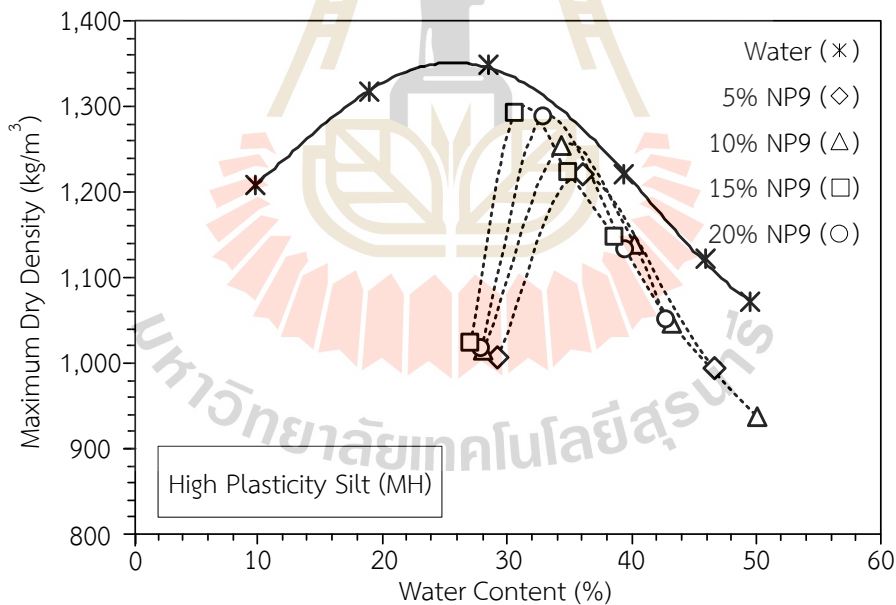
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) โดยใช้สาร Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก



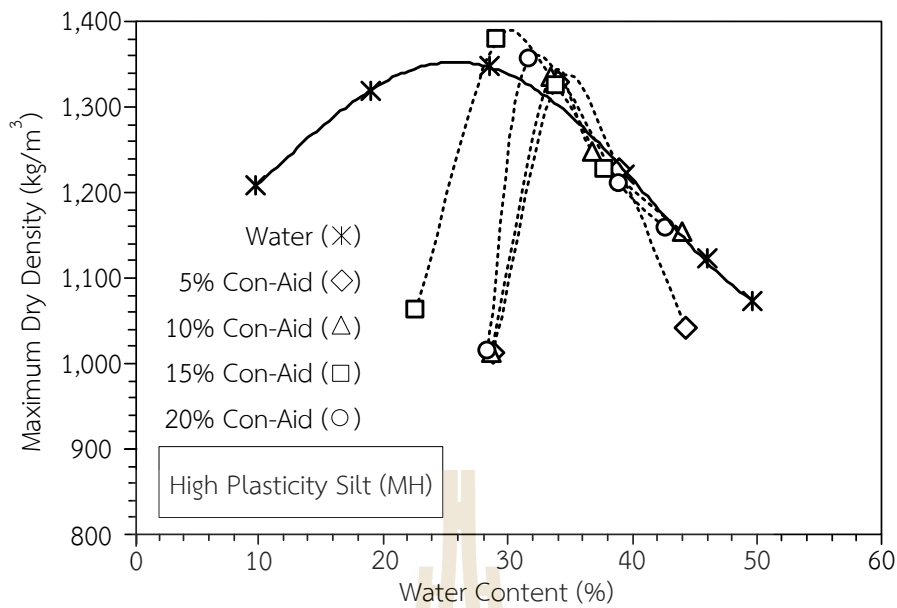
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) โดยใช้สาร CON-AID ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก



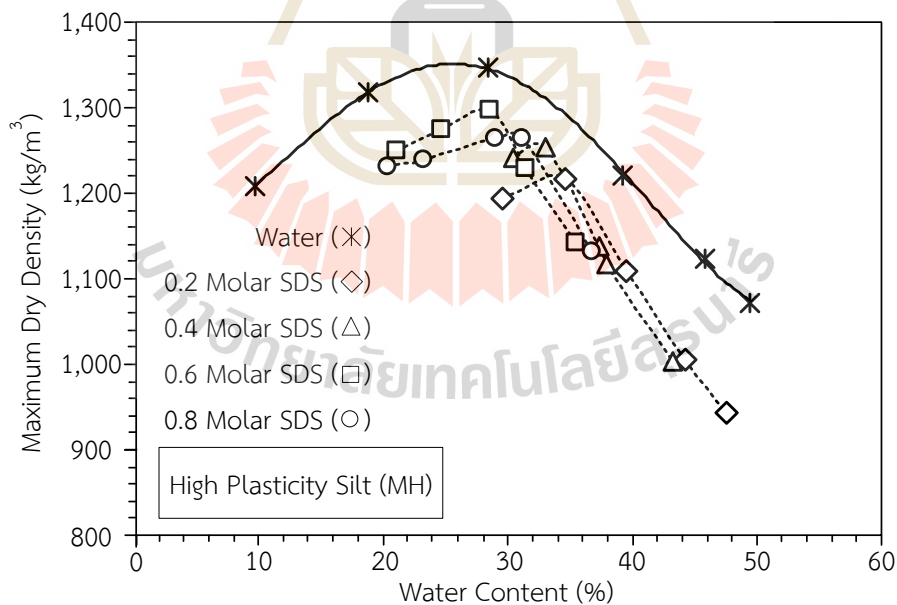
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) โดยใช้สาร Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) โดยใช้สาร Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) โดยใช้สาร CON-AID ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัดดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) โดยใช้สาร Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โมลาร์

ตารางที่ 5.1 ค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินเหนียวที่มีพลาสติกซิติสูง (High plasticity clay, CH) ที่ทำการบดอัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด

ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	ค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด (kg/m ³)	ปริมาณความชื้น ที่เหมาะสม (%)
Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 5% • 10% • 15% • 20% 	<p>1,632</p> <p>1,572</p> <p>1,588</p> <p>1,605</p> <p>1,632</p>	<p>20.7</p> <p>19.0</p> <p>18.2</p> <p>17.8</p> <p>16.5</p>
Con-Aid <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 5% • 10% • 15% • 20% 	<p>1,632</p> <p>1,599</p> <p>1,615</p> <p>1,620</p> <p>1,641</p>	<p>20.7</p> <p>19.1</p> <p>20.0</p> <p>20.5</p> <p>16.0</p>
Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 0.2 โมลาร์ • 0.4 โมลาร์ • 0.6 โมลาร์ • 0.8 โมลาร์ 	<p>1,632</p> <p>1,655</p> <p>1,640</p> <p>1,570</p> <p>1,551</p>	<p>20.7</p> <p>14.5</p> <p>15.0</p> <p>16.5</p> <p>20.5</p>

ตารางที่ 5.2 ค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) ที่ทำการบดอัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด

ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (kg/m ³)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)
Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 5% • 10% • 15% • 20% 	<p>1,940</p> <p>1,905</p> <p>1,910</p> <p>1,915</p> <p>1,915</p>	<p>7.6</p> <p>7.2</p> <p>7.4</p> <p>7.0</p> <p>7.0</p>
Con-Aid <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 5% • 10% • 15% • 20% 	<p>1,940</p> <p>1,900</p> <p>1,910</p> <p>1,915</p> <p>1,905</p>	<p>7.6</p> <p>7.6</p> <p>7.6</p> <p>7.0</p> <p>7.0</p>
Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 0.2 โมลาร์ • 0.4 โมลาร์ • 0.6 โมลาร์ • 0.8 โมลาร์ 	<p>1,940</p> <p>1,850</p> <p>1,875</p> <p>1,885</p> <p>1,885</p>	<p>7.6</p> <p>6.6</p> <p>6.0</p> <p>5.6</p> <p>5.0</p>

ตารางที่ 5.3 ค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) ที่ทำการบดอัดโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด

ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	ค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด (kg/m ³)	ปริมาณความชื้น ที่เหมาะสม (%)
Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9) <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 5% • 10% • 15% • 20% 	<p>1,360</p> <p>1,220</p> <p>1,260</p> <p>1,290</p> <p>1,295</p>	<p>26.0</p> <p>36.0</p> <p>35.0</p> <p>33.5</p> <p>31.0</p>
Con-Aid <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 5% • 10% • 15% • 20% 	<p>1,360</p> <p>1,335</p> <p>1,345</p> <p>1,360</p> <p>1,390</p>	<p>26.0</p> <p>35.0</p> <p>34.0</p> <p>32.0</p> <p>30.0</p>
Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) <ul style="list-style-type: none"> • 0% (pure water) • 0.2 โมลาร์ • 0.4 โมลาร์ • 0.6 โมลาร์ • 0.8 โมลาร์ 	<p>1,360</p> <p>1,220</p> <p>1,260</p> <p>1,270</p> <p>1,300</p>	<p>26.0</p> <p>34.0</p> <p>32.5</p> <p>30.5</p> <p>28.0</p>

5.4 สรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการบดอัดของดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) ดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) และดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) ด้วย Nonyl Phenol Ethoxylate, CON-AID และ Sodium Dodecyl Sulfate สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดนี้ ไม่สามารถทำให้ความหนาแน่นของการบดอัดเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามยังมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดมีค่าลดลง และยังทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ในเบื้องต้น ดังนั้นควรมีการศึกษาสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น

CON-AID เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) ซึ่งผลิตโดยบริษัท CON-AIS Asia co., LTD. หากใช้ในระดับที่มีความเข้มข้นสูง (มากกว่า 20%) สามารถเพิ่มความหนาแน่นแห้งของดินเม็ดละเอียด ได้แก่ ดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง และดินตะกอน แต่อย่างไรก็ตามในการบดอัดต้องใช้สารชนิดนี้ในปริมาณที่สูง ข้อสรุปอีกประการหนึ่งคือสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ไม่เหมาะสมกับดินเม็ดหยาบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้



บทที่ 6

การทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์

6.1 กล่าวนำ

การทดสอบการบดอัดเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับปรุงสมบัติของชั้นดินเชิงวิศวกรรม เช่น การก่อสร้างถนน การปรับปรุงดินและการสร้างเขื่อนดิน โดยการบดอัดดินนั้นมีจุดประสงค์เพื่อทำการเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานและกำลังรับแรงเฉือนสูง การบดอัดดินจะทำให้อนุภาคของเม็ดดินใกล้ชิดขึ้นและเป็นการลดช่องว่างที่เป็นอากาศในมวลดิน อนุภาคของดินที่เคลื่อนตัวเข้ามาชิดกันมากยิ่งขึ้นจะทำให้ช่องว่างอากาศลดลง นอกจากนี้จุดมุ่งประสงค์ของการบดอัดดินคือการลดการค่าความชื้นผ่านและเพื่อเพิ่มความกำลังเฉือนของมวลดิน การบดอัดเป็นสิ่งสำคัญในงานทางด้านธรณีเทคนิค ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคเพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพของมวลดินด้วยสารเคมีเพื่อการบดอัดดิน สารเคมีบางชนิดทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของดินตามธรรมชาติเพื่อให้สามารถกำจัดอากาศได้ง่ายและอนุภาคของดินที่ใกล้ชิดกัน บทนี้จะกล่าวถึงการทดลองในห้องปฏิบัติการผลการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์ รวมถึงได้มีการสรุปและอภิปรายผลการทดสอบ วัตถุประสงค์ของการศึกษาในหัวข้อนี้ คือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินประสิทธิภาพของจีโอพอลิเมอร์ในการเสริมสร้างกำลังเฉือนของดินดินอัดในสถานะที่ไม่มีการบ่มและมีการบ่มตัวอย่าง

6.2 การเตรียมตัวอย่างและสารจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์คือการนำเถ้าถ่านหิน (FA) ผสมกับตัวกระตุ้นอัลคาไลน์ โดยที่ตัวกระตุ้นอัลคาไลน์เป็นการผสมกันระหว่างโซดาไฟ (NaOH) และไซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในอัตราส่วน 1:1 ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ดินทั้งหมด 3 ชนิด โดยตัวอย่างในการทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มตัวอย่างดินที่ผสมกับเถ้าถ่านหินที่มีส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์และกลุ่มตัวอย่างดินที่ผสมกับน้ำ

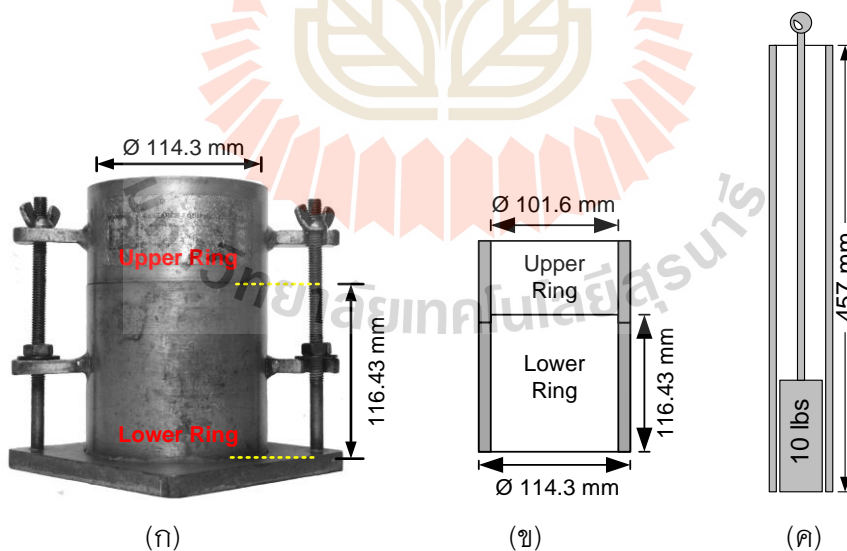
ในการเตรียมตัวอย่าง “วัสดุผสมรวม” ได้นำเถ้าถ่านหินผสมกับดินแต่ละชนิดในอัตราส่วนคงที่ 1:10 (เถ้าถ่านหินคิดเป็น 10% โดยน้ำหนักของดินแห้ง, FA/ดิน = 0.1) ส่วนการเตรียม “สารละลายตัวกระตุ้นอัลคาไลน์” ได้มีการผสมกันระหว่างตัวกระตุ้นอัลคาไลน์ ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 1.0$) กับน้ำในอัตราส่วนคงที่ 1:10 (ตัวกระตุ้นอัลคาไลน์คิดเป็น 10% โดยน้ำหนักของน้ำ, AL/น้ำ = 0.1) เมื่อจัดเตรียมวัสดุผสมรวมและสารละลายตัวกระตุ้นอัลคาไลน์แล้วเสร็จจะมีการบดอัดดินในสถานะที่ความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบบทที่ 5 จากนั้นทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของตัวอย่างในสถานะที่ไม่มีการบ่มและที่มีการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน ตามลำดับ รูปที่ 6.1 แสดงการจัดเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมรวมและสารละลายตัวกระตุ้นอัลคาไลน์

สารละลายตัวกระตุ้นอัลคาไลน์		วัสดุผสมรวม	
AL (NaOH + Na ₂ SiO ₃) (1:1)	1 kg	Fly Ash (FA)	1 kg
น้ำ	10 kg	ดิน	10 kg
AL:น้ำ = 1:10		FA:ดิน = 1:10	

รูปที่ 6.1 การจัดเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมรวมและสารละลายตัวกระตุ้นอัลคาไลน์

6.3 การทดสอบการบดอัดดิน

การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการใช้ตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1557 ซึ่งเป็นการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) พลังงานในการบดอัด 56,000 lbf-ft/ft³ (2,700 kN-m/m³) อุปกรณ์ในการทดสอบประกอบด้วยแบบเหล็ก (Mould) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร) สูง 4.584 นิ้ว (116.43 มิลลิเมตร) คิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 0.0333 ft³ (944 cm³) ดินตัวอย่างถูกบดอัดในแบบเหล็กจำนวน 5 ชั้น โดยใช้ค้อนหนัก 10 ปอนด์และมีระยะตกยกเท่ากับ 18 นิ้ว (457.2 mm) ดังแสดงในรูปที่ 6.2 การทดสอบการบดอัดในบทยี่จะเหมือนกับการทดสอบในบทยี่ 5 แต่มีความแตกต่างกันตรงที่บทยี่ใช้สารซีโอพอลิเมอร์ในการทดสอบการบดอัด



รูปที่ 6.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D1557 (ก) แบบเหล็ก (ข) ภาพตัดขวางแบบเหล็กมาตรฐาน (ค) ค้อนที่ใช้ในการบดอัด

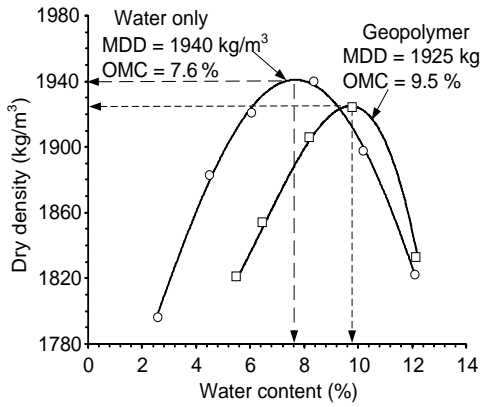
การทดสอบการบดอัดดินนั้นวัสดุมวลรวมถูกคลุกเคล้าผสมกันเป็นระยะเวลาประมาณ 10 นาที ทั้งนี้เพื่อผสมให้วัสดุมวลรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำมาผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ที่ได้จัดเตรียมไว้แล้ว โดยความชื้นเริ่มต้นสำหรับทดสอบดินทรายปนดินตะกอนมีค่าเท่ากับ 2% และสำหรับตัวอย่างดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity) ได้แก่ ดินตะกอนและดินเหนียวที่มีพลาสติกชืดสูงกำหนดให้มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 5% หลังจากทำการบดอัดแล้วเสร็จ ตัวอย่างดินถูกนำไปประเมินความหนาแน่นและปริมาณความชื้นที่แท้จริงอีกครั้ง จากนั้นจึงนำไปคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นแห้งของดิน การทดสอบจะผันแปรจนกระทั่งได้กราฟเป็นรูปโค้งกลับ จากนั้นจึงนำไปหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและปริมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุดต่อไป

6.4 ผลการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์

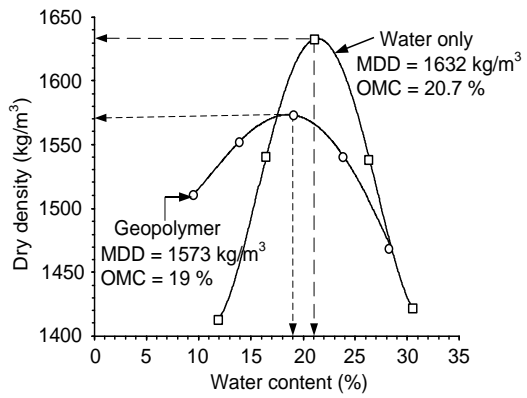
ผลการทดสอบระบุว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินเหนียวที่มีพลาสติกชืดสูง ดินตะกอนปนทราย และดินตะกอนที่มีพลาสติกชืดสูง ที่ทดสอบโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ทำการบดอัดด้วยน้ำเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการขยายตัวของเถาถ่านหินที่มีความหนาแน่นต่ำจึงทำให้ความหนาแน่นสูงสุดที่บดอัดมีค่าลดลง ส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินทรายปนดินตะกอนและดินตะกอนที่บดอัดด้วยสารจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการบดอัดด้วยน้ำ แต่สำหรับดินเหนียวที่มีพลาสติกชืดสูงปริมาณความชื้นบดอัดด้วยสารจีโอพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าที่ทำการบดอัดด้วยน้ำเล็กน้อย ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบให้หัวข้อนี้ใช้กำหนดค่าปริมาณความชื้นสำหรับทำการบดอัดดินเพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในบดถัดไป รูปที่ 6.3 แสดงเส้นโค้งการบดอัดดินของดินทั้ง 3 ชนิด ตารางที่ 6.1 สรุปค่าความหนาแน่นสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดดินทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 6.1 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบดินทั้ง 3 ชนิด โดยใช้น้ำและสารจีโอพอลิเมอร์

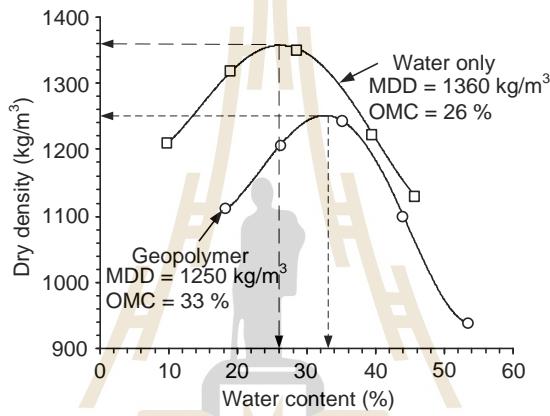
ชนิดของดิน	สารที่ใช้ในการบดอัด	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (kg/m ³)
ดินทรายปนดินตะกอน (SM)	น้ำ	7.6	1,940
	สารจีโอพอลิเมอร์	9.5	1,925
ดินเหนียวด้านเกวียน (CH)	น้ำ	20.7	1,632
	สารจีโอพอลิเมอร์	19.0	1,573
ดินตะกอน (MH)	น้ำ	26.0	1,360
	สารจีโอพอลิเมอร์	33.0	1,250



(ก) ดินทรายปนดินตะกอน (SM)



(ข) ดินเหนียวที่มีพลาสติกซิติสูง (CH)



(ค) ดินตะกอนที่มีพลาสติกซิติสูง (MH)

รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบการบดอัดดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์และน้ำ



บทที่ 7

การทดสอบกำลังเฉือน

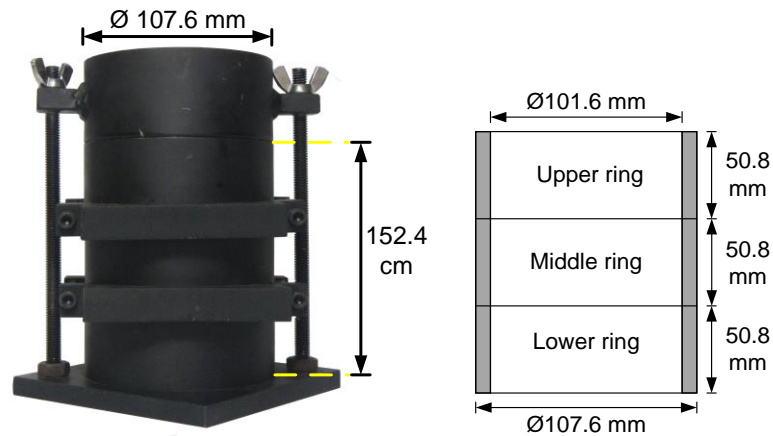
7.1 กล่าวนำ

กำลังเฉือนเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการวิเคราะห์และออกแบบงานด้านวิศวกรรมดิน เช่น ความลาดเอียงของมวลดินถม ดินบดอัดที่เป็นแนวเชื่อมดินถม และงานฐานรากของมวลดิน การทดสอบกำลังเฉือนของดินสามารถใช้ในการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) และการทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ซึ่งการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงเป็นรูปแบบที่เก่าแก่และง่ายที่สุดในห้องปฏิบัติการเนื่องจากเวลาที่ทำการทดสอบทำได้รวดเร็วและการเตรียมตัวอย่างทำได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถประเมินกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างแบบคงสภาพและตัวอย่างที่ถูกรบกวนจากขั้นตอนการเก็บ รวมถึงวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมอีกด้วย

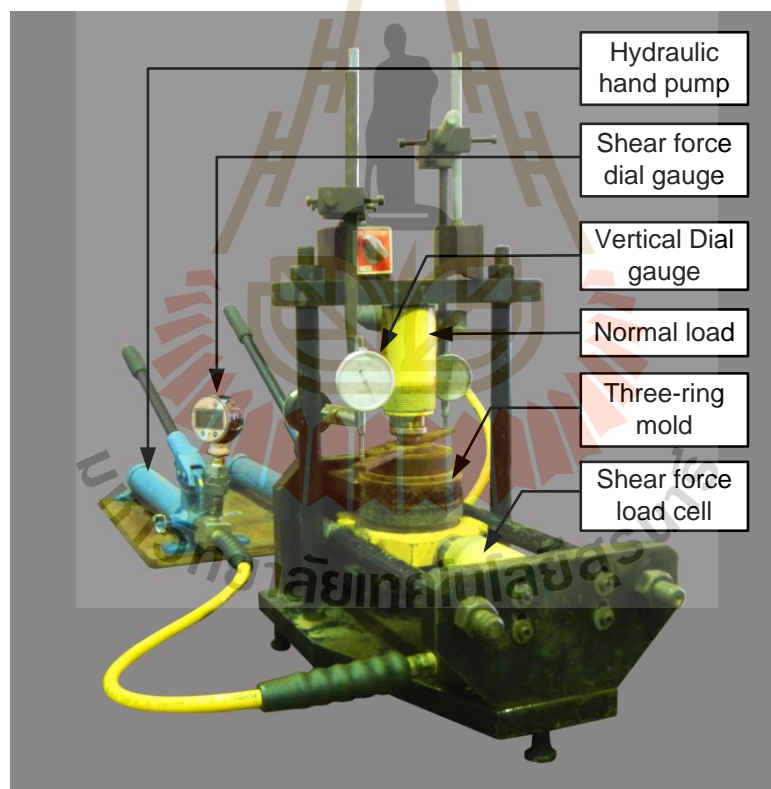
ในบทนี้กำลังเฉือนของดินจะใช้เครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน (Three-ring direct shear test device) จุดประสงค์การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบดอัดดินโดยใช้สารซีโอพอลิเมอร์และการบดอัดด้วยน้ำ ตัวอย่างดินถูกบดอัดด้วยน้ำและสารซีโอพอลิเมอร์โดยใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากผลการทดสอบในบทที่ 6 จากนั้นจึงนำไปทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างดินในสถานะที่ไม่มีการบดตัวอย่าง (ทดสอบกำลังเฉือนทันทีที่ทำการบดอัดแล้วเสร็จ) และสถานะที่มีการบดตัวอย่าง (ที่ระยะเวลา 7 วัน)

7.2 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนแบบสามวงแหวน

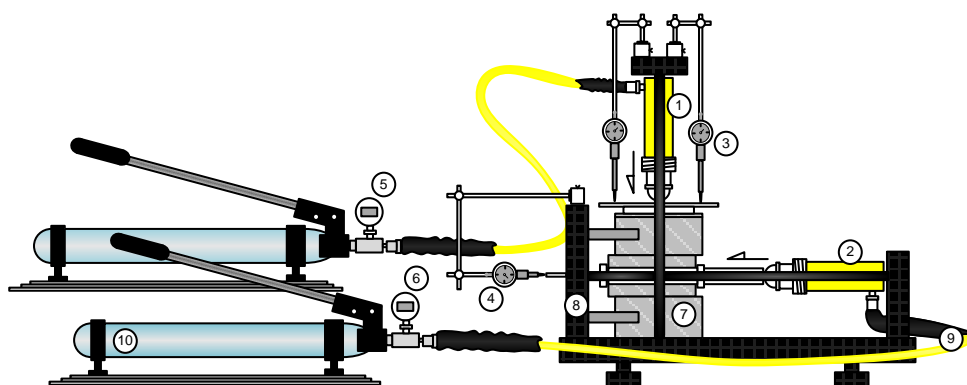
อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนแบบสามวงแหวนประกอบด้วยแบบเหล็กทรงกระบอกจำนวน 4 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ถึง 7.3 แบบเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 107.6 มิลลิเมตร และความสูงของแบบเหล็กที่จะนำมาทดสอบแรงเฉือนมี 3 ชิ้น (3 ชิ้นล่าง) แต่ละชิ้นมีความสูง 58.8 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นความสูงรวมของตัวอย่างเท่ากับ 152.4 มิลลิเมตร วงแหวนสามวงยึดอยู่บนแผ่นฐานโดยใช้สลักเกลียวเหล็กและที่หนีบเหล็กสองชิ้น ตัวอย่างดินถูกบดอัดด้วยค้อนเหล็ก 10 ปอนด์ จำนวน 5 ชั้น แต่ละชั้นจะบดอัดจำนวน 27 ครั้ง ซึ่งคิดเป็นระดับพลังงานการบดอัดเท่ากับ 56,000 lbf-ft/ft³ (2,700 kN-m/m³) เท่ากับระดับพลังงานของการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM 1554)



รูปที่ 7.1 แบบเหล็กทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร จำนวนสามวงแหวน และมีส่วนของปลอกด้านบนซึ่งจะถูกถอดออกขณะที่นำไปทดสอบกำลังเฉือน



รูปที่ 7.2 การติดตั้งแบบเหล็กสามวงแหวนในขณะที่ทำการทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างดินบดอัด ในขณะที่ทดสอบทำการติดตั้งปั๊มไฮดรอลิกสำหรับให้แรงกดในแนวตั้งฉากและแรงเฉือน และมีการติดตั้งเกจวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและแนวเฉือนด้วย



- | | |
|---|--|
| (1) Hydraulic load cell for normal force | (6) Digital dial gauge for shear force measurement |
| (2) Hydraulic load cell for shear force | (7) Three-ring mold |
| (3) Precise dial gauge for vertical deformation | (8) Direct shear frame |
| (4) Precise dial gauge for shear displacement | (9) Hydraulic pipe between hand pump and load cell |
| (5) Digital dial gauge for normal force measurement | (10) 20-tons hydraulic hand pump |

รูปที่ 7.3 มุมมองด้านข้างของเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบสามวงแหวน

จากงานวิจัยของ กิตติเทพ เฟื่องขจร (2554) และ Sonsakul et.al. (2013) พบว่าผลจากการทดสอบการบดอัดโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบสามวงแหวนและแบบเหล็กมาตรฐานได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ใกล้เคียงกันมาก ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนแบบสามวงแหวนในการประเมินกำลังเฉือนของดินที่บดอัด และเหตุผลอีกประการหนึ่งคือ หลังจากทดสอบการบดอัดในแบบเหล็กแล้ว ตัวอย่างดินบดอัดสามารถนำไปทดสอบกำลังเฉือนได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องนำตัวอย่างออกจากแบบเหล็ก ซึ่งลดการรบกวนตัวอย่างดินได้

7.3 การทดสอบกำลังเฉือน

ตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดถูกผสมกับน้ำและสารจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ค่าความชื้นที่เหมาะสมที่ทดสอบได้ในบทที่ 6 จากนั้นนำไปบดอัดในแบบเหล็กสามวงแหวนภายใต้กำลังการบดอัดที่เป็นไปตามมาตรฐานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จากนั้นถอดเอาเฉพาะแบบเหล็กสามวงแหวนมาติดตั้งในเครื่องมือทดสอบแรงเฉือน (รูปที่ 7.2 และ 7.3) ในการทดสอบตัวอย่างที่ไม่ต้องบดนั้น จะให้แรงกดในแนวตั้งฉากกับตัวอย่าง (ผันแปรตั้งแต่ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 MPa) และให้แรงกดในแนวเฉือนเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่อัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในขณะที่เดียวจะมีการอ่านและบันทึกค่าแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนจนกระทั่งตัวอย่างดินมีการเคลื่อนตัวสูงสุด 10 มิลลิเมตร ส่วนตัวอย่างที่ต้องบดนั้นหลังจากทำการบดอัดแล้วเสร็จจะถอดและเก็บรักษาความชื้นไว้ในถุงพลาสติกป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากตัวอย่างด้วยกระบวนการระเหย และยั้งทิ้งไว้ให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นระยะเวลา 7 วัน ในสภาวะอุณหภูมิห้อง (27–30 °C) ก่อนจะนำมาประเมินกำลังเฉือนของตัวอย่างต่อไป

การคำนวณผลการทดสอบกำลังเฉือนของดินบดอัดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\tau = F / 2A \quad (7.1)$$

เมื่อ τ = ค่าความเค้นเฉือน
 F = แรงต้านทานการเฉือน
 A = พื้นที่เฉือนของตัวอย่าง

เมื่อลงจุดระหว่างค่าความเค้นตั้งฉากและค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบน Mohr's Diagram แล้วลากเส้นตรงผ่านจุดเหล่านั้น เส้นตรงนี้เรียกว่า "Mohr – Coulomb Failure Envelope" คือเส้นแทนค่าความแข็งแรงหรือกำลังของดินบดอัดตั้งสมการ

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad (7.2)$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน
 C = ความเค้นยึดติด
 σ_n = ความเค้นตั้งฉากบนระนาบวิบัติ
 ϕ = มุมเสียดทานภายใน

ตารางที่ 7.1 และ 7.2 สรุปค่าปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้งของตัวอย่าง หลังจากการบดอัด ผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบการบดอัดด้วย ASTM 1554 ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของตัวอย่างมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้ในบทที่ 6 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบการบดอัดแบบสามวงแหวนมีความน่าเชื่อถือและเป็นไปตามมาตรฐาน

7.4 ผลการทดสอบกำลังเฉือนและการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลการทดสอบแรงเฉือนถูกนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวตามแนวแรงเฉือน ภายใต้ความเค้นกดตั้งฉากที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 MPa ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินทรายปนดินตะกอน (SM) ดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (CH) ด่วนน้ำและสารจีโอพอลิเมอร์กรณีที่ไม่บ่มตัวอย่าง (ทดสอบกำลังเฉือนทันทีที่ทำการบดอัดแล้วเสร็จ) มีค่ากำลังเฉือนเฉือนสูงสุดใกล้เคียงกัน ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าทันทีที่บดอัด สารจีโอพอลิเมอร์ยังไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้การทดสอบกำลังเฉือนด้วยน้ำและสารจีโอพอลิเมอร์ใกล้เคียงกันดังแสดงเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 7.4 (a) กับรูปที่ 7.4 (c) รูปที่ 7.5 (a) กับรูปที่ 7.5 (c) และรูปที่ 7.6 (a) กับรูปที่ 7.6 (c)

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบค่าความชื้นที่เหมาะสมที่วัดได้จากแบบเหล็กมาตรฐานและค่าความชื้นของตัวอย่างที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างดินบดอัดที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

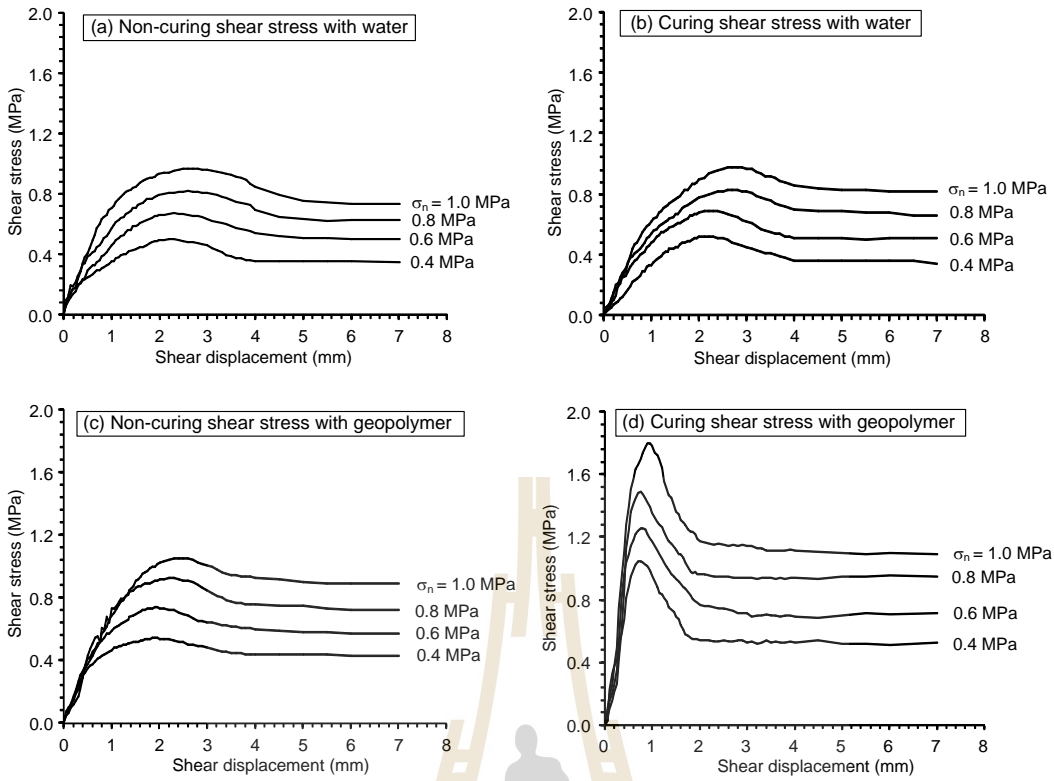
Soil Type	Curing Time (days)	Tested Samples with	OMC* (%)	Moisture Content (%)			
				0.4 MPa	0.6 MPa	0.8 MPa	1.0 MPa
ดินทรายปนดินตะกอน (SM)	0	Water	7.8	7.5	7.6	7.6	7.6
		Geopolymer	9.5	7.4	7.5	7.5	7.9
	7	Water	7.8	7.6	7.7	7.5	7.6
		Geopolymer	9.5	7.7	7.7	7.9	7.9
ดินเหนียวที่มีพลาสติกชนิดสูง (CH)	0	Water	21	19.8	18.1	19.0	18.4
		Geopolymer	19	19.3	19.6	18.6	18.3
	7	Water	21	22.6	22.5	22.0	21.6
		Geopolymer	19	17.3	18.2	17.1	18.3
ดินตะกอนที่มีพลาสติกชนิดสูง (MH)	0	Water	26	27.9	27.6	28.4	27.3
		Geopolymer	32	32.1	32.0	32.7	31.6
	7	Water	26	28.6	28.4	28.6	28.5
		Geopolymer	32	32.4	33.3	32.3	32.4

*OMC เป็นค่าความชื้นที่เหมาะสมที่ทดสอบได้ในบดที่ 6 โดยใช้แบบเหล็กมาตรฐาน

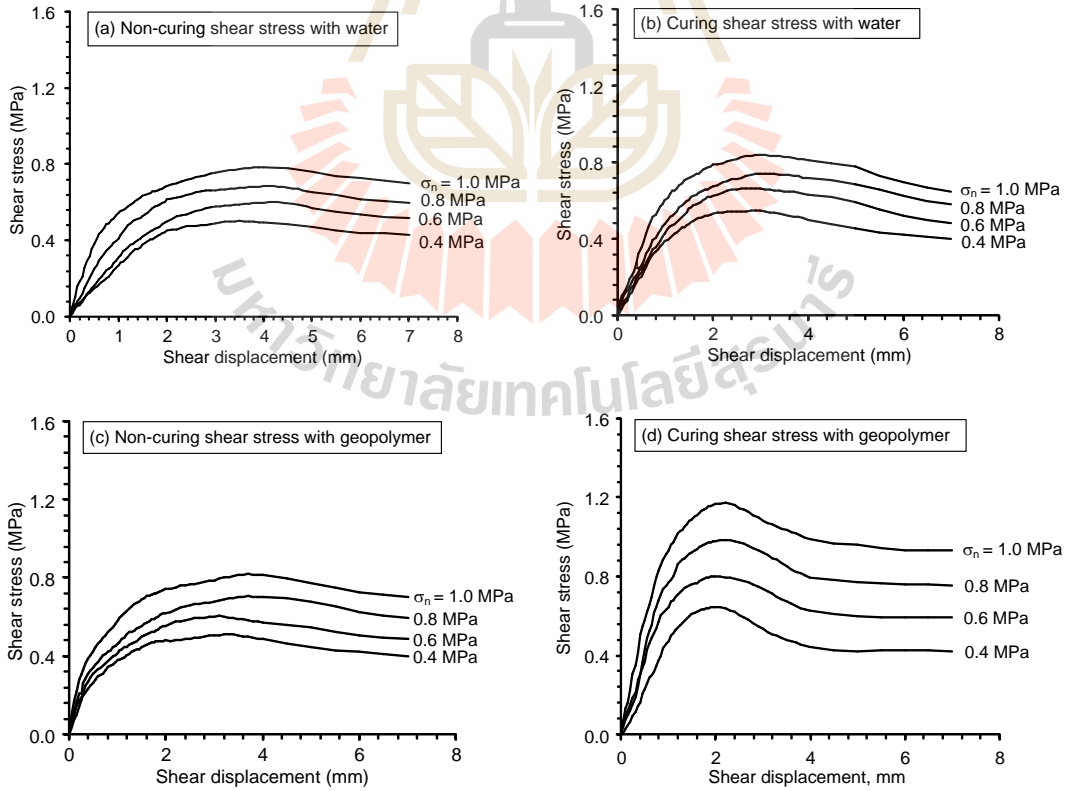
ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่วัดได้จากแบบเหล็กมาตรฐานและค่าความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างดินบดอัดที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน

Soil Type	Curing Time (days)	Tested Samples with	MDD* (kg/m ³)	Dry Density (kg/m ³)			
				0.4 MPa	0.6 MPa	0.8 MPa	1.0 MPa
ดินทรายปนดินตะกอน (SM)	0	Water	1,940	1,937	1,941	1,940	1,941
		Geopolymer	1,925	1,926	1,925	1,925	1,924
	7	Water	1,940	1,940	1,943	1,939	1,939
		Geopolymer	1,925	1,926	1,926	1,924	1,926
ดินเหนียวที่มีพลาสติกชนิดสูง (CH)	0	Water	1,634	1,653	1,635	1,615	1,650
		Geopolymer	1,573	1,589	1,607	1,614	1,619
	7	Water	1,634	1,625	1,635	1,636	1,628
		Geopolymer	1,573	1,598	1,597	1,592	1,655
ดินตะกอนที่มีพลาสติกชนิดสูง (MH)	0	Water	1,360	1,360	1,360	1,360	1,359
		Geopolymer	1,250	1,249	1,250	1,250	1,250
	7	Water	1,360	1,360	1,360	1,359	1,359
		Geopolymer	1,250	1,249	1,249	1,250	1,250

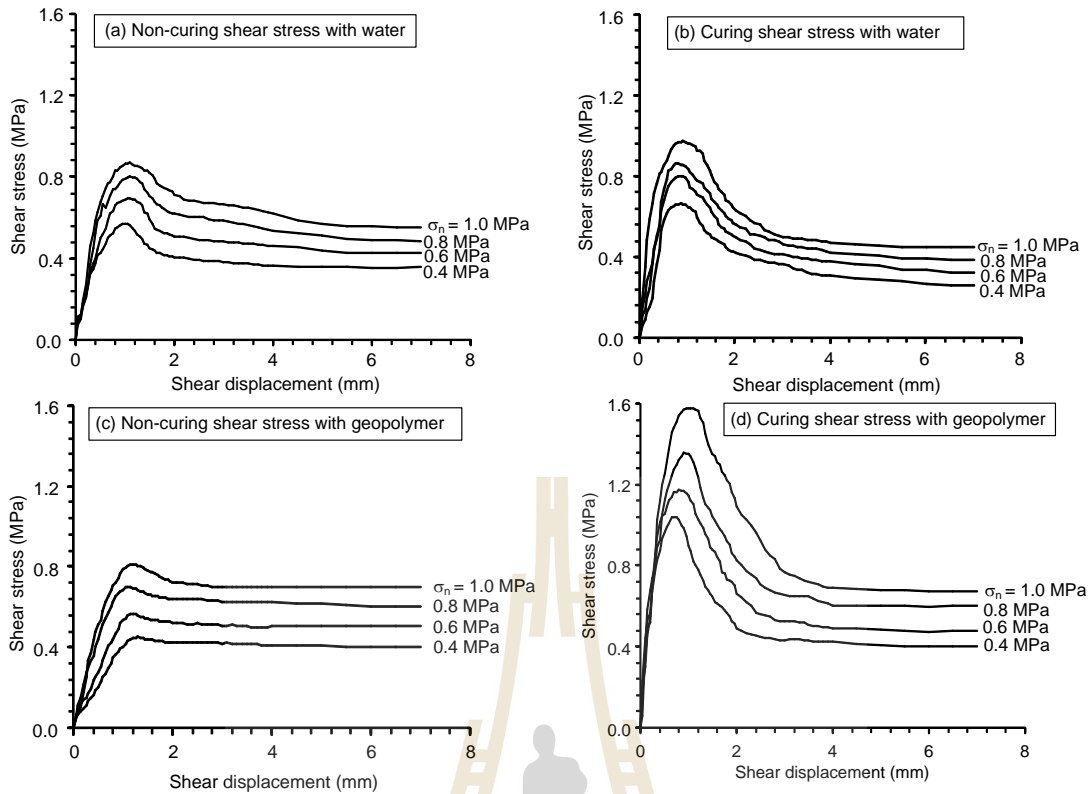
*MDD เป็นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ทดสอบได้ในบดที่ 6 โดยใช้แบบเหล็กมาตรฐาน



รูปที่ 7.4 ความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนสำหรับตัวอย่างดินทรายปนดินตะกอน



รูปที่ 7.5 ความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนสำหรับตัวอย่างดินตะกอนที่มีพลาสติคซีตัสสูง



รูปที่ 7.6 ความเค้นเฉือนและการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนสำหรับตัวอย่างดินเหนียวที่มีพลาสติคซีตี่สูง

การเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 7.4 (c) กับรูปที่ 7.4 (d), รูปที่ 7.5 (c) กับรูปที่ 7.5 (d) และรูปที่ 7.6 (c) กับรูปที่ 7.6 (d) พบว่ากำลังเฉือนของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทดสอบโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์ในกรณีที่มีการบ่มตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น 1.5 ถึง 2 เท่า ซึ่งสามารถได้สรุปว่าในตัวอย่างดินเกิดปฏิกิริยาทางมีของสารจีโอพอลิเมอร์จึงทำให้กำลังของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังเฉือนของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ที่บดอัดด้วยน้ำในกรณีที่ไม่บ่มตัวอย่างและมีการบ่มตัวอย่าง ผลระบุว่ากำลังเฉือนเฉือนสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างดินที่ทดสอบนั้นไม่มีการสูญเสียความชื้นออกจากตัวอย่างถึงแม้ว่าจะผ่านไปแล้ว 7 วัน (รูปที่ 7.4 (a) และ 7.4 (b) รูปที่ 7.5 (a) และ 7.5 (b) และ รูปที่ 7.6 (a) และ 7.6 (b)) การเปรียบเทียบนี้มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันว่ากำลังของตัวอย่างดินที่บดอัดด้วยจีโอพอลิเมอร์ไม่ได้สูงเพราะตัวอย่างแห้งและแข็งขึ้นเพราะการสูญเสียความชื้น แต่เป็นเพราะปฏิกิริยาทางเคมีของสารจีโอพอลิเมอร์ที่ทำให้กำลังของดินที่ผ่านการบ่มมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 7.7 แสดงตัวอย่างหลังจากการทดสอบกำลังเฉือนโดยใช้เครื่องทดสอบแบบสามวงแหวน ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างถูกเฉือนออกจากกันผ่านแนวเฉือน 2 แนวบริเวณรอยต่อของแบบเหล็กที่ซ้อนกันทั้ง 3 ชั้น ดังนั้นจึงมีพื้นที่รับแรงเฉือน 2 ระนาบ



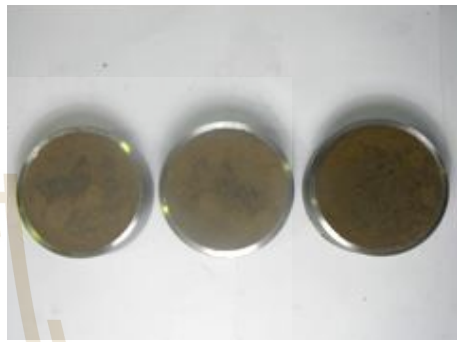
(a) Non-curing state of silty sand



(b) Curing state of silty sand



(a) Non-curing state of sludge



(b) Curing state of sludge



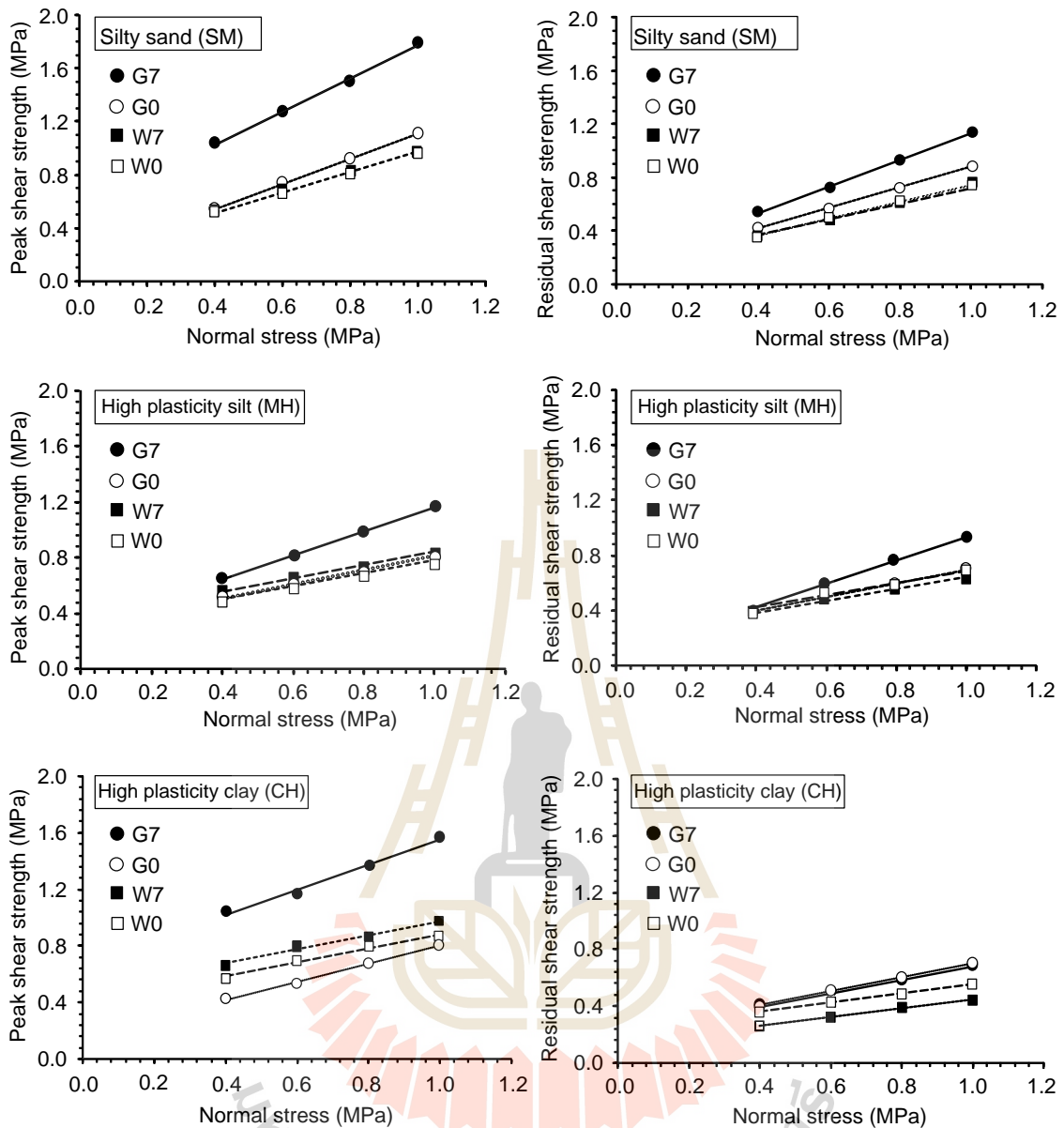
(a) Non-curing state of high plasticity clay



(b) Curing state of high plasticity clay

รูปที่ 7.7 ลักษณะของรอยเลื่อนบนตัวอย่างหลังจากการทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) และกำลังเฉือนคงค้าง (Residual shear strength) กับความเค้นตั้งฉากของการทดสอบดินทั้ง 3 ชนิด ด้วยน้ำและสารจีโอพอลิเมอร์ในกรณีที่ไม่มีการบ่มตัวอย่างและมีการบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 7 วัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.8 จากรูปได้แสดงไว้อย่างชัดเจนว่ากำลังเฉือนของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทดสอบโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์ในกรณีที่มีการบ่มตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น 1.5 ถึง 2 เท่า ซึ่งสามารถได้สรุปว่าในตัวอย่างดินเกิดปฏิกิริยาทางมีของสารจีโอพอลิเมอร์จึงทำให้กำลังของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง ตารางที่ 7.3 สรุปค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานภายในของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทดสอบโดยไม่มีการบ่มและบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน



รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนสูงสุดและกำลังเฉือนคงค้างกับความเค้นตั้งฉากของการทดสอบดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทดสอบด้วยน้ำและสารจีโอพอลิเมอร์ในกรณีที่ไม่มีการบ่มตัวอย่างและมีการบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน (W0 = ทดสอบด้วยน้ำกรณีที่ไม่มีการบ่มตัวอย่าง, W7 = ทดสอบด้วยน้ำกรณีที่มีการบ่มตัวอย่าง 7 วัน, G0 = ทดสอบด้วยจีโอพอลิเมอร์กรณีที่ไม่มีการบ่มตัวอย่าง, G7 = ทดสอบด้วยสารจีโอพอลิเมอร์กรณีที่มีการบ่มตัวอย่าง 7 วัน)

ตารางที่ 7.3 ค่าความเค้นยึดติดและมุมเสียดทานภายในของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ที่ทดสอบ โดยไม่มีการบ่มและปมตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน

Soil Type	Curing Time (days)	Tested Samples with	Peak		Residual	
			c_p (MPa)	ϕ_p (Degrees)	c_r (MPa)	ϕ_r (Degrees)
ดินทรายปน ดินตะกอน (SM)	0	Water	0.20	37.8	0.11	32.5
		Geopolymer	0.22	43.3	0.12	37.3
	7	Water	0.23	36.7	0.11	32.4
		Geopolymer	0.59	51.4	0.13	45.1
ดินเหนียวที่มี พลาสติกซีดี สูง (CH)	0	Water	0.38	26.5	0.23	18.0
		Geopolymer	0.17	32.4	0.21	26.2
	7	Water	0.48	26.2	0.14	17.4
		Geopolymer	0.66	41.8	0.24	25.2
ดินตะกอน ที่มีพลาสติกซีดี สูง (MH)	0	Water	0.32	25.0	0.25	23.8
		Geopolymer	0.30	27.2	0.19	26.8
	7	Water	0.37	25.4	0.21	23.3
		Geopolymer	0.29	41.3	0.08	40.5

บทที่ 8

สรุปผลงานวิจัย

8.1 สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินด้านกำลังรับแรงเฉือนของดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวและสารจีโอพอลิเมอร์ โดยที่มีการทดสอบความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างดิน ชนิด 3 ได้แก่ ดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) จากบ้านหนองบง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 2) ดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity silt, MH) จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ และ 3) ดินเหนียวที่มีพลาสติกซีดีสูง (High plasticity clay, CH) จากบ้านด่านเกวียน อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา

ในการศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อการบดอัดดินนั้น ผู้วิจัยได้ทำการบดอัดดินทั้ง 3 ชนิด การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM 1554 ซึ่งเป็นการบดอัดสูงกว่ามาตรฐานที่คิดเป็นพลังงานบดอัดเท่ากับ $2,700 \text{ kN-m/m}^3$ การบดอัดได้ใช้น้ำเปล่าและสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ Nonyl Phenol Ethoxylate (NP9), CON-AID และ Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ผลการทดสอบสรุปเบื้องต้นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดนี้ ไม่สามารถทำให้ความหนาแน่นของการบดอัดเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามยังมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินบดอัดมีค่าลดลง และยังทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินบดอัดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลที่ได้ไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ในเบื้องต้น ดังนั้นควรมีการศึกษาสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น CON-AID เป็นสารลดแรงตึงผิวเพียงชนิดเดียว ที่หากใช้ในระดับที่มีความเข้มข้นสูง (มากกว่า 20%) สามารถเพิ่มความหนาแน่นแห้งของดินเม็ดละเอียดได้แต่ไม่เหมาะสมกับดินเม็ดหยาบ

การศึกษานี้พบอิทธิพลของสารจีโอพอลิเมอร์ต่อกำลังเฉือนของดินบดอัด ผลการศึกษาระบุว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินทรายปนดินตะกอนและดินตะกอนที่มีพลาสติกซีดีสูงที่ทดสอบโดยผสมกับเถ้าถ่านและสารจีโอพอลิเมอร์มีค่าสูงกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผสมกับน้ำเพียงเล็กน้อย ส่วนปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินเหนียวมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อผสมกับเถ้าถ่านและสารจีโอพอลิเมอร์ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินที่ผสมกับเถ้าถ่านและสารจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างดินที่ผสมกับน้ำประมาณสองเท่าในสถานะที่มีการบดตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านผสมสารจีโอพอลิเมอร์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินได้โดยการเพิ่มความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานภายใน ทั้งนี้เป็นเพราะเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำ เถ้าถ่านหินและตัวกระตุ้นอัลคาไลน์ จากเทคนิคดังกล่าวกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้สารจีโอพอลิเมอร์ สำหรับการเสริมสร้างความแข็งแรงของเขื่อนดิน ความลาดชันของมวลดิน และมวลดินใต้ฐานรากเขื่อน

8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

การวิจัยในอนาคตเพื่อที่จะให้เข้าใจผลกระทบการบดอัดดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวและการใช้สารจีโอพอลิเมอร์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

- 1) การทดสอบการบดอัดเพื่อศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อการบดอัดดินนั้น ควรที่จะใช้สารเคมีชนิดอื่นให้มีความหลากหลายมากขึ้น
- 2) ควรที่จะมีการวิเคราะห์โครงสร้างและรูปร่างของเม็ดดินระดับไมโครหลังจากการบดอัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope , SEM) หรือการทดสอบ X-ray Diffraction เพื่อศึกษาและทำนายปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นของสารจีโอพอลิเมอร์กับสารกระตุ้นอัลคาไลน์ นอกจากนี้อาจศึกษาแรงเสียดทานและประจุไฟฟ้าของดินเพิ่มขึ้น
- 3) ควรใช้ตัวอย่างดินที่หลากหลายมากขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวและสารจีโอพอลิเมอร์ในการบดอัดดิน
- 4) ควรศึกษาการบดอัดดินโดยผันแปรอัตราส่วนของสารกระตุ้นอัลคาไลน์และน้ำที่หลากหลายกว่านี้ ส่วนวัสดุผสมร่วมควรที่จะมีการผันแปรสัดส่วนของเถ้าถ่านหินและดินให้หลากหลายมากกว่านี้
- 5) การบ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยสารจีโอพอลิเมอร์ควรที่จะทดสอบที่ระยะเวลาานานกว่านี้ เช่น บ่มตัวอย่างที่ 14 และ 28 วัน เพื่อให้ปฏิกิริยาทางเคมีเข้าสู่จุดสิ้นสุด
- 6) การทดสอบกำลังเฉือนของดินบดอัดควรจะมีการทดสอบในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เพราะในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบดอัดจริง ดินบดอัดอาจอยู่ในสภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำในกรณีที่มีในตึกหนัก หรือบริเวณที่บดอัดอยู่ใต้ระดับน้ำ

บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง (2532). มาตรฐานที่ ทล.-ม. 102/2532: มาตรฐานงานดินถม, กองวิเคราะห์ และวิจัย กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง (2532). มาตรฐานที่ ทล.-ม. 103/2532: มาตรฐานทรายถมคันทาง, กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง (2539). มาตรฐานวิธีการทดลอง (ทล.ท.). ศูนย์วิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- ณัฐภูมิ มากุล และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ (2556). สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ: อิทธิพลของแหล่งเถ้าลอยและอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 36 (1): 99–125.
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ (2548). อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการอัดของมอร์ตาร์เถ้าจีโอโพลิเมอร์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30–CON34.
- สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (2549). คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์, 153 หน้า.
- Abdullah, W.S., Alshibli, K.A. and Al-Zou'bi, M.S. (1999). Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays. *Appl. Clay Sci.* 15: 447–462.
- Akbulut, S., Arasan, S., and Nese, K.Z. (2010). Some geotechnical properties of two organoclays. In *Indian Geotechnical Conference*, December 16–18, 2010, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay, pp. 605–608.
- Akbulut, S., Kurt, Z.N., Arasan, S., and Pekdemir, Y. (2013). Geotechnical properties of some organoclays. *Sadhana* 38 (Part 2): 317–329.
- Akbulut, S., Nese, K.Z., and Arasan, S. (2012). Surfactant modified clays' consistency limits and contact angles. *Earth Sciences Research Journal* 16 (2): 13–19.
- Alonso, S. and Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solid ratio. *Mater. Lett.* 47(1–2): 55–62.
- Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M. and Barra, M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. *Journal of Hazardous Materials*. 154(1–3): 175–183.

- Arasan, S. (2010). Effect of chemicals on geotechnical properties of clay liner: a review. *Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology* 2(8): 765–775.
- Arasan, S. and Yetimoglu, T. (2008). Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.*, 32: 107–115.
- ASTM C 618 (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use in Concrete. In *Annual Book of ASTM Standard* (Vol. 40.08). Philadelphia: American Society for Testing and Material.
- ASTM C 311 (2015). Standard Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland–Cement Concrete. In *Annual Book of ASTM Standard* (Vol. 40.08). Philadelphia: American Society for Testing and Material.
- ASTM D 1140–54 (2011). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort [12,400 ft–lb/ft³ (600 kN–m/m³). In *Annual Book of ASTM Standard* (Vol. 40.08). Philadelphia: American Society for Testing and Material.
- ASTM D 1557 (2012). Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. In *Annual Book of ASTM Standards*. 04.08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 2487 (2011). Standard Practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). In *Annual Book of ASTM Standards*. 04.08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 3080 (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. American Society for Testing and Material, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 3080 (2014). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. In *Annual Book of ASTM Standards*. 04.08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 422 (2007). Standard test method for particle–size analysis of soils. In *Annual Book of ASTM Standards*. 04.08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 4318 (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity index of Soils. In *Annual Book of ASTM Standards*. 04.08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 854 (2010). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. In *Annual Book of ASTM Standards*. 04.08. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

- ASTM D2487 (1996). Standard Classification of Soils for Engineering Purposes, American Society for Testing and Materials, ASTM Annual Book of Standards, Volume 04.08 on Soil and Rock, Section 4 – Construction, West Conshohocken, PA.
- Bagewadi, S.V. and Rakaraddi, P.G. (2015). Effect of geopolymer on the strength of Black Cotton soil. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 4 (8): 229 – 231.
- Bagherzadeh, K.A. and Mirghasemi, A.A. (2009). Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils. *Particuology*. 7(1): 83–91.
- Bergado, D. T., Ramana, G. V., Sia, H. I. and Varun (2006). Evaluation of interface shear strength of composite liner system and stability analysis for a landfill lining system in Thailand. *Geotextiles and Geomembranes*. 24(6): 371–393.
- Bhat, D. R., Bhandary, N., and Yatabe, R. (2013). Effect of shearing rate on residual strength of kaolin clay. *Electron J Geotech Eng*, 18(G), 1387–1396.
- Chimoye, W., (2014). Strength of soft bangkok clay improved by geopolymer from palm fuel ash. *International Journal of Engineering and Technology Research*. 2(5): 1–10.
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. and Jaturapitakkul, C. (2011). Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials. *Cement and Concrete Composites*. 33(1): 55–60.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering*, 7th edition. Cengage Learning, New York. pp. 666.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymer: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*. 37: 1633–1656.
- Davidovits, J. (2011). *Geopolymer chemistry and applications*. (3rd edition), Institut Géopolymère, France. pp. 4–5.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., and Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*. 42(9): 2917–2933.
- Foreman, D.E. and Daniel, D.E. (1986). Permeation of compacted clay with organic chemicals. *J. Geotech. Eng*. 112(7): 669–681.
- Gungor, N., Alemdar, A., Atici, O. and Ece, I.O. (2001). The effect of SDS surfactant on the flow and zeta potential of bentonite suspensions. *Materials Letters* 51: 250–254.

- Hausmann, M.R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill, New York. pp. 632.
- He, H., Ding, Z., Zhu, J., Yuan, P., Xi, Y., Yang, D. and Frost, R.L. (2005). Thermal characterization of surfactant modified montmorillonites. *Clays and Clay Minerals* 53: 287–293.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Apichatvullop, A. (2008). An approach for assessment of compaction curves of fine grained soils at various energies using a one point test. *Soils and Foundations*. 48(1): 115–125.
- Kalhor, A., (2012). The shear strength analyses of soil with various compactions under vertical load in direct shear test. *Intl. Res. J. Appl. Basic. Sci.* 3 (S):2815–2821.
- Kalidas, N.S. (2014). Strength characteristics of stabilized embankment using fly ash. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* 11 (4): 1 – 34.
- Khedari, J., Warsanasathapron, P. and Hirunlabh, J. (2005). Development of giber-based soil-cement block with low thermal conductivity. *Cement & Concrete Composites*. 7(1): 111–116.
- Lamande, M., Schjonning, P. and Togersen, F.A. (2007). Mechanical behavior of an undisturbed soil subjected to loadings: Effects of load and contact area. *Soil and Tillage Research*. 97(1): 91–106.
- Malhotra, V. M. (2010). Global warming, and role of supplementary cementing materials and superplasticisers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of portland cement. *International Journal of Structural Engineering*. 1(2): 116–130.
- Martinez Rivera, F. J. (2013). Strength and durability of fly ash-based fiber-reinforced geopolymer concrete in a simulated marine environment. (Doctoral dissertation, FLORIDA ATLANTIC UNIVERSITY).pp. 6–10.
- Masada, Y., Izumi, Y. and Kuribayashi, E. (1992). Study on strengthening of soft soil in physico-chemical treatments. In the 10th World Conferences on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, pp. 1145–1150.
- Mitchell, J.K. and Madsen, F.T. (1987). Chemical effects on clay hydraulic conductivity. *Geotech. Practice Waste Disposal*. ASCE, 13: 87–116.
- Moayedi, H., Huat, B. B., Moayedi, F., Asadi, A., and Parsaie, A. (2011). Effect of sodium silicate on unconfined compressive strength of soft clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 16: 289–295.

- Nath, S.K. and Kumar, S. (2013). Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*. 38: 924–930.
- Park, J., Vipulanandan, C., Kim, J.W. and Oh, M.H. (2006). Effects of surfactants and electrolyte solutions on the properties of soil. *Environ. Geol.* 49: 977–989.
- Phummiphan, I., Horpibulsuk, S. and Sukmak, P. (2014). Strength and Microstruce of Marginal Lateritic Soil–Fly Ash Geopolymer. *International Conference on Advanced in Civil Engineering for Sustainable Development (20th Anniversary of Civil Engineering, SUT)*. 2: 719–724.
- Piyawan, S., Walsri, C. and Fuenkajorn, K. (2013). Performance assessment of three–ring compaction and direct shear mold. *Proceeding of Fourth Thailand Symposium on Rock Mechanics*. pp. 133–141.
- Rahman, Z.A., Sahibin, A.R., Lihan, T., Idris, W.M.R. and Sakina, M. (2013). Effects of surfactant on geotechnical characteristics of silty soil. *Sains Malaysiana* 42 (7): 881–889.
- Rashad, A.M. (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali–activated fly ash. *Materials & Design*. 53: 1005–1025.
- Satyanarayana, P.V.V, Rama Rao, R. and Krishna Rao, C.V. (2004). Utilization of lime fly ash stabilized expansive soil in road side embankments. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Warangal*, pp. 465–467.
- Sharma, V.B., Reddy, A.R. and Sastry, S.S. (1992). Some studies on utilizing agroindustrial wastes in soil stabilization. *Proceedings of National conference on CBMIW, Hyderabad*, pp. 34–42.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S. and Shen, S.L. (2013). Strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials* 40: 566–574.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S. L., Chindaprasirt, P., and Suksiripattanapong, C. (2013). Factors influencing strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*. 47: 1125–1136.
- Suzuki, M., Yamamoto, T., Tanikawa, K., Fukuda, J., and Hisanaga, K. (2002). Variation in residual strength of clay with shearing speed. *Yamaguchi Daigaku Kogakubu Kenkyu Hokoku (Memoirs of the Faculty of Engineering, Yamaguchi University)*. 50: 45–49.

ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดโช เพื่อกภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี ในปี พ.ศ. 2552 หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัย สังกัดหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทั้งงานที่เกี่ยวข้องกับเหมืองบนผิวดินและเหมืองใต้ดิน อีกทั้งมีความสนใจในการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเพื่อใช้ในการอุดช่องเหมืองและงานในการบดอัดเพื่องานทางด้านวิศวกรรมธรณี มีสิ่งตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติมากกว่า 20 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร และบทความการประชุมระดับชาติและนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “ธรณีเทคนิค (Geotechniques)” ที่ใช้ในการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี