



การประเมินความเหมาะสมของดินบดอัด สำหรับชั้นกั้นซึมของสถานที่ฝังกลบ
Assessment of Suitable Compacted Soils for Landfill Liner Application

ชัยเจริญ มังด์สาเระ
Chaicharoen Mangudsareh

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเหมาะสมของดินบดอัด สำหรับชั้นกันซึมของสถานที่ ฝังกลบ
ผู้เขียน	นายชัยเจริญ มางัดสาเระ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

ชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยมีหน้าที่ป้องกันน้ำชะมูลฝอยไม่ให้ไหลซึมออกไปปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมภายนอก ตามคำแนะนำของ Daniel และ Benson (1990) ชั้นกันซึมดินบดอัดที่เหมาะสมต้องมีคุณสมบัติดังนี้ 1) มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s 2) ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa และ 3) การหดตัวเชิงปริมาตรของดินไม่เกิน 4% ในการศึกษาชั้นดินท้องถิ่นในจังหวัดสงขลา ได้แก่ ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ถูกนำมาประเมินหาความเหมาะสมของการนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย การทดสอบคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ผลการทดสอบถูกนำมาสร้างกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของทั้งหมดของ สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน กำลังอัดแกนเดียว และการหดตัวเชิงปริมาตร โดยแสดงในรูปแบบตัดแปลงของกราฟการบดอัด ผลการประเมินจากขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดพบว่า ดินที่เหมาะสมเป็นชั้นกันซึมดินบดอัดสำหรับสถานที่ฝังกลบ เรียงลำดับจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ดินลูกรัง และทรายผสมเบนโทไนต์ 5%

คำหลัก: ชั้นกันซึมดินบดอัด สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน กำลังอัดแกนเดียว การหดตัวเชิงปริมาตร ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%

Thesis Title Assessment of Suitable Compacted Soils for Landfill Liner Application
Author Mr. Chaicharoen Mangudsareh
Major Program Civil Engineering
Academic Year 2010

ABSTRACT

The main purpose of landfill liner is for separating leachate from surrounding environment and preventing the groundwater from leachate contamination. As recommended by Daniel and Benson (1990), the compacted soils that can be used as the landfill liner must have the following properties: 1) hydraulic conductivity not greater than 1×10^{-7} cm/s, 2) unconfined compressive strength not less than 200 kPa, and 3) volumetric strain not greater than 4%. In this study, local Songkhla soils including lateritic soil, marine clay, paddy clay and sand-5%-bentonite mixture, were evaluated for potential use as landfill liner. A series of tests for determining index and engineering properties of these soils were conducted. Experimental results obtained were used for delineating acceptable zones for the hydraulic conductivity, the unconfined compressive strength, and the volumetric strain as shown in the modification of compaction graphs. It was found that the suitable soils for use as landfill liner, listed in descending order, were the marine clay, the paddy clay, the lateritic soil, and sand-5% bentonite mixture.

Keywords: Compacted clay liner, Hydraulic conductivity, Unconfined compressive strength, Volumetric strain, Lateritic soil, Marine clay, Paddy clay, Sand-5%-bentonite mixture

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เถлимยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้ ความรู้ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางแก่ผู้วิจัย ตลอดการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ ดร.ชนันท์ ชูบุอุปการ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขนาดล กงสมบูรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและ ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคุณ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ โดยอธิการบดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงรัก พลาศัย ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาส ที่ให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณ น้ำใจอันงดงามของเพื่อนๆ และน้องๆ รุ่นพี่รุ่นน้องนักศึกษาปริญญาโท ปริญญาเอก และอีกหลายๆ ท่าน โดยเฉพาะ Geotech รุ่นปี 2549 ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญที่สุด ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของบิดามารดาและภรรยา รวมทั้งสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและความห่วงใย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้า สำเร็จการศึกษา

ชัยเจริญ มาังคสาระ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง.....	(9)
รายการภาพประกอบ.....	(10)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill) และส่วนประกอบ.....	4
2.1.1 บ่อฝังกลบ.....	4
2.1.2 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบมูลฝอย.....	4
2.2 ธรณีวิทยาของพื้นที่ภาคใต้และจังหวัดสงขลา.....	9
2.2.1 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง.....	11
2.3 ทฤษฎีสมเบนโทไนต์.....	12
2.3.1 ประเภทของเบนโทไนต์.....	13
2.3.2 แหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญ.....	13
2.3.3 ประโยชน์ของเบนโทไนต์.....	14
2.3.4 ทฤษฎีสมเบนโทไนต์.....	14
2.4 โครงสร้างดินเหนียว.....	14
2.4.1 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว.....	15
2.4.2 แร่ดินเหนียวที่สำคัญ.....	16
2.4.3 การจำแนกชนิดของแร่ดินเหนียว.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ทฤษฎีของ Daniel and Benson (1990).....	20
2.5.1 ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน.....	20
2.5.2 ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว.....	22
2.5.3 ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร.....	23
2.5.4 การประเมินความเหมาะสมของชั้นกั้นซึมดินเหนียวบดอัด.....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 วัสดุ เครื่องมือ และขั้นตอนการทดลอง.....	31
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.1.1 ทราผสมเบนโทไนต์ 5% (Sand-5%Bentonite Mixture).....	31
3.1.2 ดินลูกรัง (Lateritic Soil).....	32
3.1.3 ดินเหนียวทะเล (Marine Clay).....	32
3.1.4 ดินเหนียวนา (Paddy Clay).....	32
3.1.5 แหล่งดินตัวอย่างบริเวณจังหวัดสงขลา.....	33
3.1.6 การเปรียบเทียบสัญลักษณ์ดินกับบริเวณที่เก็บตัวอย่าง.....	33
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2.1 ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Rigid Wall Permeameter).....	36
3.2.2 การสร้างเครื่องมือเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูก จำกัด (Unconfined Compression Test).....	38
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติดัชนี.....	39
3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม.....	39
3.4 ช่วงที่ยอมรับได้ (Acceptable Zone) และขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall Acceptable Zone).....	46
3.5 การประเมินความเหมาะสมของชั้นดินกั้นซึมบดอัดตามวิธี Daniel และ Benson (1990).....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลการศึกษา.....	48
4.1 ผลการศึกษาคูณสมบัติดัชนี.....	48
4.2 ผลการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน.....	51
4.2.1 ผลการทดสอบการบดอัด.....	51
4.2.2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน.....	57
4.2.3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) และ $E_{(50)}$	62
4.2.4 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร.....	69
4.3 ผลการศึกษากการประเมินความเหมาะสมของชั้นดินกันซึมบดอัดสำหรับสถานที่ ฝังกลบด้วยวิธี Daniel และ Benson (1990).....	73
4.3.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของดินลูกรัง.....	73
4.3.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของดินเหนียวนา.....	77
4.3.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของดินเหนียวทะเล.....	81
4.3.4 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของทรายผสมเบนโทไนต์ 5%.....	85
4.3.5 ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall Acceptable Zone)	88
4.3.6 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของดินตัวอย่าง.....	89
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 บทสรุป.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
บรรณานุกรม.....	96
ภาคผนวก.....	99
ก ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (K)	101
ข ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (E_v).....	104
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	112

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความชันทางชลศาสตร์.....	21
3.1 จำนวนตัวอย่างและมาตรฐานการทดสอบ.....	40
4.1 คุณสมบัติดัชนีของดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ.....	50
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor.....	52
4.3 ผลการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor.....	53
4.4 ผลการบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor.....	54
4.5 ผลการบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor.....	55
4.6 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินตัวอย่าง.....	56
4.7 คุณสมบัติของดินบดอัดชนิดต่างๆ.....	56
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K).....	59
4.9 ค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u) และค่าโมดูลัส ยืดหยุ่นที่ 50% ($E_{(50)}$).....	67
4.10 ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Shrinkage Strain, ϵ_v)	72
5.1 ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นสูงสุดต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด.....	92
5.2 สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน สูงสุด ต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด.....	93
5.3 กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด.....	93
5.4 การหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุด ต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด.....	94

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 บ่อฝังกลบ (Landfill).....	1
2.1 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบมูลฝอย.....	5
2.2 ชั้นดินกันซึมที่มีสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ.....	6
2.3 ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (Leachate Collection System).....	7
2.4 ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย สำหรับการใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุกันซึมที่กันหลุม.....	8
2.5 ชายฝั่งทะเลทางภาคใต้เมื่อ 6000 ปีที่แล้ว เทียบกับปัจจุบัน.....	10
2.6 ชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก.....	12
2.7 รายละเอียดของแผ่นซิลิกา.....	15
2.8 รายละเอียดของแผ่นอลูมินา.....	16
2.9 แสดงโครงสร้างของแร่ประกอบดินเหนียวกาโอลินต์ (Kaolinite).....	17
2.10 แสดงโครงสร้างของแร่ประกอบดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	18
2.11 แสดงโครงสร้างของแร่ประกอบดินเหนียวอิลไลต์ (Illite).....	18
2.12 โครงสร้างของแร่ดินเหนียวคลอไรต์.....	19
2.13 แผนภูมิพลศาสตร์ของ Casagrande.....	20
2.14 กราฟการบดอัดและค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน.....	21
2.15 การปรับปรุงช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน.....	22
2.16 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังเฉือน.....	23
2.17 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร.....	24
2.18 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Acceptable Zone).....	25
3.1 ตำแหน่งที่เก็บดินตัวอย่าง.....	34
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.3 อุปกรณ์ทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านแบบผนังแข็ง.....	37
3.4 การติดตั้งชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจำนวน 20 ชุด.....	37
3.5 ลำดับการประกอบเครื่องมือเตรียมตัวอย่าง การทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด.....	38
3.6 รูปแบบหล่อและก้อน.....	39
3.7 ขั้นตอนการทดลอง.....	41

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	การบ่มตัวอย่างในถุงพลาสติก..... 43
3.9	การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินตัวอย่าง..... 44
3.10	การวัดขนาดตัวอย่างด้วย Electronic Digital Caliper..... 45
3.11	การทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)..... 46
4.1	กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดคละดินตัวอย่าง..... 49
4.2	กราฟแสดงผลการทดสอบบดอัดของดินตัวอย่าง วิธี Modified Proctor..... 53
4.3	กราฟแสดงผลการทดสอบบดอัดของดินตัวอย่าง วิธี Standard Proctor..... 54
4.4	กราฟแสดงผลการทดสอบบดอัดของดินตัวอย่าง วิธี Reduced Proctor..... 55
4.5	เกณฑ์การหยุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน..... 57
4.6	กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor..... 58
4.7	กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor..... 60
4.8	กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor..... 61
4.9	กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor..... 63
4.10	กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor..... 64
4.11	กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor..... 65
4.12	กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง..... 66
4.13	กราฟแสดงการหดตัวเชิงปริมาตร บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor..... 69
4.14	กราฟแสดงการหดตัวเชิงปริมาตร บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor..... 70
4.15	กราฟแสดงการหดตัวเชิงปริมาตร บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor..... 71
4.16	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน..... 74
4.17	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังกำลังอัดแกนเดียว..... 75
4.18	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร..... 76
4.19	ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินลูกรัง..... 77
4.20	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน..... 78
4.21	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว..... 79
4.22	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร..... 80

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23	ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินเหนียวนา..... 81
4.24	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน..... 82
4.25	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว..... 83
4.26	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร..... 84
4.27	ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินเหนียวทะเล..... 85
4.28	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน..... 86
4.29	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว..... 87
4.30	การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร..... 88
4.31	ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของทรายผสมเบนโทไนต์ 5%..... 89
4.32	การปรับปรุงพื้นที่เพื่อจัดลำดับความเหมาะสม..... 91

บทที่ 1

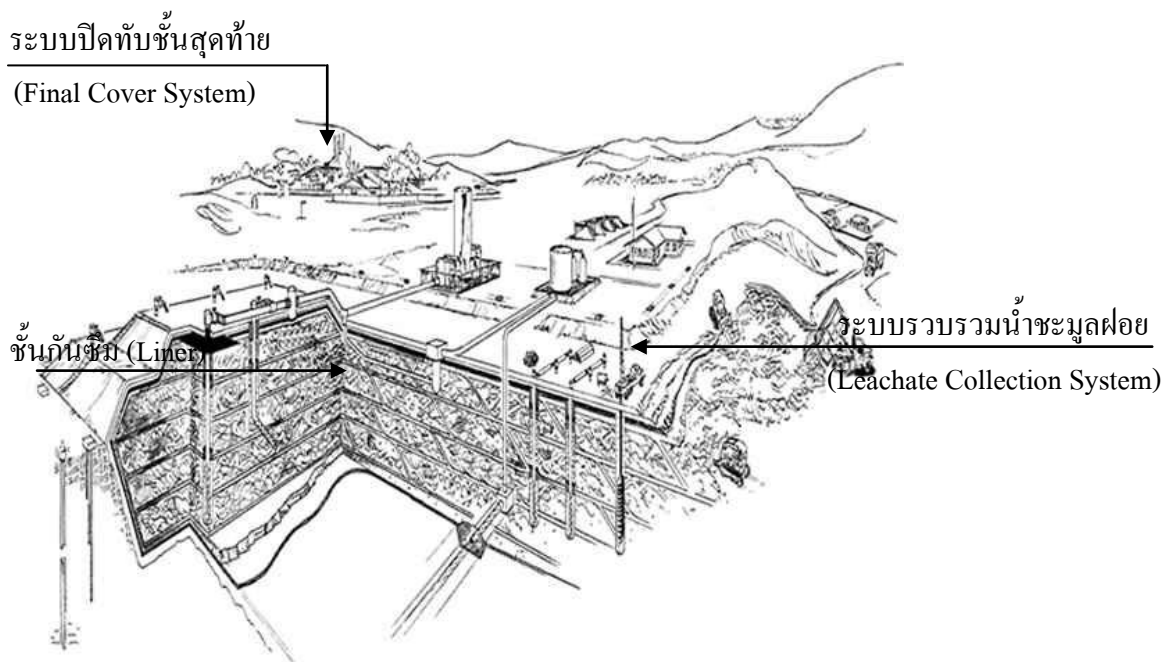
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

บ่อฝังกลบ (Landfill) เป็นสถานที่สำหรับฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) ซึ่งเป็นวิธีกำจัดมูลฝอยอีกวิธีหนึ่งที่ยั่งยืน ไม่ให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยนำมูลฝอยมาเทกองไว้ในบ่อฝังกลบ จากนั้นใช้เครื่องจักรบดอัดให้แน่นและกลบดินทับเป็นชั้นๆ

บ่อฝังกลบ (รูปที่ 1.1) ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ชั้นกันซึม (Liner) เป็นส่วนที่อยู่ล่างสุดของบ่อฝังกลบ ทำหน้าที่ป้องกันมิให้น้ำชะมูลฝอยซึมผ่านลงไปปนเปื้อนกับน้ำใต้ดิน, ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (Leachate collection system) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมน้ำชะมูลฝอย และสูบขึ้นมาบำบัดให้เป็นน้ำดีต่อไป ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final cover system) ทำหน้าที่ป้องกันมิให้น้ำฝนซึมผ่านลงไปบ่อฝังกลบ จึงทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยได้น้อยลง

รูปที่ 1.1 บ่อฝังกลบ (Landfill)



ชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ (Landfill liners) มีหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอย (Leachate) ที่เกิดจากน้ำฝนที่ไหลชะมูลฝอยที่ถูกย่อยสลายจากการทำงานของจุลินทรีย์ ไม่ให้ซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินหรืออาจปล่อยให้ไหลซึมผ่านได้ในอัตราที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ ดินเหนียวมีการใช้อย่างกว้างขวางในการก่อสร้างชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอยรวมทั้งการก่อสร้างระบบปิดทับชั้นสุดท้าย ในขณะที่ก่อสร้างดินเหนียวจะสภาพหลวม จำเป็นต้องมีการบดอัดให้ดินมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการก่อน ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดต้องมีความหนาอย่างน้อย 60 cm (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

นอกจากนี้ดินในท้องถิ่น สามารถนำมาก่อสร้างเป็นชั้นกันซึมดินบดอัดได้ แต่ต้องนำดินเหล่านั้นมาประเมินหาความเหมาะสมก่อน จึงสามารถนำมาใช้เป็นชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย (ธนิต, 2550) ดินที่เหมาะสมกับชั้นกันซึม ควรมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ มีกำลังต้านทานแรงเฉือนได้มากพอและมีการหดตัวต่ำ ในการศึกษาครั้งนี้ นำดินท้องถิ่นในจังหวัดสงขลา 4 ชนิด ประกอบด้วย ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้ทำเป็นชั้นกันซึม สำหรับสถานที่ฝังกลบ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เหมาะสม สำหรับทำชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบ

1.2.2 เพื่อตรวจสอบชนิดของดินท้องถิ่นในจังหวัดสงขลา ที่ผ่านเกณฑ์และเหมาะสม สำหรับทำชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ใช้ดินตัวอย่างบริเวณพื้นที่จังหวัดสงขลา ได้แก่ ทรายผสมเบนโทไนต์ ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา

1.3.2 ใช้วิธีของ Daniel และ Benson (1990) ในการประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงสมบัติดัชนีและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินท้องถิ่นในจังหวัดสงขลา

1.4.2 ทราบถึงชนิดของดินที่ผ่านเกณฑ์และเหมาะสม สำหรับทำชั้นกันซึมสำหรับสถานที่ฝังกลบดินที่ผ่านการพิจารณาและมีความเหมาะสม สามารถแนะนำให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นนำไปพัฒนาใช้ต่อไป

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แบ่งออกเป็น 6 ส่วน คือ บ่อฝังกลบมูลฝอยและ ส่วนประกอบ ธรณีวิทยาพื้นที่ภาคใต้และจังหวัดสงขลา ทราศสมเบนโทไนต์ โครงสร้างดินเหนียว ทัศนศึกษา Daniel and Benson (1990) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 บ่อฝังกลบมูลฝอย (Landfill) และส่วนประกอบ

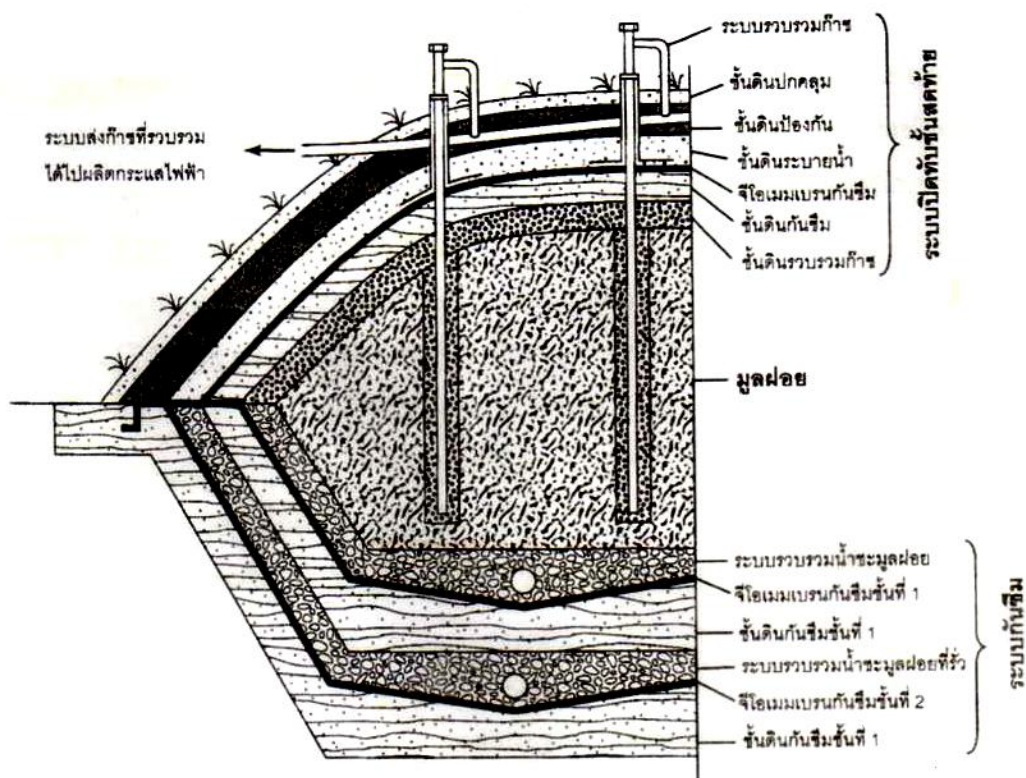
การกำจัดมูลฝอยโดยการฝังกลบในบ่อฝังกลบเป็นที่นิยม เพราะมีค่าใช้จ่ายถูก ทำงานง่ายและสะดวก ไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีระดับสูง เพียงรวบรวมมูลฝอยนำไปเทกองไว้ในบ่อฝังกลบ จากนั้นใช้เครื่องจักรกลหนักเกลี่ยและบดอัดให้มูลฝอยยุบอัดตัว ได้ความสูงของแต่ละชั้น จึงนำดินมาปิดทับหน้ากองมูลฝอย เพื่อป้องกันกลิ่น รวมทั้งสัตว์ที่เป็นพาหะนำโรครบกวนคืบเขี่ย ทำการฝังกลบและปิดทับด้วยดินเป็นชั้นๆ จนได้ความสูงที่ออกแบบไว้ จึงทำการปิดทับชั้นสุดท้าย

2.1.1 บ่อฝังกลบ

บ่อฝังกลบเป็นสถานที่ฝังกลบมูลฝอย อย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) เพราะมีระบบที่สามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยลงสู่พื้นดินซึ่งเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อม น้ำชะมูลฝอยเกิดจากการย่อยสลายของมูลฝอย โดยจุลินทรีย์ รวมทั้งการไหลซึมของน้ำฝนผ่านชั้นมูลฝอย ทำให้เกิดน้ำเสียหรือน้ำชะมูลฝอย จึงต้องนำน้ำชะมูลฝอยเหล่านี้ขึ้นมาบำบัดก่อนระบายสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดกับสิ่งแวดล้อมต่อไป

2.1.2 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบมูลฝอย (Landfill components)

บ่อฝังกลบมูลฝอยประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ชั้นกันซึม (Liner) ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (Leachate collection system) และระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final cover) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีรายละเอียด ดังนี้



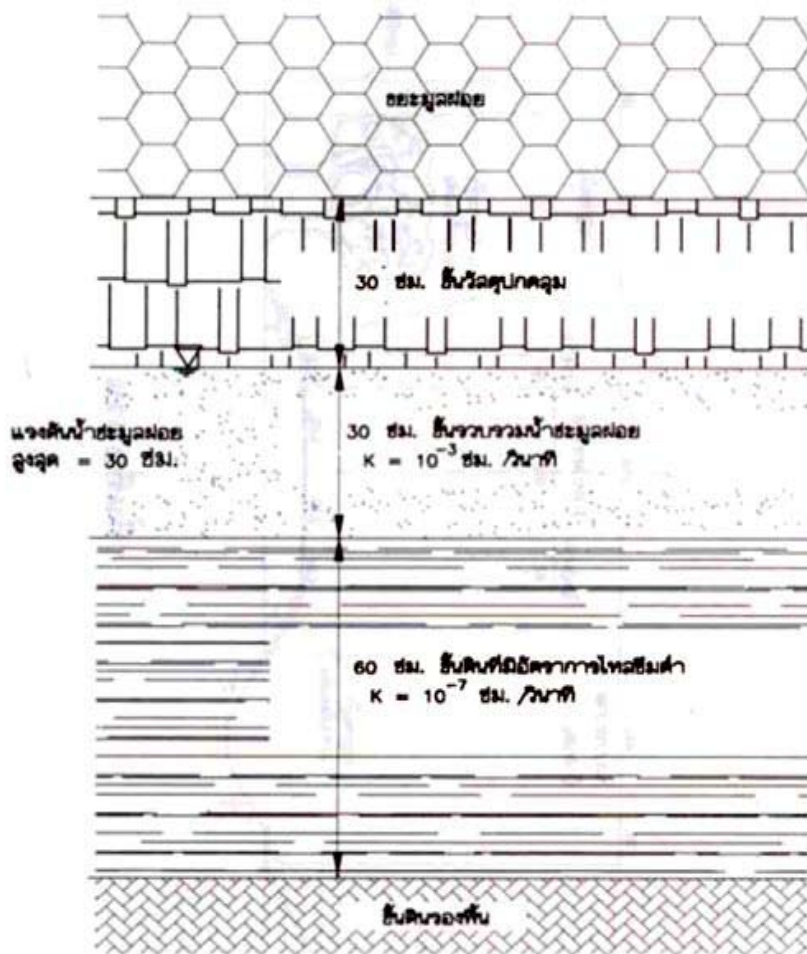
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบมูลฝอย

ที่มา: Qian et al. (2002)

2.1.2.1 ชั้นกันซึม (Liners)

วัสดุกันซึมต้องสร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมทนต่อการกัดกร่อนที่ต้องสัมผัสกับน้ำชะมูลฝอย ทนความเสียหายจากการสัมผัสกับมูลฝอย ทนความดันทางชลศาสตร์ วัสดุกันซึมนี้ต้องติดตั้งบนพื้นหรือสภาพทางธรณีวิทยาที่สามารถรองรับแรงกดทับจากน้ำหนักของมูลฝอยและต้องติดตั้งให้ครอบคลุมดิน โดยรอบทั้งหมดที่จะต้องสัมผัสกับมูลฝอย หรือน้ำชะมูลฝอย วัสดุกันซึมเหล่านี้อาจใช้ดินเหนียวอัด วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials) ที่เป็น โพลีเอเธอร์ บางชนิด ถูกนำมาใช้ในชั้นกันซึม เพราะมีคุณสมบัติที่บ่งชี้ ได้แก่ High density polyethylene (HDPE) Polypropylene (PP) และ Polyvinylchloride (PVC) หรือใช้ดินเหนียวร่วมกับวัสดุสังเคราะห์ โดยทั่วไปการปูวัสดุกันซึมที่ผนังและก้นบ่อฝังกลบแบ่งออกเป็น 4 ประเภท (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

1. การใช้ดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Low permeable soil liner) ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวอัดหนา 60 cm มีค่า K ต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s โดยที่แรงดันของน้ำชะมูลฝอย (Hydraulic head) ต้องไม่เกิน 30 cm แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ชั้นดินกันซึมที่มีสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ

(Low Permeable Soil Liner)

ที่มา กรมควบคุมมลพิษ (2544)

2. การใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียวกับดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ (Single geosynthetic liner with low permeable soil) โดยใช้แผ่น โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หนา 1.5 mm ขึ้นไปและชั้นด้านล่างเป็นดินบดอัดหนา 60 cm มีค่า K ต่ำกว่า $1 \Delta 10^{-5}$ cm/s

3. การใช้วัสดุกันซึมผสม (Composite Liner) มีลักษณะคล้ายกับการใช้วัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว ต่างกันที่ค่า K ของดินที่อยู่ชั้นล่างของวัสดุสังเคราะห์ต่ำกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s

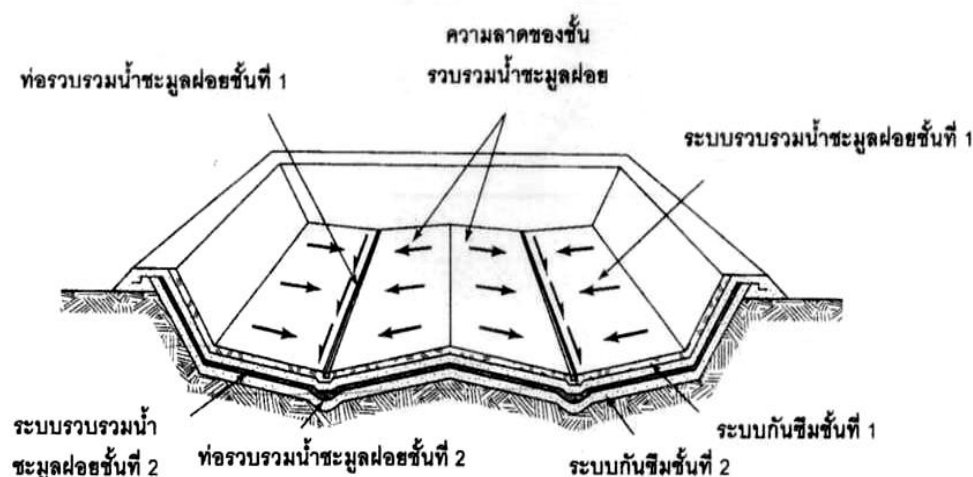
4. การใช้วัสดุกันซึมสองชั้น (Double Liner) ประกอบด้วย แผ่นวัสดุสังเคราะห์ HDPE 2 ชั้นหนา 1.5 mm ขึ้นไป ด้านบนของแผ่นวัสดุสังเคราะห์จะเป็นชั้นรวบรวมน้ำ

ชะมูลฝอย แรงดันน้ำชะมูลฝอยไม่เกิน 30 cm ค่า K ชั้นนี้ไม่ต่ำกว่า $1\Delta 10^{-3}$ cm/s ระหว่างแผ่นวัสดุสังเคราะห์มีชั้นรวบรวมน้ำชะมูลฝอยอีกชั้น มีค่า K ต่ำสุด 10 cm/s

2.1.2.2 ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (Leachate Collection System)

ของเหลวที่ถูกบีบอัดออกมาจากมูลฝอยเนื่องจากน้ำหนักกดทับด้านบนและน้ำฝนที่ไหลผ่านมูลฝอย จะไหลลงไปค้างรวมกันอยู่ที่ชั้นกันซึม ถ้าระดับน้ำชะมูลฝอยสูงขึ้นจะทำให้มีแรงดันน้ำและอัตราการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยจะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอยในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย เพื่อสูบน้ำชะมูลฝอยให้อยู่ที่ระดับ 30 ซม.

ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย ประกอบด้วย ระบบของ ท่อเจาะรูพรุนที่ฝังตัวอยู่ในชั้นกรวดหนาประมาณ 30 ซม. ที่อยู่บนชั้นกันซึม น้ำชะมูลฝอยจะไหลผ่านรูพรุนเข้าสู่ท่อแล้วไหลตามความลาดของท่อลงสู่บ่อเก็บ (Sump) ตามรูปที่ 2.3 จากนั้นจะถูกดูดขึ้นมาจากสถานที่ฝังกลบเพื่อนำไปบำบัดต่อไป แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (Leachate Collection System)

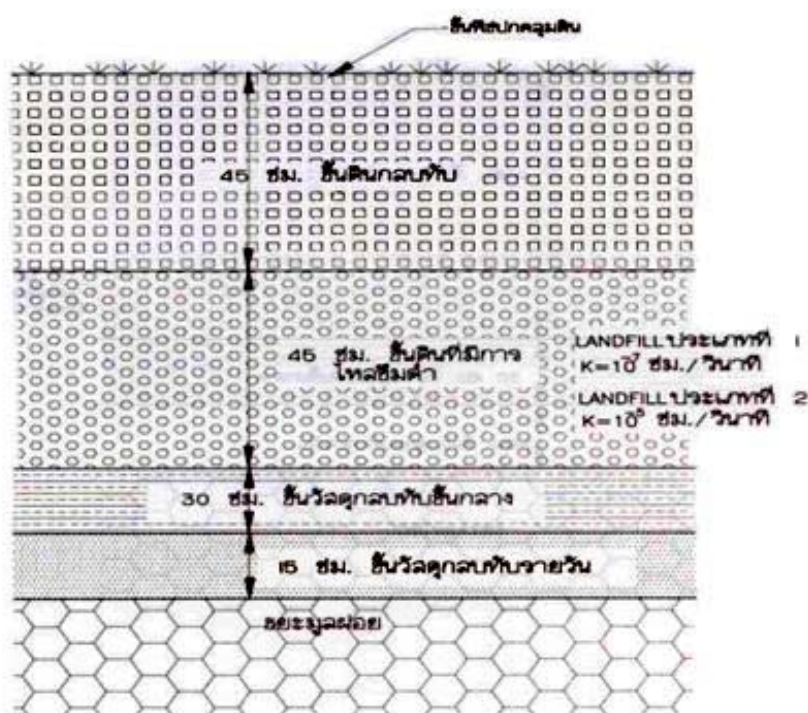
ที่มา: ธนิต (2550)

2.1.2.3 ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final Cover System)

ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (รูปที่ 2.4) เป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งในกระบวนการจัดการของเหลวและก๊าซในการที่จะเข้าหรือออกจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอย

การออกแบบประเภทของวัสดุที่จะใช้ในการสร้างระบบปิดทับชั้นสุดท้ายขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของสถานที่นั้นๆ ระบบปิดทับชั้นสุดท้ายประกอบไปด้วยชั้นระบายน้ำและชั้นกันซึมเป็นหลัก นอกจากนี้เหนือชั้นระบายน้ำและชั้นกันซึม ยังมีชั้นดินปกคลุม ที่ใช้สำหรับป้องกันชั้นระบายน้ำและชั้นกันซึมจากพืชและสัตว์ รวมถึงใช้ป้องกันชั้นระบายน้ำและชั้นกันซึมจากกระบวนการคัดกรองทางธรรมชาติ

ระบบปิดทับชั้นสุดท้ายยังรวมถึงชั้นรวบรวมก๊าซ ซึ่งอยู่ใต้ชั้นกันซึม ชั้นรวบรวมก๊าซมีหน้าที่รวบรวมก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายโดยไร้ออกซิเจน (Anaerobic decomposition) ของสารอินทรีย์ในมูลฝอย ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเหล่านี้จะมีกลิ่นรุนแรงหากปล่อยให้ออกมาสู่บรรยากาศภายนอก และก๊าซมีเทนที่รวบรวมจากชั้นรวบรวมก๊าซ สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.4 ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย สำหรับการใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุกันซึมที่กันหลุม
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2544)

2.2 ธรณีวิทยาของพื้นที่ภาคใต้และจังหวัดสงขลา

ภาคใต้มีลักษณะแหลมยื่นออกไปในทะเล ด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทย ส่วนด้านตะวันตกติดทะเลอันดามัน ทางเหนือเริ่มจากบริเวณอำเภอท่าชะงะ จังหวัดชุมพร ลงไปทางใต้สุดจรดประเทศมาเลเซีย ความยาวจากเหนือมาใต้ประมาณ 610 กิโลเมตร มีความกว้างระหว่าง 220 กิโลเมตร จากฝั่งตะวันออกของอำเภอปากพนังไปจนถึงฝั่งตะวันตกของอำเภอท้ายเหมือง จังหวัดพังงา ส่วนแคบสุดของคาบสมุทรอยู่ที่บริเวณคอคอดกระ มีความกว้างประมาณ 64 กิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดต่าง ๆ 14 จังหวัด ทางริมฝั่งทะเลด้านตะวันออก ได้แก่ จังหวัดชุมพร, สุราษฎร์ธานี, นครศรีธรรมราช, สงขลา, ปัตตานี, และนราธิวาส ส่วนริมฝั่งทะเลด้านตะวันตก ได้แก่ จังหวัดระนอง, พังงา, ภูเก็ต, กระบี่, ตรัง, และสตูล ส่วนจังหวัดที่ไม่ติดกับทะเล ได้แก่ จังหวัดพัทลุงและจังหวัดยะลา

การเปลี่ยนแปลงทางธรณีของชายฝั่งทางภาคใต้เริ่มในช่วงประมาณ 10,000 ปีที่แล้ว โดยคาบสมุทรทางใต้ได้มีการด้วยกตัวเอียงไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ทำให้ชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันออกยกตัวขึ้นและชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง ประกอบกับการลดลงของระดับน้ำทะเลฝั่งทะเลตะวันออกที่เคยจมอยู่ใต้น้ำถูกยกขึ้นสูงกว่าระดับน้ำทะเล เกิดเป็นที่ราบกว้างชายฝั่งที่มีระดับต่ำกว่าที่ราบเดิม เกิดเป็นตะพักน้ำทะเลขึ้นมาใหม่ แนวชายฝั่งทะเลบริเวณนี้จะมีลักษณะค่อนข้างราบเรียบ นอกจากนี้การยกตัวขึ้นของแผ่นดินทำให้แม่น้ำต้องมีการปรับการไหลและการกัดเซาะ โดยลำน้ำจะกัดเซาะบริเวณกลางและปลายน้ำให้ลึกลงไป ทำให้มีตะพักแม่น้ำใหม่เกิดขึ้น สภาพภูมิประเทศลำน้ำในบริเวณนี้จึงมีการกัดเซาะในลักษณะของรูปตัว U

บริเวณที่ราบลุ่มชายทะเลจะมีขนาดแคบทางตอนเหนือของอ่าวบ้านดอนและขยายกว้างขึ้นระหว่างจังหวัดนครศรีธรรมราชจนถึงจังหวัดนราธิวาส ที่ราบในบริเวณนี้เกิดจากกระแสน้ำทะเลและคลื่นพัดพาทรายมากองก่อดัวเป็นสันทรายริมฝั่ง สันทรายนี้จะงอกเป็นแหลมออกไปในทะเล การก่อดัวของสันทรายริมทะเลเป็นแหลมยื่นออกไปที่มีขนาดใหญ่และเห็นได้ชัดเจน คือ แหลมตะลุมพุก จังหวัดนครศรีธรรมราช, แหลมสนอ่อน จังหวัดสงขลา และแหลมตาชี จังหวัดปัตตานี เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งแหลมที่ยื่นไปก็จะปิดบริเวณที่เป็นอ่าว ทำให้เกิดแอ่งน้ำหลังสันทรายขึ้นเรียกว่าลากูน ทะเลสาบสงขลาเกิดจากกระบวนการนี้เช่นกัน ซึ่งลากูนเหล่านี้ต่อมาจะตื้นเขินและมีดิน โกงกางหรือไม้้ำอย่างอื่นขึ้น กลายเป็นป่าพรุหลังแนวชายหาดในปัจจุบันและดินในบริเวณนี้จะเกิดจากการทับถมของดินไม้เหล่านี้กลายเป็นดินพรุ ซึ่งพบได้ทั่วไปหลังสันทรายในบริเวณจังหวัดปัตตานีและจังหวัดนราธิวาส ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปจะมีระดับความสูงน้อยกว่า 10 เมตร เหนือระดับน้ำทะเล

การยกตัวของชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกทำให้ชายฝั่งด้านตะวันตกจมลง บริเวณที่เป็นชายหาดเดิมจะจมลงใต้ทะเลทำให้ที่ราบริมทะเลมีน้อยลงและผลอันนี้ยังทำให้ชายฝั่งมีรูปร่าง

เว้าแหว่งมาก มีลักษณะเป็นอ่าวสลับกับแหลมและมีเกาะต่าง ๆ อยู่นอกชายฝั่งเป็นจำนวนมากมาย ในบางบริเวณจะมีภูเขาปิดล้อมชายหาด จากการที่ทิวเขาขนาดใหญ่อยู่ชิดชายฝั่ง เมื่อชายฝั่งจมลงลำน้ำ ในบริเวณนี้ก็จะปรับตัวกักเซาะบริเวณต้นน้ำลงเป็นร่องลึกลงไปอีก ทำให้ในบริเวณนี้ นอกจากจะมีที่ราบชายฝั่งน้อยแล้ว สภาพร่องน้ำจะเป็นร่องลึกรูปตัว V ต่างจากร่องน้ำฝั่งตะวันออก ซึ่งจะเป็นร่อง กว้างตื้นและมีตะกอนน้ำหลายระดับแทบจะไม่พบในชายฝั่งด้านนี้

รูปที่ 2.5 แสดงบริเวณที่เคยเป็นชายฝั่งทะเลในอดีตเทียบกับปัจจุบัน จะเห็นได้อย่าง ชัดเจนในตัวอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ตั้งอยู่ตามแนวสันทรายเก่าและอยู่ห่างจากสันทราย ริมทะเลในปัจจุบันประมาณ 20 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังมีร่องรอยเก่าให้เห็นเป็นแนวยาวในบริเวณ ด้านทิศตะวันตกของตัวเมือง



รูปที่ 2.5 ชายฝั่งทะเลทางภาคใต้เมื่อ 6000 ปีที่แล้ว เทียบกับปัจจุบัน
ที่มา: อภิชัย (2546)

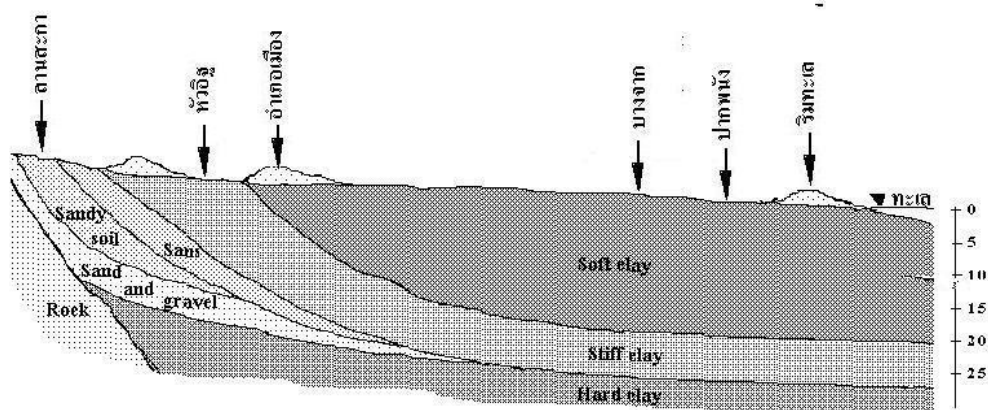
หินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ประกอบด้วย ชั้นของกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำบริเวณที่ราบเชิงเขาและที่ราบลุ่มแม่น้ำ รวมทั้ง ตะกอนที่เกิดจากการพัดพามาสะสมโดยน้ำทะเล การสะสมตัวของตะกอนตามบริเวณเชิงเขา นอกจาก เกิดจากการพัดพามาสะสมของทางน้ำแล้ว บางบริเวณยังอาจเกิดจากการสะสมตัวของตะกอนที่เกิด จากการพุดังของหิน โดยกระบวนการทางกายภาพและเคมี ทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่กับที่ หินยุค

ควอเตอร์นารีเป็นชั้นของตะกอนร่วน บางส่วนจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการทางเคมีทำให้เกิดเป็นศิลาแลง อายุของตะกอนอยู่ในช่วงประมาณ 1.6 ล้านปี ถึงปัจจุบัน ตะกอนเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทย่อย ๆ ดังนี้

1. สันทรายชายหาด (Beach Sand Deposits, Qb) เป็นชั้นตะกอนทรายขนาดหยาบถึงละเอียดที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล พบอยู่ตามที่ราบชายฝั่งทะเลต่าง ๆ
2. ตะกอนดินเหนียวชายทะเล (Mangrove Deposits, Qm) เป็นชั้นตะกอนดินเหนียวที่เกิดจากการพัดพามาสะสมตัวโดยน้ำทะเล พบบริเวณที่เป็นป่าชายเลน และป่าพรุที่มีน้ำท่วมถึง
3. ตะกอนน้ำพา (Alluvium Deposits, Qa) ประกอบด้วย ชั้นกรวดปนทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวที่ถูกพัดพามาโดยแม่น้ำ และสะสมตัวอยู่บริเวณที่ราบน้ำท่วมถึง และที่ราบลุ่มแม่น้ำต่าง ๆ
4. ตะกอนเศษหินเชิงเขา (Terrace Deposits, Qt) เป็นตะกอนเศษดินและหินที่ผุพังมาจากหินบริเวณเชิงเขา และตกตะกอนทับถมเป็นที่ราบบริเวณเชิงเขา ลักษณะของตะกอนมักมีขนาดต่าง ๆ กัน มีความเหลี่ยมคมสูง การคัดขนาดไม่ดี ส่วนประกอบของชั้นตะกอนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหินต้นกำเนิด (Host Rock)

2.2.1 สภาพชั้นดินบริเวณชายฝั่ง

บริเวณที่ราบชายฝั่งด้านตะวันออก ตั้งแต่จังหวัดสุราษฎร์ธานีลงไปถึงจังหวัดนราธิวาส ชั้นดินบริเวณชายฝั่งส่วนใหญ่จะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน ในบริเวณที่เคยเป็นชายหาดเก่าๆ จะมีชั้นทรายทับถมอยู่ข้างบน ในบางบริเวณ เช่นที่อำเภอเมืองสงขลา และอำเภอเมืองนราธิวาส ชั้นทรายอาจหนาถึง 12 เมตร หลังสันทรายจะมีร่องน้ำขนานกับแนวชายฝั่ง ดินผิวบนในบริเวณนี้จะเป็นดินอินทรีย์และในบริเวณจังหวัดนราธิวาส ได้แปรสภาพเป็นดินพรุ (Peat) ปกคลุมผิวบนอยู่หนา 3.0 - 4.0 เมตร ล่างลงไปเป็นดินเหนียวอ่อน (Marine clay) สภาพการวางตัวของชั้นดินในบริเวณนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก

ที่มา: อภิชัย (2546)

ชั้นดินในบริเวณชายฝั่งตะวันออก จะมีชั้นทรายและทรายปนดินสลับอยู่เบื้องล่าง ชั้นดินเหล่านี้เกิดจากการสะสมของตะกอนแม่น้ำก่อนที่ชายฝั่งจะถอยร่นไป การก่อตัวของชายหาดใหม่เกิดจากการก่อตัวเป็นแหลมยื่นออกไปปิดชายฝั่งเดิม ซึ่งรวมถึงทะเลสาบสงขลาด้วย ดังนั้นแนวชายฝั่งใหม่จะไม่มีตะกอนแม่น้ำทับถมอยู่ข้างล่าง ชั้นดินลักษณะนี้เกิดขึ้นตลอดแนว ชายฝั่งยกเว้นบริเวณปากทะเลสาบสงขลาซึ่งมีตะกอนของแม่น้ำเข้ามาทับถมอยู่ด้วย

ในจังหวัดสงขลา มีชั้นตะกอนสนามชัย เป็นตะกอนทรายและดินเหนียวที่สะสมตัวเนื่องจากถูกรุน้ำพัดพามา และในชั้นตะกอนดินเหนียวสีเทาอมฟ้า ที่มีก้อนกลมของเหล็กออกไซด์ปะปนอยู่ด้วยนั้น ช่วยบ่งชี้ให้ทราบว่าเกิดมีขบวนการผุพังอยู่กับที่ในสภาพอากาศที่แห้งแล้งเป็นเวลายาวนาน ในเขตพื้นที่อำเภอหาดใหญ่มีชั้นกรวดขนาดใหญ่ ซึ่งวางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียว จากลักษณะชั้นกรวดที่เด่นชัดดังกล่าวอาจใช้เป็นชั้น สำหรับแบ่งแยกชั้นตะกอนที่มีอายุสมัยไพลสโตซีนและสมัยโฮโลซีนได้

2.3 ทรายผสมเบนโทไนต์ (Sand-Bentonite Mixture)

ทรายเป็นวัสดุที่เกิดจากการผุพังย่อยสลายทางกายภาพของหินในธรรมชาติ เป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูง ไม่เหมาะสำหรับการทำชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ เมื่อผสมเบนโทไนต์ทำให้ทรายมีความเหนียวเพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำลง เมื่อ

เพิ่มปริมาณของเบนโทไนต์ให้เหมาะสมและนำไปบดอัด สามารถทำเป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบตามมาตรฐานได้

เบนโทไนต์เกิดจากแร่ภูเขาไฟและผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาตินับล้านปี ประกอบด้วย แร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ จากองค์ประกอบนี้เองทำให้เบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ (Odom, 1984)

2.3.1 ประเภทของเบนโทไนต์

เบนโทไนต์แบ่งได้ตามองค์ประกอบที่มีธาตุโซเดียม (Na) และแคลเซียม (Ca)

1. เบนโทไนต์ ชนิดที่ประกอบด้วย แร่ดินโซเดียม มอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium montmorillonite) หรือเรียกประเภทที่พองตัวมาก (Swelling type) จะมีความสามารถดูดซึมน้ำได้มากเพราะว่าผลึกของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กมากคือมีผลึกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 0.5 ไมครอนอยู่ประมาณ 70 – 80 % ลอยกระจัดกระจายอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำโคลนมีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งและกึ่งของเหลวคล้ายวุ้น ซึ่งเหมาะสำหรับเป็นโคลนไหลวนใช้ในการเจาะ หรือเรียกว่า โคลนเจาะ (Drilling mud) สํารวจน้ำมันด้วยเครื่องเจาะแบบหมุน (Rotary system) น้ำโคลนเหล่านี้มีประโยชน์ในการหล่อลื่นหัวเจาะ นอกจากนี้ยังใช้ผสมทรายทำเบ้าหล่อ (Foundry sand bond) และวัสดุทนไฟ (Refractories)

2. เบนโทไนต์ ชนิดที่ประกอบด้วย แร่ดินเหนียว แคลเซียม มอนต์มอริลโลไนต์ (Calcium montmorillonite) หรือเรียกประเภทไม่พองตัวมาก (Non swelling type) ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและพองขยายตัวได้น้อยกว่าชนิดแรกแต่ก็สามารถนำกลับมาใช้ทำโคลนเจาะหลุมตื้นๆ ได้ ซึ่งก่อนจะนำไปทำโคลนเจาะได้ ต้องผ่านกรรมวิธีที่ปรับปรุงคุณภาพ Soda ash polymers หรือสารเคมีอื่นเสียก่อน สำหรับเบนโทไนต์ชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะใช้ทำสารที่ดูดซึมหรือฟอกสี (Absorbents) ใช้ในเครื่องกรองน้ำมันในโรงกลั่นน้ำมัน โน โรงกลั่นกรองน้ำบาดาล และน้ำมันพืช ให้ปราศจากมลทินใช้ฟอกหนังและกรองน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้วให้คือสู่สภาพเดิมได้

2.3.2 แหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญ อยู่ที่เมืองไวโอมิง (Wyoming) ประเทศสหรัฐอเมริกา รองลงมาได้แก่ กลุ่มประเทศอิสระที่แยกตัวจากรัสเซียเดิม (CIS) ประเทศกรีซ เยอรมัน ญี่ปุ่น และ ตุรกี โดยคิดเป็นร้อยละ 84 ของกำลังการผลิตโลกในปี 1995 และจากการสำรวจแหล่งดินเบนโทไนต์พบว่า มีปริมาณสำรองอยู่ 1452 ล้านตัน ในขณะที่มีปริมาณการใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 9.8 ล้านตันต่อปี

สำหรับประเทศไทย เบนโทไนด์นี้จะพบมากในอำเภอยะบะดาล จังหวัดลพบุรี เป็นชนิดแคลเซียม เบนโทไนด์ (สรินทร, 2553)

2.3.3 ประโยชน์ของเบนโทไนด์ ในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ การทำโคลนเจาะต่างๆ ใช้ผสมกับน้ำเพื่อช่วยหล่อเลี้ยงหัวเจาะในการเจาะบ่อน้ำบาดาลหรือเจาะบ่อน้ำมัน การขจัดสีในอุตสาหกรรมฟอกสี ใช้ผสมอาหารสัตว์ เพื่อเพิ่มแร่ธาตุเสริม การผลิตเครื่องสำอาง การขจัดคราบไขมันในบ่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิก ทำบ่อเก็บกักน้ำในพื้นที่ที่เก็บกักน้ำไม่อยู่ บำบัดน้ำเสีย รักษาคุณภาพน้ำ ขจัดแก๊สพิษกลิ่นไม่พึงประสงค์ ช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน ปรับสภาพดินทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ ใช้ผสมกับมูลสัตว์เพื่อลดกลิ่นและลดปริมาณเชื้อโรค ใช้ผสมดินหรือคอนกรีตในการก่อสร้างเขื่อนหรือคลอง เพื่อป้องกันการรั่วซึม

2.3.4 ทฤษฎีของเบนโทไนด์ อนุภาคของเบนโทไนด์จะอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของทราย เมื่อมีความชื้นที่เหมาะสมอนุภาคของเบนโทไนด์จะขยายตัวขึ้น กรณีที่มีช่องว่างของอนุภาคทรายน้อยกว่าการขยายตัวของเบนโทไนด์ ทำให้เบนโทไนด์สามารถขยายตัวได้เต็มเนื้อที่ของช่องว่างระหว่างอนุภาคของทรายได้อย่างสมบูรณ์ ในทางตรงข้าม ถ้าอนุภาคของเบนโทไนด์ขยายตัวไม่เต็มเนื้อที่ของช่องว่างระหว่างอนุภาคของทราย ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น เมื่อมีการเชื่อมต่อของช่องว่าง ทำให้การไหลซึมเกิดขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการไหลของวัสดุโดยรวม วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนด์ ที่มีปริมาณเบนโทไนด์เพียงพอในการอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของทรายและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เป็นผลให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสม ถูกควบคุมด้วยความสามารถในการไหลซึมผ่านของเบนโทไนด์ และทรายเป็นเพียงแค่ส่วนที่บดน้ำที่แทรกตัวอยู่ในเนื้อของเบนโทไนด์ เท่านั้น (Kenny, 1992)

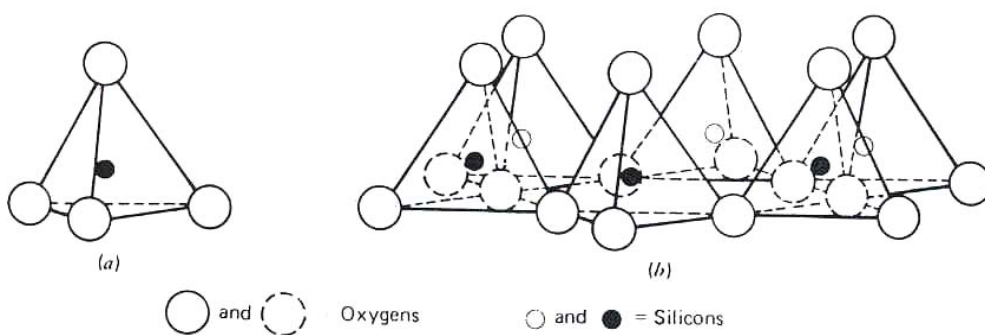
2.4 โครงสร้างดินเหนียว

ดินเหนียว ประกอบด้วย อนุภาคที่มีขนาดเล็ก เรียกว่าแร่ดินเหนียว เช่น เกาลินไนด์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) และ มอนต์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) ดินเหนียว ที่ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวต่างชนิดกัน จะมีคุณสมบัติด้านความสามารถดูดน้ำมาเคลือบที่ผิว (Water adsorption) แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้ดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ เหมาะที่จะใช้ในชั้นกันซึม

2.4.1 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว

การจัดเรียงตัวของผลึกในแร่ดินเหนียวทั้งหมด ประกอบด้วย โครงสร้าง 2 ชนิด คือ แผ่นซิลิกาหรือแผ่นเตตระฮีดรอล (Silica or tetrahedral sheet) และแผ่นอลูมินาหรือแผ่นออกตะฮีดรอล (Alumina octahedral sheet) วิธีการเรียงตัวซ้อนกัน การยึดเหนี่ยว และชนิดของไอออนในโลหะในผลึก ก่อนให้เกิดแร่ดินเหนียวชนิดต่างกัน)

a) แผ่นซิลิกา เกิดจากการรวมตัวกันของหน่วยซิลิกาเตตระฮีดรอล ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกา (ประจุบวก) จำนวนหนึ่งอะตอมล้อมรอบด้วยออกซิเจน (ประจุลบ) จำนวน 4 โมเลกุลที่มุมทั้ง 4 ของเตตระฮีดรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.7 a รูปที่ 2.7 b แสดงการรวมตัวของหน่วยซิลิกาเตตระฮีดรอลหลายๆ หน่วยโดยจะใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกันบนระนาบที่ฐานของหน่วยประกอบเป็นแผ่นซิลิกา

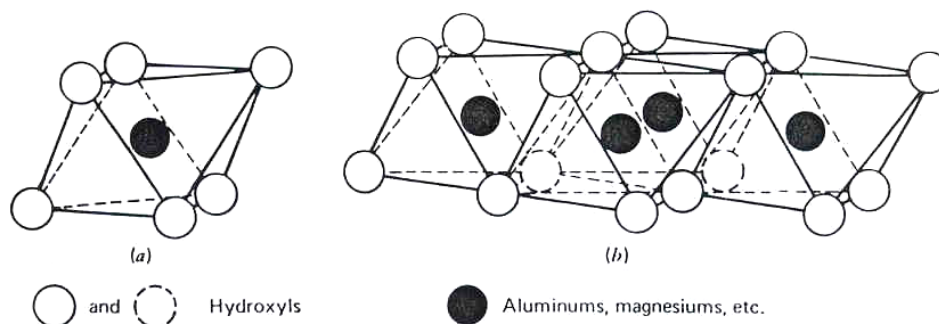


รูปที่ 2.7 รายละเอียดของแผ่นซิลิกา : (a) หน่วยซิลิกาเตตระฮีดรอล,

(b) แผ่นซิลิกาหรือแผ่นเตตระฮีดรอล

ที่มา: Grim (1968)

b) แผ่นอลูมินา เกิดจากการรวมตัวของหน่วยอลูมินัม (หรือแมกนีเซียม) ออกตะฮีดรอล หลายๆ หน่วย แต่ละหน่วยของอลูมินัมออกตะฮีดรอล ประกอบด้วย อะตอมของอะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม (ประจุบวก) ที่ถูกล้อมรอบไปด้วยโมเลกุลของออกซิเจนหรือไฮดรอกซิล (ประจุลบ) จำนวน 6 โมเลกุล หน่วยอลูมินัมออกตะฮีดรอล ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8a หน่วยอลูมินัมออกตะฮีดรอลหลายๆ หน่วยที่รวมตัวกันเป็นแผ่นอลูมินาได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8b



รูปที่ 2.8 รายละเอียดของแผ่นอลูมินา : (a) หน่วยอลูมินัม (หรือแมกนีเซียม) ออกตะฮีดรอล, (b) แผ่นอลูมินาหรือแผ่นออกตะฮีดรอล
ที่มา: Grim (1968)

2.4.2 แร่ดินเหนียวที่สำคัญ

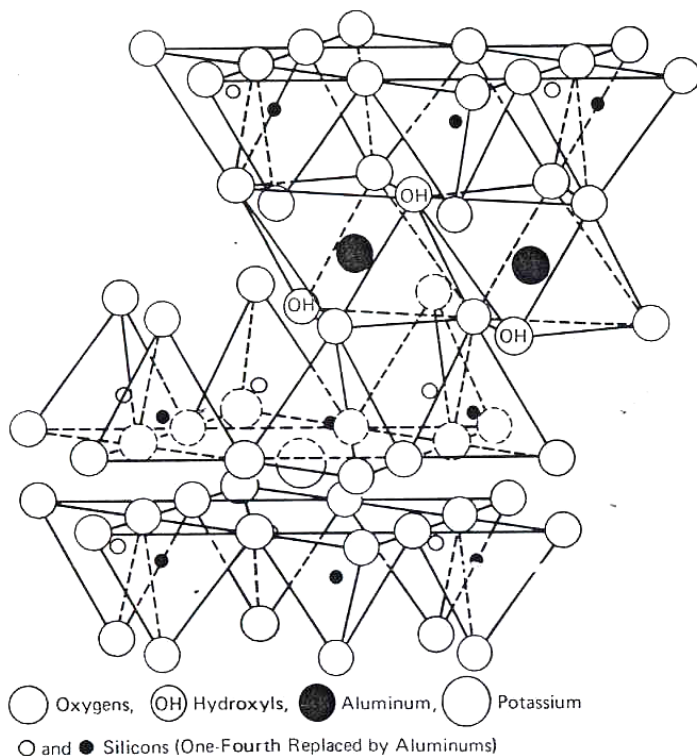
แร่ดินเหนียว เป็นส่วนประกอบสำคัญในดินเหนียว ที่ใช้ในงานวิศวกรรมมีหลายชนิด ดังนี้

2.4.2.1 แร่กาไลไนท์ (Kaolinite) เกิดจากการจับตัวกันเป็นชั้นของแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินาในอัตราส่วน 1:1 เรียกว่าโครงสร้าง 1:1 การจับกันเป็นชั้นของแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินาเกิดจากการที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นซิลิกา ไปยึดตัวกับปลายด้านหนึ่งของแผ่นอลูมินา โดยปลายของแผ่นทั้งสองดังกล่าวจะใช้ออกซิเจนร่วมกันในลักษณะของพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) ก่อให้เกิดชั้นของโครงสร้าง 1:1 โดยแต่ละชั้นจะมีความหนาประมาณ 0.72 นาโนเมตร โครงสร้าง 1:1 หลายๆชั้นมาเรียงตัวกันในแนวตั้ง ก่อให้เกิดกาไลไนต์ในรูปของผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.9

2.4.2.2 แร่ฮอลลอยไซต์ (Hollloysite) เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างแบบ 1:1 เหมือนกาไลไนต์ แต่แตกต่างกันในกระบวนการเกิด โดยจะมีน้ำเข้ามาแทรกระหว่างชั้นทำให้เกิดการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบของผลึก คุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของแร่ดินเหนียวแบบฮอลลอยไซต์ คือ น้ำที่แทรกอยู่ในระหว่างชั้นจะไม่สามารถกลับมารวมตัวกับแร่ดินเหนียวได้อีก ถ้าทำให้แร่ชนิดนี้แห้ง ดินที่มีแร่ดินเหนียวแบบฮอลลอยไซต์เป็นส่วนประกอบหลักพบไม่บ่อยนัก แต่บางครั้งอาจทำให้เกิดปัญหาได้เช่น กรณีทดสอบการบดอัดดินที่มีแร่ดินเหนียวฮอลลอยไซต์ เมื่อทำให้แห้งในห้องปฏิบัติการจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนดินที่มีความชื้นธรรมชาติ

2.4.2.3 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillontie) หรือมีอีกชื่อหนึ่งคือ สแมกไคต์ (Smectite) ประกอบไปด้วย แผ่นซิลิกา 2 แผ่น วางอยู่ด้านบนและล่างของแผ่นอลูมินา (รูปที่ 2.9) จึงเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า โครงสร้าง 2:1 การวางตัวเรียงกันเพื่อก่อให้เกิดโครงสร้าง 2:1 จำนวนหนึ่งชั้นนั้น เกิดจากการใช้ออกซิเจนร่วมกันแบบพันธะโควาเลนต์ของแผ่นซิลิกาและ

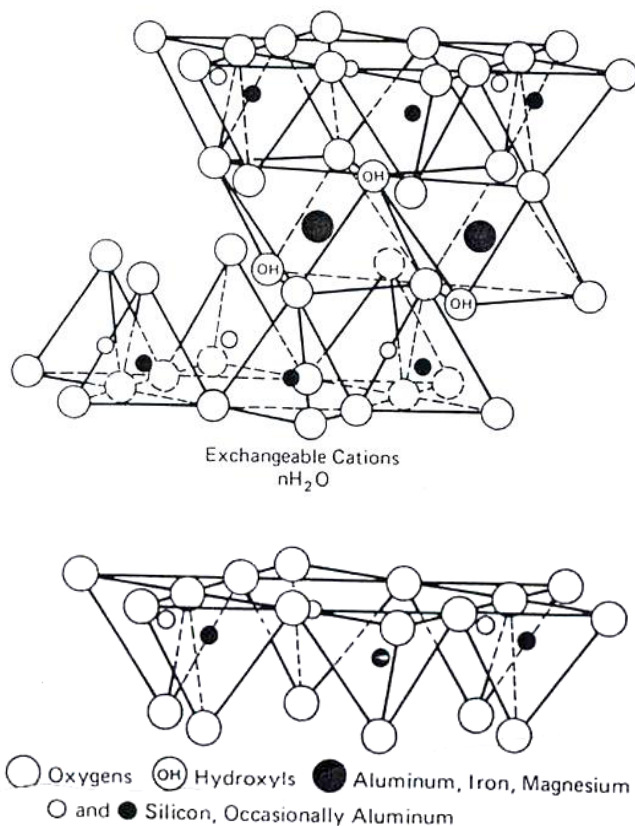
แผ่นอลูมินา แต่ละชั้นของโครงสร้างแบบ 2:1 มีความหนาประมาณ 0.96 nm ผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ เกิดจากโครงสร้าง 2:1 หลายชั้นมาเรียงตัวกัน โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกาชั้นบนและแผ่นซิลิกาชั้นล่าง คือ แรงแวนเดอวาลส์ (Van de Waals forces) ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก น้ำและไอออนสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของโครงสร้าง 2:1 และแบ่งให้ขาดออกจากกัน ดังนั้นแร่ดินเหนียวชนิดนี้จึงมีความสามารถในการดึงดูดน้ำสูงมาก ทำให้เกิดการพองตัว (Swelling) เมื่อเจอกับน้ำ



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของแร่ประกอบดินเหนียวกาลิไนต์ (Kaolinite)

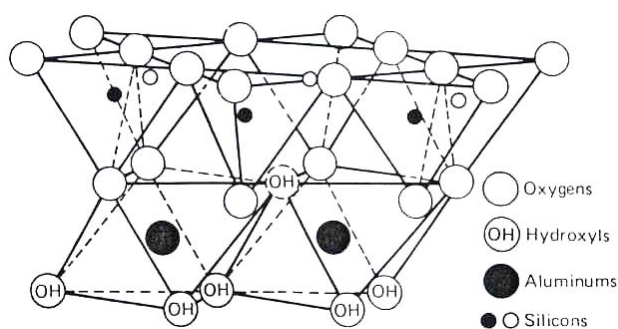
ที่มา: Grim (1968)

2.4.2.4 แร่อิลไลต์ (Illite) เป็นหนึ่งในส่วนประกอบหลักของดินเหนียว อิลไลต์ มีโครงสร้างแบบ 2:1 เหมือนมอนต์มอริลโลไนต์ แต่ละชั้นจะยึดไว้ด้วยอะตอมของโปแตสเซียม แต่ละชั้นของอิลไลต์ของโครงสร้างแบบ 2:1 ของอิลไลต์ มีความหนาประมาณ 0.96 นาโนเมตร ในบางส่วนของอิลไลต์มีการแทนที่แบบไอโซมอร์ฟิซึมของอลูมิเนียมต่อซิลิกอนในแผ่นซิลิกา โครงสร้างของแร่อิลไลต์ แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของแร่ประกอบดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

ที่มา: Grim (1968)

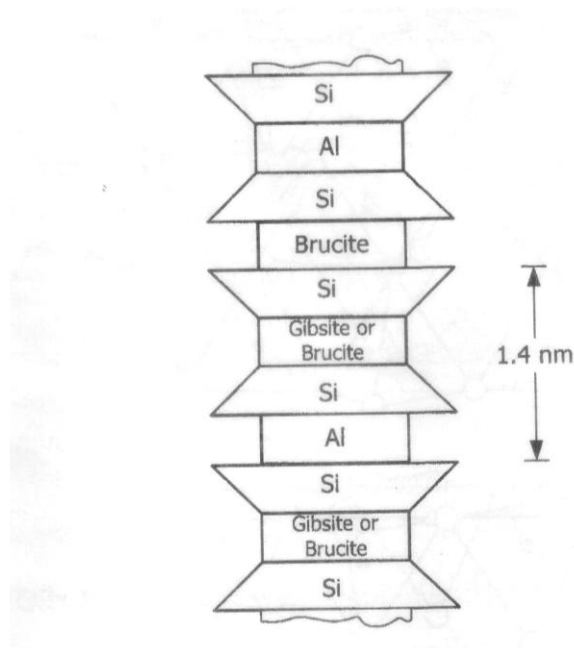


รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของแร่ประกอบดินเหนียวอิลไลต์ (Illite)

ที่มา: Grim (1968)

2.4.2.5 แร่คลอไรต์ (Clorite) เป็นส่วนประกอบที่พบได้ในดินเหนียว มีโครงสร้างแบบ 2:1 โดยแต่ละชั้นจะมีการเรียงตัวจากบนลงล่างเริ่มด้วย แผ่นซิลิกา แผ่นบรูไซต์ หรือแผ่นกิบไซต์ ต่อด้วยแผ่นซิลิกาและแผ่นบรูไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยที่แผ่นบรูไซต์หรือ

แผ่นกึ่งไซท์ที่เกิดจากการแทนที่แบบไอโซมอร์ฟิซของแมกนีเซียมต่ออลูมิเนียมในแผ่นอลูมินา โดยทั่วไปในคลอไรต์อาจมีการขาดหายไปของแผ่นบรูไซต์ ในกระบวนการเกิด จึงทำให้น้ำเข้ามาแทนที่ ดังนั้นดินเหนียวที่มีแร่ดินเหนียวบรูไซต์เป็นส่วนประกอบจะพองตัวเมื่อเจอน้ำ แต่การพองตัวนี้จะน้อยกว่ามอนต์มอริลโลไนต์

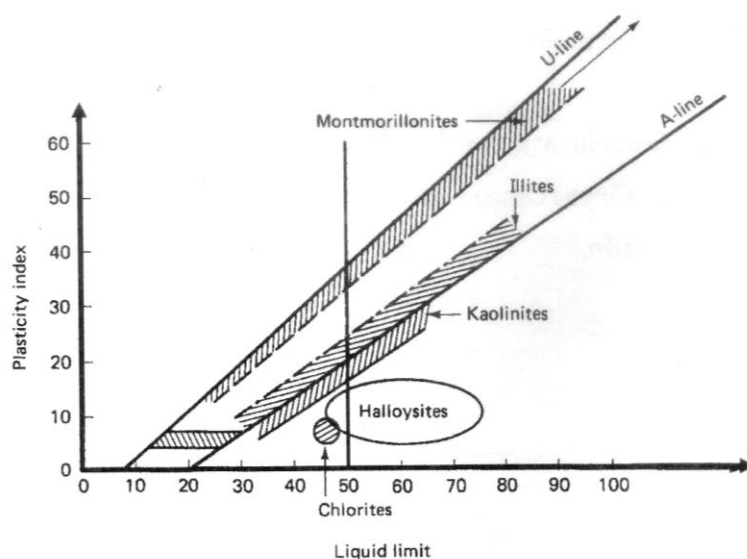


รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแร่ดินเหนียวคลอไรต์

ที่มา: ธนิต (2550)

2.4.3 การจำแนกชนิดของแร่ดินเหนียว

การหาชนิดของแร่ดินเหนียวโดยใช้วิธีของ Casagrande โดยใช้แผนภูมิพลาสติก (รูปที่ 2.13) สามารถบอกชนิดของแร่ดินเหนียวที่แม่นยำเพียงพอสำหรับงานวิศวกรรม การหาชนิดของแร่ดินเหนียวยกตัวอย่างเช่น ค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกของดินเหนียวชนิดหนึ่งอยู่เหนือ A-line และอยู่ใกล้ U-line ดินเหนียวชนิดนี้ จะประกอบไปด้วย มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวหลัก ถ้าขีดจำกัดเหลวและดัชนีพลาสติกอยู่ใต้และติดกับ A-line ดินเหนียวจะประกอบไปด้วยกาลินไนต์เป็นแร่ดินเหนียวหลัก



รูปที่ 2.13 แผนภูมิพลาสติกของ Casagrande

ที่มา: Casagrande (1948)

2.5 ทฤษฎีของ Daniel and Benson (1990)

การบดอัดชั้นดินกันซึมแบบดั้งเดิม พัฒนาขึ้นมาจากวิธีการบดอัดถนน ที่ต้องการความแข็งแรงของดินมากและยุบตัวน้อย โดยกำหนดช่วงที่ยอมรับได้ของหน่วยน้ำหนักแห้งไม่น้อยกว่า 90% ของการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน หรือ 95% ของการบดอัดแบบมาตรฐาน และปริมาณน้ำอยู่ระหว่าง 0 – 4% ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งการใช้ช่วงที่ยอมรับได้ดังกล่าว ไม่ได้หมายความว่า จะทำให้ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s

วิธี Daniel และ Benson (1990) ปรับปรุงมาจากวิธีดั้งเดิม โดยเริ่มจากการหาช่วงที่ยอมรับได้ของหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณน้ำ ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยกว่า 1×10^{-7} cm/s จากนั้นตัดแปลงช่วงที่ยอมรับได้ดังกล่าว ให้ครอบคลุมคุณสมบัติด้านกำลังเฉือนและความสามารถต้านทานการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นเพื่อที่จะไม่ให้เกิดรอยแตกกว้างขึ้นในดิน โดยมีขั้นตอน ดังนี้

2.5.1 ช่วงที่ยอมรับได้ของประสิทธิภาพยอมให้น้ำซึมผ่าน

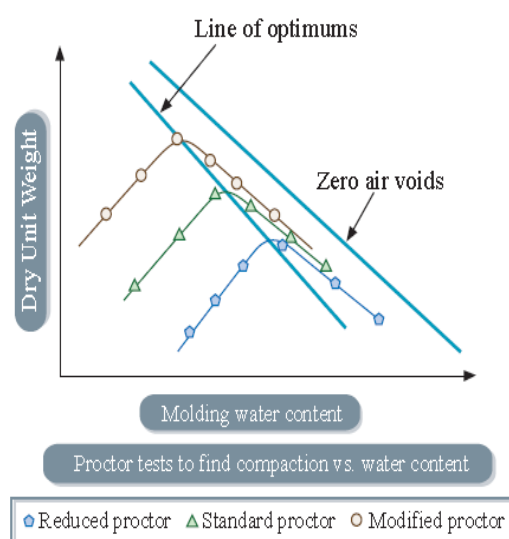
2.5.1.1 นำดินตัวอย่างที่จะใช้ประเมินความเหมาะสมสี่ชนิด บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduce Proctor แต่ละวิธี ใช้ดินตัวอย่าง ประมาณ 5 – 6 ตัวอย่าง หาค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น เขียนกราฟการบดอัด ตามรูปที่ 2.14 (a)

2.5.1.2 นำดินตัวอย่างทั้งสี่ชนิด บดอัดด้วยวิธีและปริมาณความชื้นเหมือนกับข้อ 2.5.1.1 นำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน โดยใช้ค่าความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ตามตารางที่ 2.1 เขียนกราฟสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านกับปริมาณความชื้นตามรูปที่ 2.14 (b)

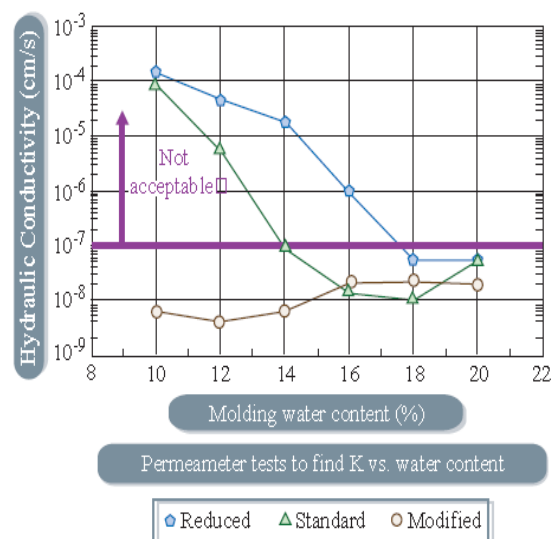
ตารางที่ 2.1 ค่าความชันทางชลศาสตร์

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน(cm/s)	ค่าความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient)
$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}$	2
$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$	5
$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-6}$	10
$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-7}$	20
$< 1 \times 10^{-7}$	30

ที่มา: ธนิต (2550)



(a)

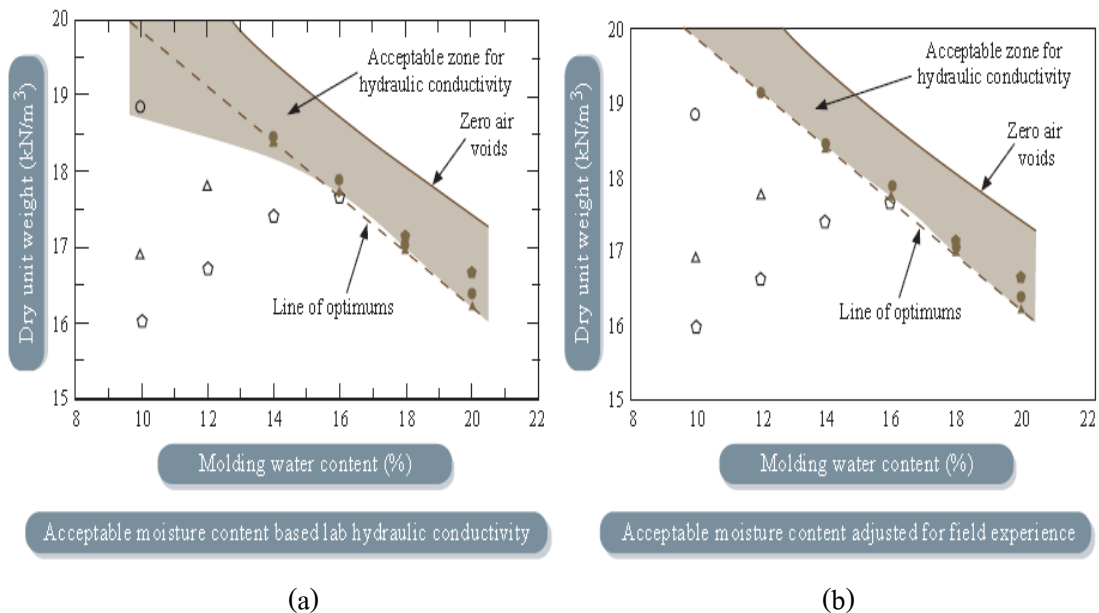


(b)

รูปที่ 2.14 กราฟการบดอัดและสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน
a) กราฟการบดอัดทั้งสามวิธี (b) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ที่มา: Daniel and Benson (1990)

2.5.1.3 เขียนกราฟการบดอัดและใช้สัญลักษณ์แบบทึบให้ครอบคลุมตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านไม่เกิน $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s ใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมากกว่า 1×10^{-7} cm/s Benson et al., 1999 แนะนำว่าควรใช้ปริมาณความชื้นบดอัดให้สูงกว่าเส้น Line of optimums (Wet Side) จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินบดอัดในสนาม เมื่อใช้ค่าปริมาณความชื้นบดอัดต่ำกว่าเส้น Line of optimums จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน มากกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/sec และเมื่อใช้ปริมาณความชื้นสูงกว่าเส้น Line of optimums ทำให้สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน น้อยกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/sec ดังนั้นจึงปรับปรุงกราฟจากรูปที่ 2.15 (a) โดยตัดสัญลักษณ์แบบทึบที่อยู่ใต้เส้น Line of optimums ออกตามรูปที่ 2.15(b)



รูปที่ 2.15 การปรับปรุงช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน
 (a) ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (b) ปรับปรุงช่วงที่ยอมรับได้
 ที่มา: Benson et al. (1999)

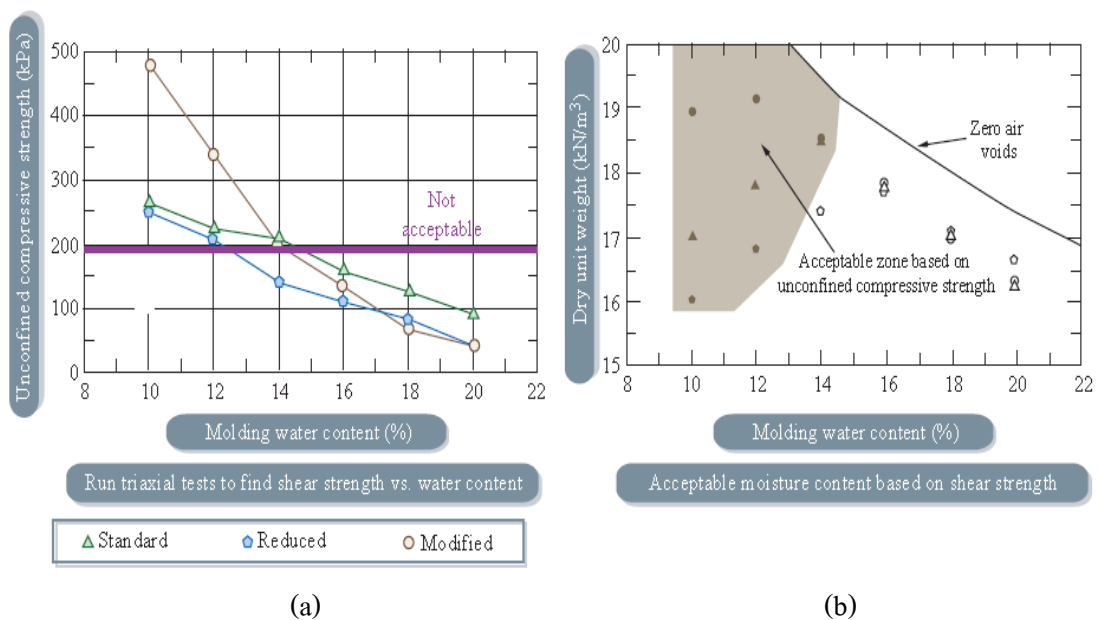
2.5.2 ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

2.5.2.1 นำค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างทั้งสองชนิดในหัวข้อ 2.5.1.1 คำนวณหาน้ำหนักดินแห้งต่อปริมาตรแบบหล่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.25 cm สูง

8.5 cm นำดินแห้งผสมกับปริมาณความชื้นที่ได้ บ่มในถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่น บ่มไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายเข้าในเนื้อดินอย่างทั่วถึงกัน จากนั้นบดอัดดินในถุงทั้งหมดให้เต็มแบบหล่อพอดี

2.5.2.2 นำดินตัวอย่างจากหัวข้อ 2.5.2.1 ไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) โดยวิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบ ไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) เขียนกราฟกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้น ตามรูปที่ 2.16 (a)

2.4.2.3 เขียนกราฟการบดอัดและใช้สัญลักษณ์แบบทึบ ให้ครอบคลุมตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa ใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวน้อยกว่า 200 kPa ตามรูปที่ 2.16 (b)



รูปที่ 2.16 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังเฉือน (a) ค่ากำลังอัดแกนเดียว

(b) ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

ที่มา: Daniel and Benson (1990)

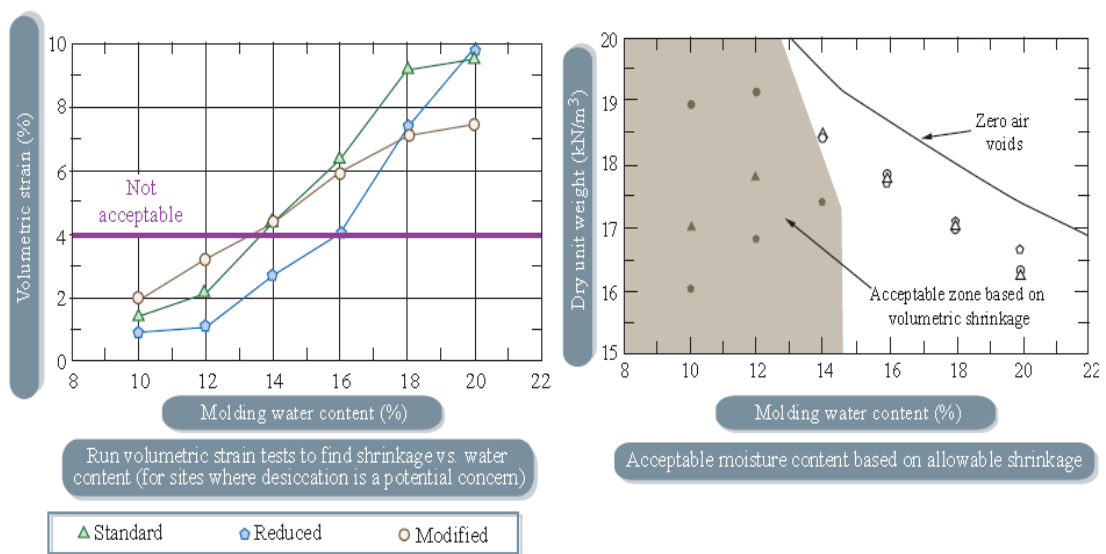
2.5.3 ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric strain)

2.5.3.1 นำดินที่จะใช้ประเมินความเหมาะสม บดอัดด้วยวิธีและปริมาณความชื้นตามข้อ 2.4.1.1

2.5.3.2 ดันตัวอย่างดินที่บดอัดตามข้อ 2.4.3.1 ออกจากแบบหล่อ ตั้งไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 27 องศาเซลเซียส เพื่อให้ดินสูญเสียความชื้น

จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของดินตัวอย่างทั้งหมดทุกๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งดินตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ (Daniel and Wu, 1993) โดยใช้เวลาทดสอบทั้งหมดประมาณ 1 เดือน เขียนกราฟระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรกับปริมาณความชื้น ตามรูปที่ 2.17 (a)

2.5.3.3 เขียนกราฟการบดอัดและใช้สัญลักษณ์แบบทึบให้ครอบคลุมตัวอย่างที่มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรไม่เกิน 4% และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่มากกว่า 4% ตามรูปที่ 2.17 (b)



(a)

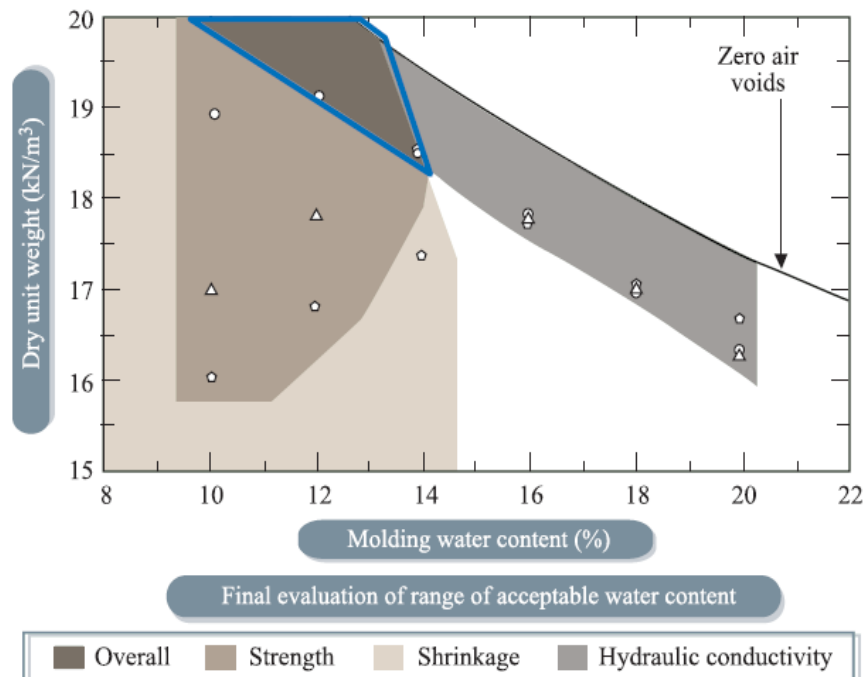
(b)

รูปที่ 2.17 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร (a) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร

(b) ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

ที่มา: Daniel and Benson (1990)

2.5.4 การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด หลังจากหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน กำลังเฉือน การหดตัวได้ของดิน ตามรูปที่ 2.15 (b), รูปที่ 2.16 (b), รูปที่ 2.17 (b) ได้แล้ว นำช่วงที่ยอมรับได้ทั้งสามมาซ้อนทับกัน บริเวณพื้นที่ของช่วงที่ยอมรับได้ทั้งสามซ้อนทับกัน คือช่วงที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) ที่ครอบคลุมถึงการซึมผ่านได้กำลังต้านทานแรงเฉือนและการหดตัวของดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Acceptable Zone)

ที่มา: Daniel and Benson (1990)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Daniel and Benson (1990) ได้ศึกษา กฎเกณฑ์ของปริมาณความชื้นและความหนาแน่น สำหรับชั้นดินกันซึมบดอัด โดยการบดอัดชั้นดินกันซึมแบบดั้งเดิมในสนาม จะใช้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการปฏิบัติงาน ดังนั้น ในการทำงานก่อสร้างชั้นกันซึม ต้องแน่ใจว่าชั้นดินกันซึมมีความแข็งแรงและการบดอัดดินเป็นที่ยอมรับได้

ปัจจุบันการหาช่วงของพลังงานบดอัด กำหนดจากปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้ง ซึ่งได้มาจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน โดยใช้พลังงานบดอัดดินสามชนิดในการหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่น้อยกว่า $1\Delta 10^{-7}$ cm/s สร้าง"ขอบเขตที่ยอมรับได้" และปรับปรุงโดยเพิ่ม กำลังรับแรงเฉือนและความสามารถในการหดตัวได้ของดิน เข้าไปในขอบเขตที่ยอมรับได้ เพื่อให้ประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นกันซึม เพิ่มมากขึ้น

Daniel and Wu (1993) ได้ศึกษา การหาปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน โดยทำการทดสอบบดอัดดินเหนียวตัวอย่าง ด้วยพลังงาน 3 ชนิด กับปริมาณความชื้นแตกต่างกัน เพื่อหาค่า 1) สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่า $1\Delta 10^{-7}$ cm/s 2) ความสามารถที่จะหดตัวไม่เกิน

4% 3) กำลังรับแรงเฉือนไม่น้อยกว่า 200 KPa นำผลการทดลองทั้งสาม เขียนกราฟและสร้างขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยนำกราฟมาซ้อนทับกัน บริเวณที่ซ้อนทับกันคือบริเวณเขตที่ยอมรับได้ หาปริมาณความชื้น หน่วยน้ำหนักแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการบดอัด ที่เหมาะสำหรับสร้างชั้นกันซึมบดอัด ทำให้ชั้นกันซึมมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ ความสามารถที่จะหดตัวน้อยและกำลังรับแรงเฉือนอย่างเพียงพอครบทั้งสามข้อกำหนด การบดอัดดินเหนียวที่เหมาะสมควรมีหน่วยน้ำหนักแห้งประมาณ 96–98% ของค่าสูงสุดจากบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557) จากข้อกำหนดที่ได้สามารถสร้างชั้นกันซึมบดอัดในบริเวณที่แห้งแล้งได้

Tay et al. (2001) ได้ศึกษาการหดตัวและการแตกร้าว จากการฝั่งให้แห้งของทรายผสมเบนโทไนต์ ในชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ ทดสอบการหดตัวและการแตกร้าว จากการฝั่งให้แห้งของทรายผสมเบนโทไนต์ 10% และ 20% โดยน้ำหนัก เมื่อบดอัดที่ช่วงปริมาณความชื้น 8% ถึง 32% พบว่าการหดตัวเชิงปริมาตร จากการทำให้แห้งโดยอากาศ ทรายผสมเบนโทไนต์ 20% จะหดตัวมากกว่าทรายผสมเบนโทไนต์ 10% การบดอัดทรายผสมเบนโทไนต์ที่ 10% และ 20% ไม่สามารถมองเห็นรอยแตกจากการฝั่งแห้งที่ผิว เมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้น 14% และ 15% ตามลำดับ และมีการแตกร้าวเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อบดอัดที่ปริมาณความชื้น 15% และ 20% ตามลำดับ

Amer et al. (2005) ได้ศึกษาศักยภาพของทรายผสมกับดินเหนียว Attapulgit เป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ โดยใช้ทรายและดินเหนียว Attapulgit จาก Wahiba ทางด้านตะวันออก และ Al-Shuwamiyah ทางด้านตะวันตกของประเทศโอมาน ตามลำดับ นำทรายผสมกับดินเหนียว Attapulgit ที่ 5% 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ทดสอบขนาดของเม็ดดิน, จีดจำกัดของอัตราเบอร์รี่, ความถ่วงจำเพาะ, การบดอัด, สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน และการต้านทานกำลังเฉือน พบว่า ทรายผสมดินเหนียว 30% ที่ปริมาณความชื้น +2% ของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สามารถพิจารณาเป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบได้

Sadek et al. (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการคาดคะเนประสิทธิภาพของชั้นปกคลุมดินเหนียวของบ่อฝังกลบ ในสถานะแวดล้อมที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของชั้นปกคลุมของชั้นกันซึมดินเหนียว โดยทำแบบจำลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้ finite element จับการเปลี่ยนแปลงในชั้นดินเหนียวและคุณลักษณะของการเคลื่อนที่ของน้ำ ใช้ค่าน้อยที่สุดที่ชั้นปกคลุมต้องการแนะนำโดย USEPA Subtitle-D ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวที่ต้องป้องกันความเสียหายจากรอยแตก เมื่ออยู่ในสถานะแวดล้อมที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง เมื่อทดสอบผ่านการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ของชั้นปกคลุมมีค่าเป็นสองเท่าของ ค่าที่ยอมให้ซึ่งมีค่าเริ่มต้นที่ 1×10^{-5} cm/s

Osinubi and Nwaiwu (2006) ได้ศึกษาการออกแบบดินลูกรังบดอัดเป็นชั้นกันซึมและปกคลุม โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการบดอัดดินลูกรังของชั้นกันซึมและปกคลุม โดยมีดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างกันและบดอัดด้วยมาตรฐาน 4 มาตรฐานคือ BSL, BSH, RBSL, WAS จุดประสงค์เพื่อการเปรียบเทียบคุณภาพการก่อสร้าง แบบดั้งเดิมกับแบบใหม่ โดยสร้างขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมและขอบเขตที่ยอมรับได้แบบใหม่บนพื้นฐานของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ความสามารถที่จะหดตัวและกำลังรับแรงเฉือนของดิน เปรียบเทียบได้ดังนี้ แบบดั้งเดิมเมื่อพิจารณาการบดอัดโดยใช้ปริมาณน้ำ 0 - 4 % ทางด้านเปียกและพิจารณาที่ 90% ของความหนาแน่นสูงสุดของการบดอัด เขียนกราฟบนขอบเขตที่ยอมรับได้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านไม่เกิน $1\Delta 10^{-9}$ m/s ซึ่งเป็นการพิจารณาค่า K อย่างเดียว ส่วนแบบใหม่พิจารณาตัวแปร 3 ตัว คือ 1) สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน $< 1\Delta 10^{-9}$ m/s 2) การหดตัวเชิงปริมาตร $< 4\%$ 3) กำลังรับแรงเฉือนของดิน > 200 kPa ทำให้สามารถนำไปใช้งานและควบคุมการก่อสร้างได้

Yucel et al. (2008) ได้ศึกษา Sepiolite วัสดุทางเลือกสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอยชุมชน ดำเนินการนำ ดินเหนียว Sepiolite ดินเหนียว Kaolinite และดินเหนียวทั้งสองผสมกัน ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบการรับกำลังของดิน ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะทดสอบหลังผ่านการทดสอบการแช่แข็งและละลายแล้ว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและความสามารถในการหดตัวของ ดินเหนียว Sepiolite มีค่อนข้างสูง จำเป็นต้องเพิ่มดินเหนียว Kaolinite ก่อนเริ่มต้นใช้เป็นวัสดุฝังกลบ การทดสอบดินเหนียวกับสารละลายเกลือ ทำให้ดินเหนียวพองตัวและมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ดินเหนียว Kaolinite มีความสามารถในการดูดซึมอินทรีย์สารปนเปื้อนของดินเหนียวได้น้อยและสามารถปรับปรุงโดยเพิ่มดินเหนียว sepiolite ดังนั้น ดินเหนียวผสมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีทางด้าน การรับกำลัง ค่าการซึมผ่าน และการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งอาจปรับใช้ศักยภาพนี้เป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอยได้

นิตา (2008) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมจากตะกอนในการผลิตน้ำประปา etailoyจากถ่านหินและเบนโทไนต์ สำหรับใช้เป็นวัสดุกันซึมทางเลือกในหลุมฝังกลบขยะทำการทดสอบ 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาคุณสมบัติทางด้านความชื้น การกระจายตัวของอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ ชีดจำกัดแอดเทอร์เบิร์ต พิกัดหดตัว ความชื้นที่เหมาะสม ความหนาแน่นสูงสุดแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนในการผลิตน้ำประปา etailoyจากถ่านหิน และดินเหนียว ส่วนที่สองศึกษาคุณสมบัติด้าน ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ความหนาแน่นสูงสุด สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน สัมประสิทธิ์การอัดตัว กำลังแบบไม่ถูก

จำกัดของอัตราส่วนผสมของตะกอนในการผลิตน้ำประปา ถ้าวัดจากถ่านหิน และเบนโทไนต์ 3 อัตราส่วน คือ 60:30:10 70:20:10 และ 80:10:10

จากการศึกษาพบว่า ตะกอนในการผลิตน้ำประปา มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดินเหนียว สามารถนำมาเป็นวัสดุกันซึมทางเลือกในหลุมฝังกลบขยะ สำหรับถ้าวัดจากถ่านหินสามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติการรับแรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของส่วนผสมของวัสดุกันซึมทางเลือก ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน 3 อัตราส่วนข้างต้น มีค่าใกล้เคียงกัน คือ $1\Delta 10^{-7}$ cm/s และพบว่าความสามารถในการรับแรงของอัตราส่วน 60:30:10 (2.49 ksc) สูงกว่าค่ามาตรฐาน (2.04 ksc) และสูงกว่าความสามารถในการรับแรงของอัตราส่วน 70:20:10 (1.26 ksc) และ 80:10:10 (0.79 ksc) ตามลำดับ ดังนั้น อัตราส่วนสำหรับใช้เป็นวัสดุกันซึมทางเลือกในหลุมฝังกลบขยะ ที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วน 60:30:10

อรรถพล (2542) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านระหว่างทรายกับแร่เพอร์ไลต์ ทำโดยหาคุณสมบัติทางกายภาพของทรายและแร่เพอร์ไลต์และคุณสมบัติทางวิศวกรรมในด้านความสามารถในการซึมผ่าน โดยวิธีระดับน้ำคงที่ (Constant Head) ที่ระดับความสูง 39, 59, 79 เซนติเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเป็นดังนี้ ที่ระดับความสูงที่ 39 เซนติเมตร ทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเฉลี่ยเท่ากับ 0.036678 เซนติเมตรต่อวินาที แร่เพอร์ไลต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเฉลี่ยเท่ากับ 0.0616604 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ระดับความสูงที่ 59 เซนติเมตร ทรายมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.0329776 เซนติเมตรต่อวินาที แร่เพอร์ไลต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเฉลี่ยเท่ากับ 0.0526496 เซนติเมตรต่อวินาที และที่ระดับความสูงที่ 79 เซนติเมตร โดยทรายจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเฉลี่ยเท่ากับ 0.030434 เซนติเมตรต่อวินาที และแร่เพอร์ไลต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเฉลี่ยเท่ากับ 0.0438862 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งกล่าวได้ว่าอัตราส่วนช่องว่างของแร่เพอร์ไลต์มีมากกว่าทรายจึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดีกว่าทราย

ภริส (2543) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพวัสดุกันซึมดินเหนียวบดอัดผสมปูนขาวและถ้าวัด ทำการนำถ้าวัดลิกไนต์ มาปรับปรุงความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุกันซึมดินเหนียวบดอัด โดยใช้อัตราส่วน 0, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและอัตราปูนขาว 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุกันซึมดินเหนียวบดอัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวและถ้าวัดเพิ่มขึ้น โดยการพัฒนาความแข็งแรงของวัสดุกันซึมดินเหนียวบดอัดเพิ่มจาก 1.03 เป็น 10.06 และ 13.65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเติมปูนขาว 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เมื่อเพิ่มปริมาณถ้าวัดในอัตรา 0, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักผสมกับปูนขาว 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงของวัสดุกันซึมเพิ่มขึ้น 10.06, 11.52, 17.31 และ 18.22 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็น 13.65, 16.84, 21.66

และ 22.91 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านได้ของน้ำ ผ่านวัสดุกันซึมดินเหนียวคอตผสมปูนขาว 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกับถั่วลอย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลดลงจาก $5.72\Delta 10^{-9}$ เป็น $2.97\Delta 10^{-9}$ เซนติเมตรต่อวินาที

โกวิทย์ (2544) ได้ศึกษาคุณสมบัติการไหลซึมของ ของไหลที่มีสารปนเปื้อนผ่าน วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด ทำโดยผสมทรายกับเบนโทไนต์บดอัดในกระบอกผนัง แข็งซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 ซม. และความสูงตัวอย่าง 2 ซม. ทำการทดลองภายใต้ แรงดันกดทับ 150 kPa ของเหลวที่ใช้ในการทดลองได้แก่ สารละลาย โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียม คลอไรด์ กรดอะซิติก กรดไฮโดรคลอริก และเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ค่า โดยผลการทดลองจากการไหลซึมผ่านของสารปนเปื้อนจะเปรียบเทียบกับน้ำประปา

ผลการทดลองกับน้ำประปาพบว่า ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสม ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5% 10% และ 15% มีค่าเท่ากับ $3.0\Delta 10^{-6}$ $2.0\Delta 10^{-9}$ และ $5.0\Delta 10^{-10}$ ซม/วินาที ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5% สูงกว่า 1.0×10^{-7} ซม/วินาที ซึ่งไม่ สอดคล้องกับข้อกำหนดของชั้นวัสดุกันซึม

ผลการทดลองเมื่อใช้สารเคมีไหลซึมผ่านตัวอย่างวัสดุผสมแสดงให้เห็นว่า สารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M สามารถทำให้วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเพิ่มขึ้นได้ถึง 7 ถึง 156 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากน้ำประปา สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น 58 ถึง 589 เท่า สารละลายกรดอะซิติกและสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ค่าเพิ่มขึ้น 14 ถึง 350 เท่า และ 39 ถึง 394 เท่า ตามลำดับ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่าน มีค่าเพิ่มขึ้น 3 ถึง 2317 เท่า พิจารณาสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นวัสดุกันซึมมากกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%

ธนิต และสุรพล (2548) ได้ศึกษา ทรายผสมเบนโทไนต์บดอัดสำหรับชั้นกันซึมใน สถานที่เก็บน้ำ นำทรายผสมกับเบนโทไนต์ในสัดส่วนที่เหมาะสม นำไปบดอัดเพื่อหาค่าปริมาณความชื้น ที่เหมาะสมและค่าน้ำหนักร้อยละสูงสุด ทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อหาค่ากำลังของดินและทดสอบ หาสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านลดลง 10,000 เท่าเมื่อผสมทรายกับเบนโทไนต์ 5% โดยน้ำหนัก แต่ทำให้กำลังลดลง เนื่องจากการบวมตัว ของวัสดุผสมจากการขยายตัวของเบนโทไนต์เมื่อสัมผัสกับน้ำ ลดต่ำลง สำหรับการผสมเบนโทไนต์ 0 ถึง 9 % ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจะลดลงจาก $3.60 \Delta 10^{-5}$ เป็น $4.13 \Delta 10^{-9}$ cm/s มุม เสียทานภายในลดลงจาก 49 ถึง 22 องศา และการพองตัวเพิ่มจาก 0.85 ถึง 10.32 % ตามลำดับ

นอกจากนี้ การบดอัดทรายผสมเบนโทไนด์ 3% ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านน้อยกว่า $1.0 \Delta 10^{-7}$ cm/s ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการในการสร้างชั้นกันซึมและยังมีความต้านทานแรงเฉือนค่อนข้างสูง

นันทนิตย์ (2549) ได้ศึกษาศึกษาศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนด์และดินเหนียวสงขลา เพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอย โดยทำการทดสอบทรายผสมเบนโทไนด์ ดินลูกรังคอกหงส์ ดินเหนียวเกาะยอ กับโลหะหนัก 5 ชนิด อันได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี โครเมียม และนิกเกิล

ผลการศึกษา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนด์ที่ 5% ดินลูกรังคอกหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ มีค่าเท่ากับ 5.15×10^{-8} , $3.39 \Delta 10^{-8}$ และ $5.67 \Delta 10^{-8}$ cm/s ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนด์, ดินลูกรังคอกหงส์ และดินเหนียวเกาะยอ ยังคงมีค่าคงที่ตลอดเวลาการทดลอง 500 วัน ถ้าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมไม่สูงกว่า 0.001 M สำหรับทรายผสมเบนโทไนด์และดินลูกรังคอกหงส์ และไม่เกิน 0.01 M สำหรับดินเหนียวเกาะยอ ตามลำดับ

ความหนาของชั้นกันซึมคำนวณจากค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ พบว่า การใช้ทรายผสมเบนโทไนด์ที่ 5% และดินลูกรังคอกหงส์ เป็นชั้นกันซึมหนา 60 cm ตามมาตรฐานกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2542) ไม่สามารถลดการปนเปื้อนของสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอยลงน้ำใต้ดินในระยะเวลา 100 ปีได้ แต่ดินเหนียวเกาะยอ ความหนาของชั้นกันซึมประมาณ 30 cm สามารถลดสารปนเปื้อนในน้ำชะมูลฝอย ลงสู่น้ำใต้ดิน ในระยะ 100 ปีได้

ธนกฤษณ์ (2552) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ ทำการปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียว โดยผสมทรายเป็กลงในดินเหนียว เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งผสมทรายเป็ลงดินเหนียว ที่อัตราส่วน 0:100, 15:85, 30:70 และ 45:55 ตามลำดับ จากนั้นผสมซีเมนต์กับดินตัวอย่าง (ดินเหนียวถูกผสมทรายเป็แล้ว) ในอัตราส่วนร้อยละ 7.5, 15 และ 20 ต่อน้ำหนักแห้งสำหรับทุกอัตราส่วนของดินตัวอย่าง ควบคุมปริมาณน้ำของดินตัวอย่างจากนั้น ทำการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยวิธีการทดสอบความสามารถซึมผ่านน้ำของดินในการทดสอบแรงอัด 3 แกน ด้วยระบบความดันย้อนกลับ 2 ทิศทาง (Triaxial permeability test with two back pressure systems) ของดินตัวอย่างผสมซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 7 วันแล 28 วัน ตามลำดับ

พบว่า เมื่อมีปริมาณอัตราส่วนของทรายเป็เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ จะมีค่าสูงขึ้นมากตามอัตราส่วนของทรายเป็ เมื่อมีปริมาณอัตราส่วนร้อยละของซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วน

บทที่ 3

วัสดุ เครื่องมือ และขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาการประเมินความเหมาะสมของดินท้องถิ่นในจังหวัดสงขลา สำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมดินบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบ ใช้ดิน 4 ชนิด ได้แก่ ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติดัชนีและคุณสมบัติวิศวกรรมกับดินทั้ง 4 ชนิด การทดสอบคุณสมบัติดัชนีเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ ปริมาณความชื้น ชีดจำกัดเหลว ชีดจำกัดพลาสติก ดัชนีพลาสติก หาขนาดของเม็ดดินและจำแนกชนิดของดิน การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ค่ากำลังเฉือนของดิน ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร นำผลการทดสอบเขียนกราฟหาช่วงที่ยอมรับได้เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของชั้นกันซึมบดอัด จากนั้นนำช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ค่ากำลังเฉือน ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร เขียนขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด เพื่อประเมินดินที่เหมาะสมกับการสร้างชั้นกันซึมดินบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบต่อไป

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ประกอบด้วย ดิน 4 ชนิด ได้แก่ a) ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% (Sand-5%bentonite mixture) b) ดินลูกรัง (Lateritic soil) c) ดินเหนียวทะเล (Marine clay) d) ดินเหนียวนา (Paddy clay) โดยตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

3.1.1 ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%

ทรายที่ใช้ในการทดลอง (รูปที่ 3.2 a) เป็นทรายสะอาดในท้องถิ่นในจังหวัดสงขลา มีสีน้ำตาลอ่อนปนเหลือง ใช้สำหรับงานก่ออิฐหรือผสมซีเมนต์ สำหรับงานปูนก่อสร้างและงานคอนกรีตทั่วไป เบนโทไนต์ (Bentonite) ที่ใช้ทดลอง (รูปที่ 3.2 b) เป็นดินที่เกิดจากเก้าภูเขาไฟ และผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเป็นระยะเวลานาน จนเป็นดินมีคุณสมบัติการพองตัวสูงเมื่อดูดซับน้ำ โมเลกุลของน้ำ มีองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวหลัก รองลงมา ได้แก่ ซิลิกอน ไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ เบนโทไนต์ที่ใช้เป็น โซเดียม

เบนโทไนต์ธรรมชาติชนิดผง ชนิด Premium Gel ผลิตจากบริษัท American Colloid สหรัฐอเมริกา บรรจุในถุงขนาด 45 กิโลกรัม

การผสมเบนโทไนต์กับทรายซึ่งมีค่าการซึมผ่านสูง เมื่อเบนโทไนต์ดูดซับโมเลกุลของน้ำ จะพองตัวเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำลง ในการศึกษาซึ่งใช้ทรายผสมเบนโทไนต์อัตราส่วน 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเพียงพอสำหรับสำหรับเป็นชั้นกันซึม ที่ต้องการค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ต่ำกว่า $1 \Delta 10^{-9}$ เมตร/วินาที (Doi and Imaizumi, 2002, Chalermyanont and Arrykul, 2005)

3.1.2 ดินลูกรัง

ดินลูกรัง (รูปที่ 3.2 c) เก็บจากบ่อดินบริเวณสามแยกบ้านเกาะหมี่ ตำบลคองหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เป็นดินเนื้อละเอียดปนเม็ดกรวด ร่วนซุย สีน้ำตาลปนแดงเข้ม นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 105°C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 mm) นำดินที่ร่อนแล้วใส่ถุงพลาสติกสีด้ามักปากถุงให้แน่น เก็บไว้ในถังพลาสติกปิดฝากันชื้น เพื่อใช้เป็นตัวอย่งสำหรับการทดสอบต่อไป

3.1.3 ดินเหนียวทะเล

ดินเหนียวทะเล (รูปที่ 3.2 d) เก็บตัวอย่างจากบริเวณนาุ้ง ชายทะเลบ้านสะกอม ตำบลสะกอม อำเภอเทพา จังหวัดสงขลา ที่ระดับความลึกจากระดับดินเดิม 0.50 เมตร เป็นดินเนื้อละเอียด สีเทาเข้ม ใช้เลื่อยเส้นลวดตัดดินให้เป็นชิ้นบางๆ แยกเศษวัชพืชและวัสดุปนเปื้อนออก นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 105°C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเข้าเครื่องบดเพื่อย่อยดินให้เป็นผง บรรจุผงดินในถุงพลาสติกสีด้ามักปากถุง เก็บไว้ในถังพลาสติกปิดฝากันความชื้น เพื่อใช้เป็นตัวอย่งสำหรับการทดสอบต่อไป

3.1.4 ดินเหนียวนา

ดินเหนียวนา (รูปที่ 3.2 e) เก็บตัวอย่างจากนาร้าง บ้านคลองเปล ตำบลคองหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่ความลึกจากระดับดินเดิมประมาณ 0.50 เมตร เป็นดินเนื้อละเอียด สีเหลืองอ่อนปนน้ำตาล นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 105°C นาน 24 ชั่วโมง แยกเศษวัชพืชและวัสดุที่ปนเปื้อนออก นำเข้าเครื่องบดเพื่อย่อยดินให้เป็นผง บรรจุผงดินในถุงพลาสติกสีด้ามักปากถุงให้แน่นเก็บไว้ในถังพลาสติกปิดฝากันความชื้น เพื่อใช้เป็นตัวอย่งสำหรับการทดสอบต่อไป

3.1.5 แหล่งดินตัวอย่างบริเวณจังหวัดสงขลา

กรมพัฒนาที่ดิน (2554) (รูปที่ 3.1) ได้แบ่งเขตกลุ่มดินของจังหวัดสงขลา ออกเป็นสามกลุ่มได้แก่

1. ดินในบริเวณที่ลุ่ม ประกอบด้วยสัญลักษณ์ดิน m2-m14 ไม่มีสัญลักษณ์ดิน m7 และ m11
2. ดินในพื้นที่ดอนในเขตดินชั้น ประกอบด้วยสัญลักษณ์ดิน m26-m33
3. ดินในพื้นที่ลาดเชิงชันหรือพื้นที่ภูเขา ประกอบด้วย สัญลักษณ์ดิน m34

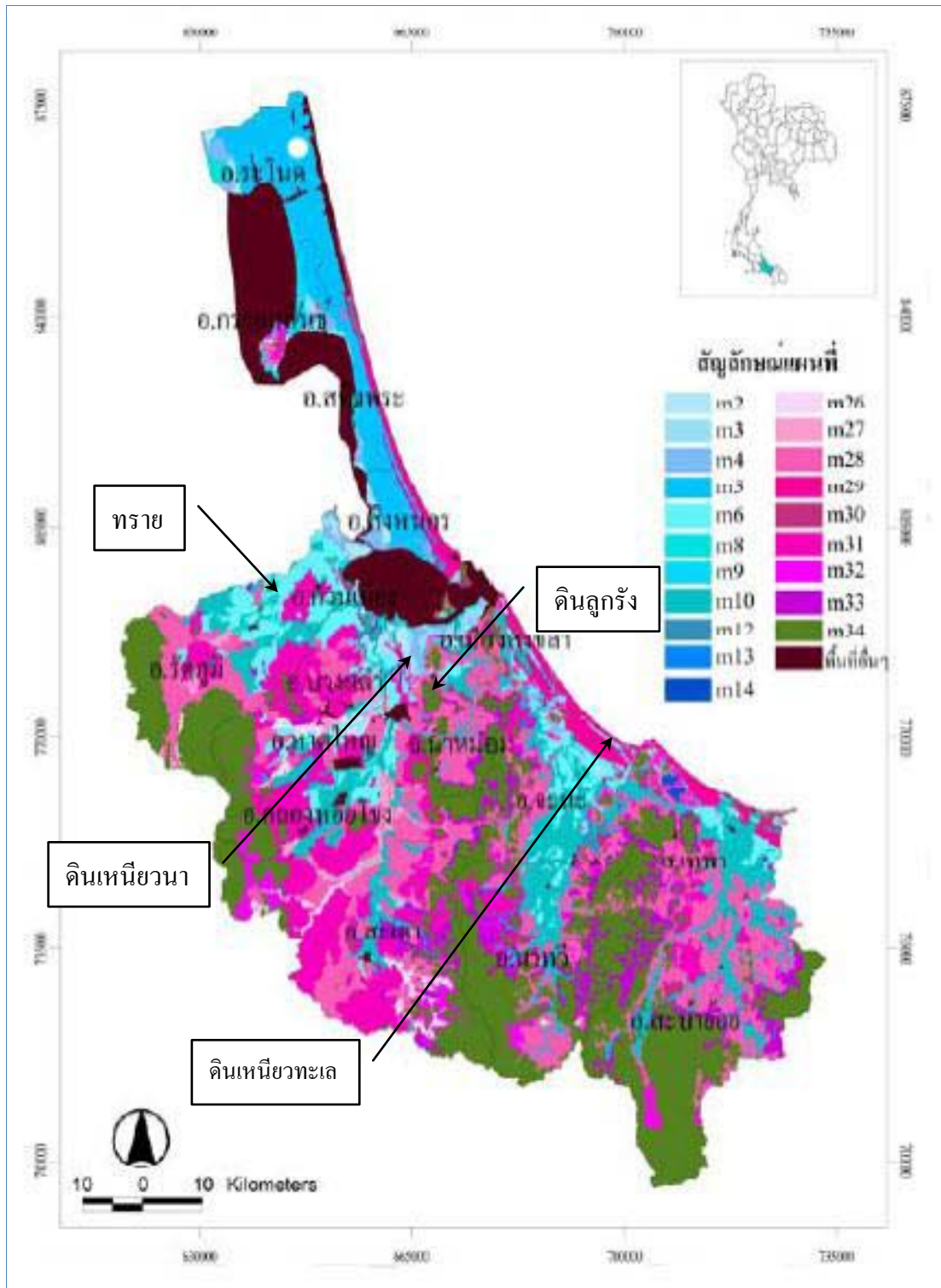
3.16 การเปรียบเทียบสัญลักษณ์ดินกับบริเวณที่เก็บตัวอย่าง เป็นดังนี้

ทราย สัญลักษณ์ m12 เป็นดินที่อยู่ในพื้นที่ลุ่ม อธิบายได้ว่าเป็นทรายลิกมาก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ดนูพลและคณะ, 2545 กล่าวถึงแหล่งทรายขนาดใหญ่ มีปริมาณมากถึง 60% ของแหล่งทรายในจังหวัดสงขลา คือแหล่งทรายในเขตรัตถุมิ-ควนเนียง

ดินลูกรัง สัญลักษณ์ m31 เป็นดินในพื้นที่ดอนในเขตดินชั้น อธิบายได้ว่าเป็นดินต้นที่มีลูกรัง ก้อนกรวด หรือเศษหินปะปนมากภายในความลึก 50 ซม. จากผิวดิน

ดินเหนียวทะเล สัญลักษณ์ m6 เป็นดินที่อยู่ในพื้นที่ลุ่ม อธิบายได้ว่าเป็นดินเหนียวที่มีปฏิกริยาดินเป็นกรดจัดถึงเป็นกรดจัดมาก

ดินเหนียวนา สัญลักษณ์ m5 เป็นดินที่อยู่ในพื้นที่ลุ่ม อธิบายได้ว่าเป็นดินเหนียวที่มีปฏิกริยาดินเป็นกลางถึงเป็นด่าง



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่เก็บดินตัวอย่าง
ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2554)



a. ดินลูกรัง



b. ดินเหนียวนา



c. ดินเหนียวทะเล



d. ทราย



e. เบนโทไนต์

รูปที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

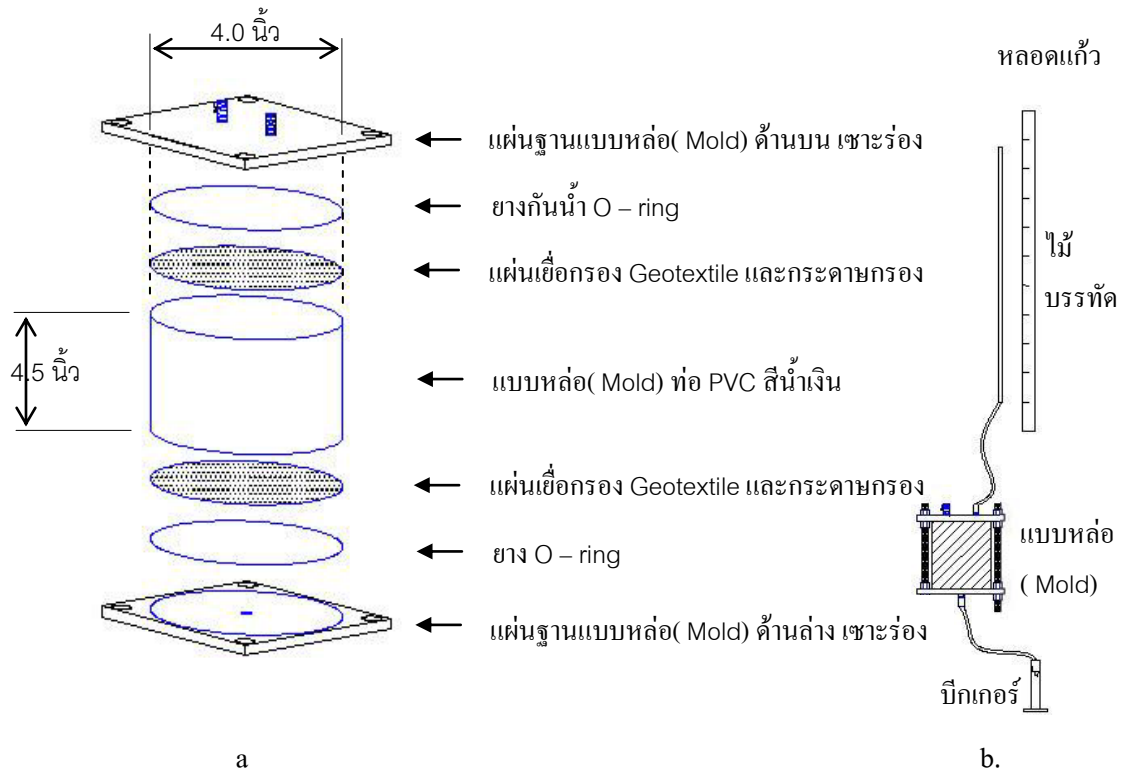
การสร้างอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลอง มี 2 ชุด คือ ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านผนังแข็ง (Rigid wall permeameter) และชุดเตรียมตัวอย่างดินบดอัดสำหรับการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Rigid Wall Permeameter)

ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านผนังแข็ง ได้แสดงในรูปที่ 3.3

(a) ประกอบด้วย แบบหล่อ (Mold) ทำด้วยท่อ PVC สีน้ำเงิน ขนาด 4 นิ้ว กว้างภายในให้ได้เท่ากับ 4.0 นิ้ว ความสูงเมื่อใส่ในร่องของแผ่นฐานด้านบนด้านล่างแล้ว เท่ากับ 4.5 นิ้ว เชือกกรอง Geotextile 2 แผ่น กระจาดกรอง 2 แผ่น เหล็กแผ่นฐานด้านบนและด้านล่างของแบบหล่อ หนา 1 cm เจาะรูทั้ง 4 มุม จำนวน 2 แผ่น แผ่นฐานด้านบน เจาะรู 2 รู ใส่หัววาล์วทองเหลืองและหางปลาไหลทองเหลือง แผ่นฐานด้านล่าง เจาะรู 1 รู ใส่หางปลาไหลทองเหลือง เสาค้ำเหล็กเกลียวสำหรับยึดแผ่นฐานด้านบนกับด้านล่าง 4 เส้น พร้อมน็อตยึด 16 ตัว สายยาง Latex และท่อแก้ว (Standpipe) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.28 cm^2 ยาว 100 cm

การประกอบแบบหล่อกับชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน เริ่มจากนำแผ่นฐานด้านล่าง ยึดกับเสาค้ำเหล็กเกลียวด้วยน็อตทั้ง 4 มุม ใส่ยางกันน้ำ (O-ring) 1 วง ในร่องที่เจาะไว้ที่แผ่นฐานด้านล่าง วางเชือกกรอง Geotextile และกระจาดกรอง จากนั้นวางแบบหล่อ PVC สำหรับใส่ดินบดอัด วางกระจาดกรองและเชือกกรอง Geotextile ตามด้วย ยางกันน้ำ (O-ring) อีก 1 วง ในร่องที่เจาะไว้กับแผ่นฐานด้านบน ยึดแผ่นฐานด้านบนกับเสาค้ำเหล็กเกลียวด้วยน็อตให้แน่นตามรูปที่ 3.3 (b) ต่อสายยาง Latex ด้านหนึ่งเข้ากับหางปลาไหลทองเหลืองที่ฐานด้านบนและปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับด้านล่างของท่อแก้วตามลำดับ นำสายยาง Latex อีกเส้นหนึ่งต่อเข้ากับหางปลาไหลทองเหลือง ที่แผ่นฐานด้านล่างเพื่อรองรับน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินเข้าสู่ภาชนะที่รองรับ (กระบอกตวงน้ำหรือบีกเกอร์) แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านแบบผนังแข็ง a) ลำดับการประกอบแบบหล่อ b) การติดตั้งแบบหล่อกับอุปกรณ์



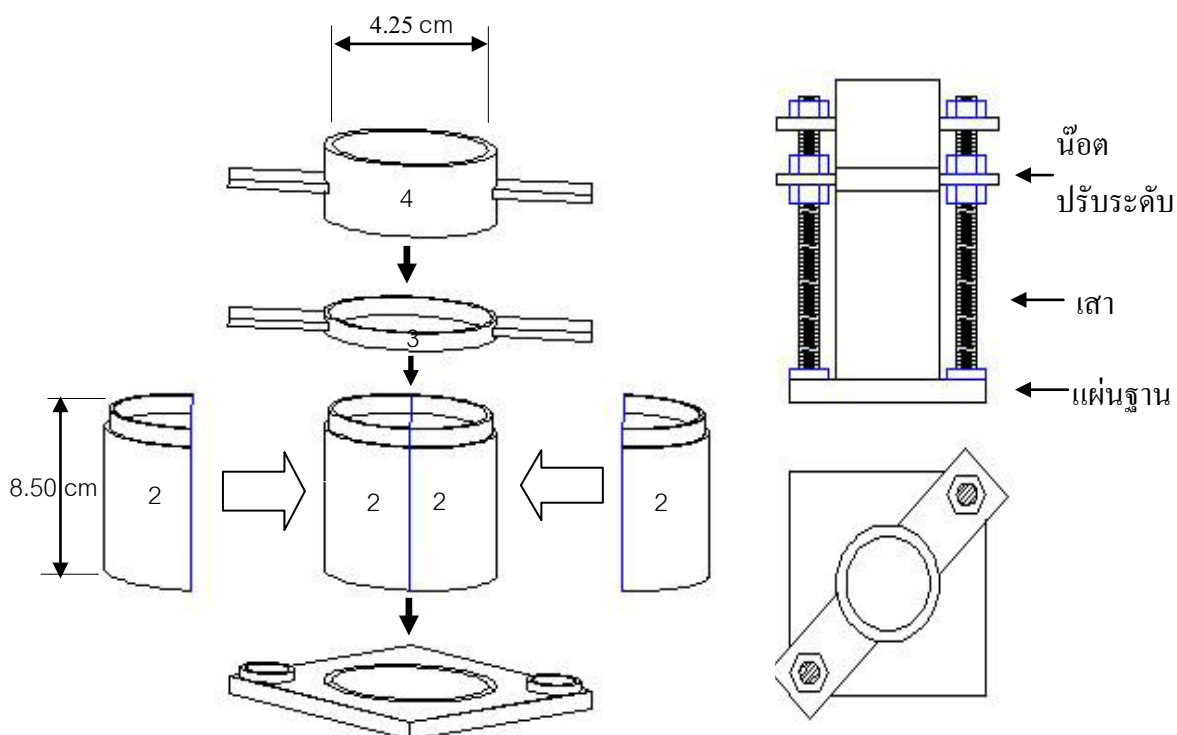
รูปที่ 3.4 การติดตั้งชุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน จำนวน 20 ชุด

3.2.2 การสร้างเครื่องมือเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด

จำกัด (Unconfined Compression Test)

ประกอบด้วย ชุดแบบหล่อ (Mold) เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.25 cm ความสูงเมื่อใส่ลงในร่องของแผ่นฐานด้านล่างแล้ว เท่ากับ 8.50 cm ปริมาตรของเท่ากับ 120.63 cm^3 แบบหล่อแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (หมายเลข 1 และ 2), ตัวรัดแบบหล่อ (หมายเลข 3) และปลอก (Collar) (หมายเลข 4) แผ่นฐาน (Base Plate) พร้อมกับเสายึดแบบหล่อและปลอก น็อตยึดและปรับระดับ จำนวน 6 ตัว สำหรับค้อนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.745 cm สูง 14.960 cm น้ำหนักรวมปลอกและด้ามหนัก 1,456.84 g ตามรูปที่ 3.5

การประกอบอุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) นำแบบหล่อทั้งสองแผ่น (หมายเลข 1 และ 2) ประกบกันให้สนิท ประกอบแบบหลอกับร่องของแผ่นฐาน นำตัวรัดแบบหล่อ (หมายเลข 3) วางบนบ่าของแบบหล่อและยึดกับเสาให้เสมอกับน็อตปรับระดับ ชั้นน็อตยึดตัวรัดแบบหล่อให้แน่น นำปลอก (หมายเลข 4) ประกอบต่อจากตัวรัดแบบหล่อและยึดกับเสา ชั้นน็อตให้แน่น ตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ลำดับการประกอบเครื่องมือเตรียมตัวอย่าง การทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด



รูปที่ 3.6 รูปแบบหล่อและค้อน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัด 4 ชนิด ได้แก่ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา มีขั้นตอนการทดลองในภาพรวมได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8

3.3.1 ทดสอบคุณสมบัติดัชนี ประกอบด้วย

- ☒ การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, Gs) ASTM D854-02
- ☒ การทดสอบปริมาณความชื้น (Water content, w) ASTM D2216-98
- ☒ การทดสอบขีดจำกัดของแอตเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limit)
- ☒ ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, L. L.) ASTM D 4318-00 Method A
- ☒ ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, P. L.) ASTM D 4318-00
- ☒ การทดสอบหาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis, sieve wash) ASTM D 422-63
- ☒ การจำแนกดินด้วยวิธีเอกภาพ (USCS) ASTM D2488-00

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม (Engineering Properties)

การทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ซึ่งเป็นดินท้องถิ่นจังหวัดสงขลา สามารถแยกจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ได้ตามตารางที่ 3.1 และการทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมของดินตัวอย่างใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานดังต่อไปนี้

☒ การทดสอบการบดอัด (Compaction test) ASTM 1557, ASTM 698, Daniel and Benson (1990)

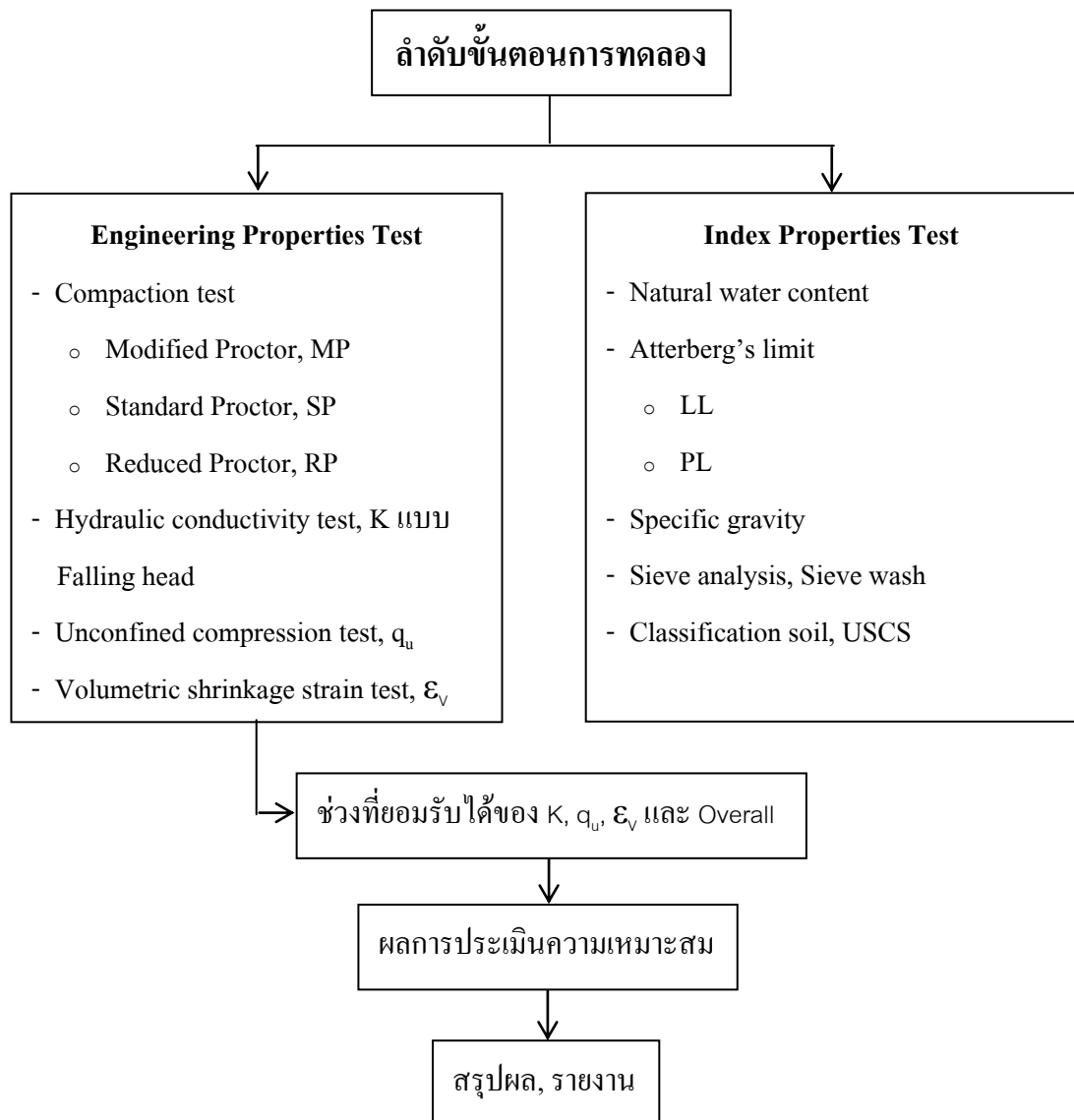
☒ การทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity test) แบบ Falling head ASTM 2434-68

☒ การทดสอบความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage strain test) วิธี Daniel and Wu (1993)

☒ การทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM 2166-00

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างและมาตรฐานการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	จำนวนตัวอย่าง
1. ทดสอบการบดอัด (Compaction test)	
- Modified Proctor	20 ตัวอย่าง
- Standard Proctor	20 ตัวอย่าง
- Reduced Proctor	20 ตัวอย่าง
2. ทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	60 ตัวอย่าง
(Hydraulic conductivity test) แบบ Falling head	
3. ทดสอบความเครียดเชิงปริมาตร	60 ตัวอย่าง
(Volumetric shrinkage strain)	
4. ทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด	60 ตัวอย่าง
(Unconfined compression test)	
รวม	240 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.2.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

ประกอบด้วย การบดอัดดินตัวอย่างสี่ชนิด ด้วยวิธี Standard Proctor ตามมาตรฐาน ASTM D698 จำนวน 20 ตัวอย่าง วิธี Modified Proctor ตามมาตรฐาน ASTM D 1557 จำนวน 20 ตัวอย่าง และวิธี Reduced Proctor ตามวิธี Daniel and Benson (1990) จำนวน 20 ตัวอย่าง (ตารางที่ 3.1)

☒ ทดสอบการบดอัดวิธี Standard Proctor ทำโดยบดอัดดินตัวอย่างในกระบอกบดอัดมาตรฐาน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) ปริมาตรของกระบอกบดอัดเท่ากับ 943.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน บดอัดชั้นละ 25 ครั้ง ด้วยค้อนมาตรฐานหนัก 2.5 กิโลกรัมและมีระยะยก 305 มิลลิเมตร (12 นิ้ว)

☒ ทดสอบการบดอัดวิธี Modified Proctor วิธีการทดสอบเหมือนกับ การบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor แต่ใช้พลังงานบดอัดสูงกว่า จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งของดินสูงมากขึ้น โดยแบ่งการบดอัดออกเป็น 5 ชั้นเท่าๆ กัน บดอัดชั้นละ 25 ครั้งด้วยค้อนมาตรฐานหนัก 4.45 กิโลกรัมและมีระยะยก 457 มิลลิเมตร (18 นิ้ว)

☒ ทดสอบการบดอัดวิธี Reduced Proctor วิธีการทดสอบเหมือนกับ การบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor แต่ใช้พลังงานบดอัดน้อยกว่าวิธี Standard Proctor กล่าวคือ บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน แต่ทำการบดอัดเพียงชั้นละ 15 ครั้ง ด้วยค้อนมาตรฐานหนัก 2.5 กิโลกรัม และมีระยะยก 305 มิลลิเมตร (12 นิ้ว)

การทดสอบบดอัดทั้งสามวิธีเพื่อหาปริมาณความชื้นและความหนาแน่นแห้ง เพื่อสร้างกราฟการบดอัดและใช้สำหรับเตรียมดินตัวอย่าง สำหรับการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัดและทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

3.3.2.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity test) แบบ Falling head เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2434-68 ใช้เครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร สูง 114.3 มิลลิเมตร นำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นจากข้อ 3.3.2.1 นำไปบรรจุลงในพลาสติกมัดปากถุงให้แน่น ปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นนำไปบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor โดยมีขั้นตอน ดังนี้

(a) นำดินที่บ่มไว้ในถุงพลาสติก ทั้งสี่ชนิดบดอัดในกระบอกบดอัด PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและปริมาตรเท่ากับกระบอกบดอัดมาตรฐาน ด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor

(b) นำ Mold PVC ที่ใส่ดินที่บดอัดแล้ว มาประกอบเป็นชุดการทดลอง (ภาพประกอบที่ 3.4) นำน้ำกลั่นมาใช้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ด้วยวิธี Falling head test ตามมาตรฐาน ASTM D 2434-68

(c) อ่านค่าระดับความสูงของน้ำ จาก Standpipe และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างอย่าง เพื่อนำข้อมูลไปหาค่า K (ภาคผนวก ก.)

(d) บันทึกข้อมูลความสูงของน้ำ จาก Standpipe และปริมาณน้ำที่ไหลออก กระทำทุกวัน โดยทำการทดสอบจนกระทั่งผลต่างระหว่างปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในตัวอย่างดินและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างมีค่า ประมาณ 0.9 – 1. 1 และค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านคงที่ จึงยุติการทดสอบ



รูปที่ 3.8 การบ่มตัวอย่างในถุงพลาสติก

3.3.2.3 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Strain Test)

เป็นการทดสอบตามวิธี Daniel and Wu (1993) โดยนำดินตัวอย่างสี่ชนิดที่เตรียมไว้ ผสมกับน้ำโดยใช้ปริมาณความชื้น ตามหัวข้อ 3.3.2.1 บ่มไว้ในถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายตัวทั่วมวลดิน (รูปที่ 3.7) จากนั้นบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor ตามลำดับ ดันดินตัวอย่างออกจากแบบหล่อ วางไว้ในห้องปฏิบัติการปรับอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 27 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3.8) ทำ

การชั่งน้ำหนัก วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของดินตัวอย่างทุกๆ 24 ชั่วโมง ด้วย Electronic Digital Caliper (รูปที่ 3.9) จนกระทั่งดินตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ นำข้อมูลที่ได้ไปหา ϵ_v (ภาคผนวก ข) โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการทดสอบนานประมาณ 1 เดือน



รูปที่ 3.9 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 การวัดขนาดตัวอย่างด้วย Electronic Digital Caliper

3.3.2.4 การทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมาใหม่ โดยใช้ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น ตามหัวข้อ 3.3.2.1 ทั้งสามวิธีบดอัด หาน้ำหนักดินแห้งที่ใช้ทดสอบ คำนวณจากความหนาแน่นแห้งของดินตัวอย่างกับปริมาตรของแบบหล่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.25 cm สูง 8.50 cm ตามรูปที่ 3.6 นำดินแห้งที่คำนวณได้ผสมกับน้ำตามเปอร์เซ็นต์ความชื้น บ่มดินที่ผสมกับน้ำไว้ในถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายเข้าไปในเนื้อดินอย่างทั่วถึงกัน บดอัดดินที่บ่มไว้ในถุงพลาสติกทั้งหมดให้เต็มแบบหล่อพอดี แกะแบบนำเข้าเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด เพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) ต่อไป

ก่อนการทดสอบ วัดขนาดความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างให้ละเอียดถึง 0.01 มม. โดยใช้ Electronic Digital Caliper สำหรับการทดสอบให้นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ โดยกดด้วยอัตราเร็ว 1 เปอร์เซ็นต์ของความสูงตัวอย่างต่อนาที ในระหว่างทดสอบให้บันทึกขนาดน้ำหนักกดและความสูงที่เปลี่ยนแปลง ตามรูปที่ 3.10 เพื่อที่จะนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการกดตัวอย่าง 3 ก้อนในสภาวะการบดอัด อัตราส่วนผสมเดียวกัน



รูปที่ 3.11 การทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test)

3.4 ช่วงที่ยอมรับได้ (Acceptable Zone) และขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall Acceptable Zone) ของดินบดอัด

ขั้นตอนการหาช่วงที่ยอมรับได้และช่วงที่ยอมรับได้ทั้งหมด ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน การหาค่าตัวเชิงปริมาตรและกำลังอัดแกนเดียว ของดินตัวอย่าง เป็นดังนี้

1. สร้างกราฟบดอัด ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น จากการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor Standard Proctor และ Reduced Proctor
2. นำผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน การหาค่าตัวเชิงปริมาตรและกำลังอัดแกนเดียว สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึม การหาค่าตัวเชิงปริมาตรและกำลังอัดแกนเดียว ตามลำดับ
3. นำผลจากกราฟในข้อ 2 เขียนสัญลักษณ์แบบทึบและแบบโปร่งในกราฟบดอัด (ข้อ 1) บริเวณที่มีสัญลักษณ์แบบทึบ เป็นช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน การหาค่าตัวเชิงปริมาตรและกำลังอัดแกนเดียว
4. นำกราฟจากข้อ 3 กราฟช่วงที่ยอมรับได้ทั้งสามกราฟวางซ้อนทับกัน
5. หาขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินตัวอย่าง โดยลากเส้นรอบบริเวณพื้นที่ที่กราฟทั้งสามทับกัน

3.5 การประเมินความเหมาะสมของชั้นดินกันซึมบดอัด ตามวิธี Daniel และ Benson (1990)

การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัด พิจารณาจากกราฟขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด กล่าวคือ ดินที่สามารถสร้างกราฟขอบเขตที่ยอมรับได้ จึงจะสามารถผ่านการประเมินความเหมาะสมเป็นชั้นกันซึมดินบดอัดได้

การจัดลำดับความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัด พิจารณาจากพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ นำมาปรับปรุงใหม่เพื่อเปรียบเทียบขนาดกัน ดินที่มีพื้นที่ใหญ่ที่สุด จะเป็นดินที่มีความเหมาะสมเป็นชั้นกันซึมมากที่สุด เพราะมีช่วงพลังงานและปริมาณความชื้นกว้าง ทำให้สามารถทำงานง่าย สะดวกและประหยัด มีลำดับขั้นตอนการหา ดังนี้

1. ปรับสเกลความหนาแน่นแห้ง (แกน x) และปริมาณความชื้น (แกน y) ของดินที่นำมาเปรียบเทียบความเหมาะสมกัน ให้มีสเกลขนาดเดียวกัน
2. จากกราฟขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินตัวอย่าง ลากเส้นจากความหนาแน่น (แกน y) ขนานไปตามปริมาณความชื้น (แนวแกน x) ให้สัมผัสกับค่าความหนาแน่นสูงสุดของกราฟบดอัดในพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ เมื่อบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor
2. สร้างพื้นที่ใหม่ เริ่มต้นจากเส้นที่สร้างจากข้อ 1 ไปตามพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้เดิม (ใต้เส้นที่สร้างจากข้อ 1)
3. เปรียบเทียบขนาดของพื้นที่ใหม่ เพื่อจัดลำดับความเหมาะสมของดินตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ผลการศึกษา การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบ ในระดับห้องปฏิบัติการ ได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

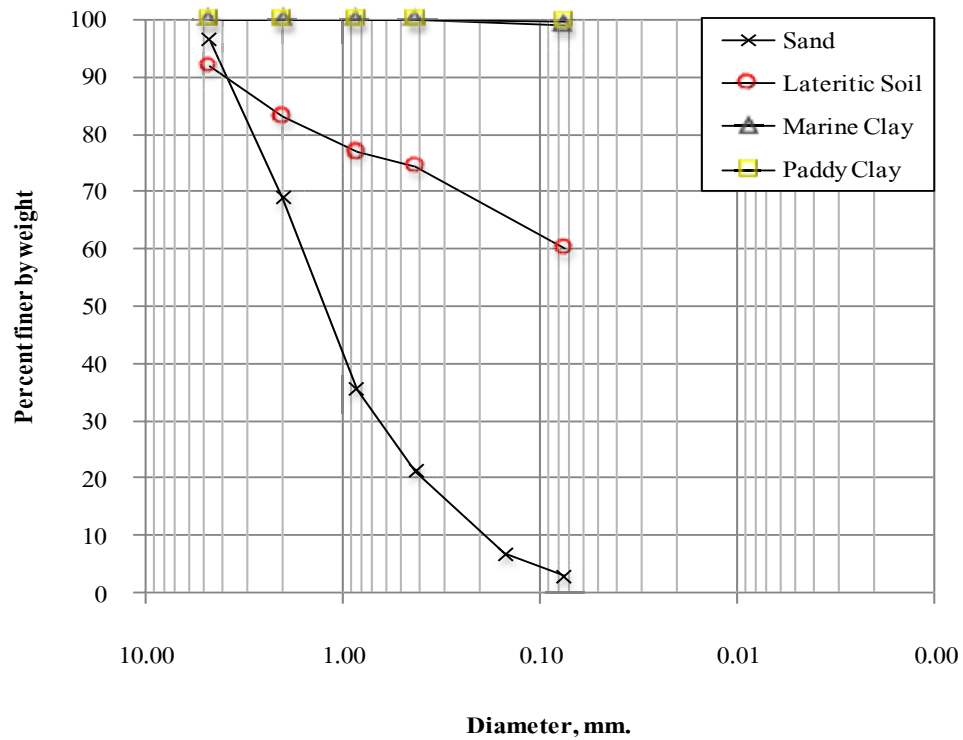
1. ผลการศึกษาคูณสมบัติดัชนี (Index Properties of Soils)
2. ผลการศึกษาคูณสมบัติด้านวิศวกรรมของดิน (Engineering Properties of Soils)
3. ผลการศึกษาการประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัด (Assessment of Suitable Compacted Soils)

4.1 ผลการศึกษาคูณสมบัติดัชนี (Index Properties of Soils)

การศึกษาคูณสมบัติดัชนีของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ประกอบด้วยผลการทดสอบการหาขนาดของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรง (Sieve analysis) ชีดจำกัดเหลว (Liquid limit, L.L.) ชีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, P.L.) การจำแนกชนิดของดิน (Soil classification) และการทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, G_s) ผลการศึกษาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และพบว่า

ทรายมีองค์ประกอบของเนื้อดินส่วนใหญ่ คือ ทราย มีขนาดตั้งแต่ 0.075 mm – 4.75 mm เท่ากับ 93.51% ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of curvature, C_c) เท่ากับ 1.39 ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of uniformity, C_u) เท่ากับ 8.95 จำแนกประเภทของดินด้วยระบบ Unified Soil Classification System (USCS) พบว่า ทราย จัดอยู่ในกลุ่ม Well grade sand (SW) ส่วนเบนโทไนต์ค่า Atterberg's limit เป็นดังนี้ ค่า LL = 487% และ ค่า PI = 450% (นันทนิตย์, 2549) และทรายผสมเบนโทไนต์ 5% มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.677

ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา มีองค์ประกอบของเนื้อดินส่วนใหญ่ คือ ตะกอนทรายและดินเหนียว มีขนาดเล็กกว่า 0.075 mm เท่ากับ 60.19%, 98.98%, 99.75% มีค่าชีดจำกัดเหลว (LL) = 34.62%, 60.33%, 72.49% ชีดจำกัดพลาสติก (PL) = 20.25%, 22.89%, 35.95% จำแนกประเภทของดินด้วยระบบ Unified soil classification system (USCS) จัดอยู่ในกลุ่ม Clay of low plasticity (CL), Clay of high plasticity (CH), High plasticity organic clay (OH) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.741, 2.705, 2.647 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดละดินตัวอย่าง

กราฟการกระจายตัวของขนาดละ (Grain size distribution) ของดินตัวอย่างได้แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณกรวด (Gravel content) ของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% (เฉพาะทราย) และดินลูกรัง มีปริมาณกรวด 3.51% และ 8.02% ตามลำดับ ส่วนดินเหนียวทะเลและดินเหนียวนาไม่มีปริมาณกรวด สำหรับปริมาณทราย (Sand content) พบว่า ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% (เฉพาะทราย) ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล และดินเหนียวนา มีปริมาณทรายเท่ากับ 93.51 % 31.79 % 1.02 % 0.25 % ตามลำดับ ส่วนปริมาณตะกอนทรายและดินเหนียว (Silt and clay content) พบว่า ดินทุกตัวอย่างมีปริมาณตะกอนทรายและดินเหนียว เป็นดังนี้ ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% (เฉพาะทราย) 2.91% ดินลูกรัง 60.19% ดินเหนียวทะเล 98.98% ดินเหนียวนา 99.75% สังเกตได้ว่า ดินเหนียวทะเลและดินเหนียวนา มีปริมาณตะกอนทรายและดินเหนียวมากและใกล้เคียงกันคือ 98.98%, 99.75% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติดัชนีของดินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

การทดสอบ	ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%	ดินลูกรัง	ดินเหนียวทะเล	ดินเหนียวนา
Gravel 4.75 - 75.00 mm, %	3.5**	8.02	-	-
Sand 0.075 - 4.75 mm, %	93.51**	31.79	1.02	0.25
Silt & Clay < 0.075mm, %	2.91**	60.19	98.98	99.75
Coefficient of curvature, C_c	1.39**	-	-	-
Coefficient of uniformity, C_u	8.95**	-	-	-
Liquid Limit, LL (%)	487*	34.62	60.33	72.49
Plastic Limit, PL (%)	37*	20.25	22.89	35.95
Plastic Index, PI (%)	450*	14.37	37.44	36.54
Soil classification, USCS	SW**	CL	CH	OH
Specific Gravity, G_s	2.677	2.741	2.705	2.647

หมายเหตุ *เฉพาะเบนโทไนต์ **เฉพาะทราย

สำหรับค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) Benson et al. (1994) แนะนำดินที่ใช้ทำชั้นกันซึม ควรมีค่าขีดจำกัดเหลวไม่น้อยกว่า 20% เพราะดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวสูงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำและจากการทดสอบดินลูกรังคองหึ่ง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนามีค่าขีดจำกัดเหลว 34.62%, 60.33%, 72.49% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าขีดจำกัดเหลวที่แนะนำ สำหรับทรายไม่มีค่าสภาพเป็นพลาสติก (Non-plasticity) จึงนำมาผสมกับเบนโทไนต์ ซึ่งมีค่าขีดจำกัดเหลวสูงถึง 487% ทำให้ทรายที่ผสมกับเบนโทไนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำลงมาก

ค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index, PI) ซึ่งตามมาตรฐานของชั้นกันซึม ดินบดอัดควรมีค่า PI ไม่น้อยกว่า 7%–10% และไม่มากกว่า 30%–40% เพราะถ้าดินมีค่า PI สูงมาก วัสดุจะเป็นก้อนแข็ง (hard Clods) เมื่อดินแห้งและจะเหนียวมากเมื่อดินเปียก (Daniel, 1993) ทำให้การบดอัดในสนามทำได้ยากซึ่งแตกต่างกับวัสดุประเภทไม่มีความเป็นพลาสติก (non-plastic) ที่สามารถบดอัดได้ง่ายกว่าไม่ว่าวัสดุจะแห้งหรือเปียก จากการทดสอบดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนามีค่าดัชนีพลาสติก 14.37%, 37.44%, 36.55% ตามลำดับซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม สำหรับชั้นกันซึมดินบดอัดและสังเกตพบว่าดินเหนียวทะเลและดินเหนียวนามีค่า PI ใกล้เคียงกันและสูงเกือบ 40%

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน (Engineering Properties of Soils)

4.2.1 ผลการทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

การทดสอบการบดอัดดินในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry density) และปริมาณความชื้น (Water content) ของดินทั้งสี่ชนิด ตามมาตรฐานการบดอัดดินด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor และ Reduced Proctor ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ผลการทดสอบบดอัดทั้งสามวิธี พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นและบดอัดทางด้านแห้ง (Dry side) ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry density) สูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเพิ่มปริมาณความชื้นถึงปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, O.M.C.) ดินจะมีความหนาแน่นแห้งมากที่สุด เรียกว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\psi_{d\max}$) จากนั้นการเพิ่มปริมาณความชื้นและบดอัดทางด้านเปียก (Wet side) จะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เพราะน้ำจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคของเม็ดดินจึงทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง

4.2.1.1 ผลการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, MP

ผลทดสอบการบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor ของดินทั้งสี่ชนิด (รูปที่ 4.2) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นในมวลดินของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ให้ค่าความหนาแน่นแห้ง ($\psi_{d\max}$) อยู่ระหว่าง 1.973%–1.655% และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (O.M.C.) อยู่ระหว่าง 9.88%–20.31% ตามตารางที่ 4.3

สังเกตได้ว่าการทดสอบการบดอัดดินด้วยวิธี Modified Proctor ทำให้ดินตัวอย่างเรียงตัวจากความหนาแน่นแห้งสูงไปหาความหนาแน่นต่ำเหมือนการบดอัดดินทั่วไป กล่าวคือ ทราย (SW) ผสมเบนโทไนต์ 5% ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด สูงที่สุด 1.973 g/cm³ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 9.88% ดินลูกรัง (CL) ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.959 g/cm³ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 11.01% ดินเหนียวทะเล (CH) ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.755 g/cm³

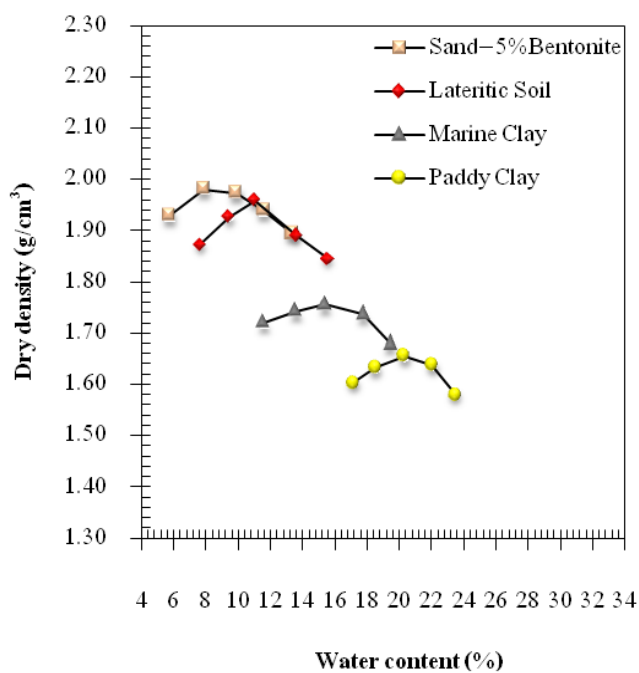
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor

ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%		ดินลูกรัง (CL)		ดินเหนียวทะเล (CH)		ดินเหนียวนา (OH)	
วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ψ_d (g/cm ³)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ψ_d (g/cm ³)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ψ_d (g/cm ³)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ψ_d (g/cm ³)
MP 6% (5.75%)*	1.928	MP 8% (7.65%)*	1.873	MP 12% (11.57%)*	1.720	MP 18% (17.14%)*	1.604
8% (7.88%)*	1.966	10% (9.45%)*	1.927	14% (13.58%)*	1.742	20% (18.49%)*	1.632
10% (9.88%)*	1.973	12% (11.01%)*	1.959	16% (15.37%)*	1.755	22% (20.31%)*	1.655
12% (11.59%)*	1.938	14% (13.60%)*	1.891	18% (17.75%)*	1.737	24% (22.04%)*	1.638
14% (13.34%)*	1.895	16% (15.55%)*	1.846	20% (19.41%)*	1.680	26% (23.42%)*	1.581
SP 8% (7.81%)*	1.892	SP 12% (11.56%)*	1.704	SP 18% (17.57%)*	1.545	SP 20% (19.17%)*	1.495
10% (9.34%)*	1.922	14% (13.63%)*	1.752	20% (19.53%)*	1.576	22% (20.49%)*	1.514
12% (11.34%)*	1.951	16% (15.34%)*	1.781	22% (21.65%)*	1.587	24% (22.19%)*	1.537
14% (13.56%)*	1.890	18% (17.64%)*	1.762	24% (23.46%)*	1.556	26% (24.03%)*	1.525
16% (15.34%)*	1.855	20% (19.55%)*	1.695	26% (25.30%)*	1.523	28% (25.87%)*	1.484
RP 10% (9.98%)*	1.840	RP 14% (13.81%)*	1.642	RP 24% (23.19%)*	1.388	RP 22% (21.55%)*	1.405
12% (11.60%)*	1.880	16% (15.61%)*	1.697	26% (25.12%)*	1.418	24% (22.78%)*	1.433
14% (13.80%)*	1.900	18% (17.20%)*	1.746	28% (27.27%)*	1.440	26% (24.62%)*	1.462
16% (15.50%)*	1.832	20% (19.27%)*	1.685	30% (29.21%)*	1.409	28% (26.90%)*	1.441
18% (17.20%)*	1.800	22% (21.44%)*	1.626	32% (31.87%)*	1.359	30% (28.78%)*	1.401

ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 15.37% และดินเหนียวนา (OH) ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ต่ำที่สุด 1.655 g/cm³ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 20.31% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor

ชนิดของดิน	สัญลักษณ์กลุ่มดิน	$\psi_{d\max}$ (g/cm ³)	w_{opt} (%)
ดินลูกรัง	CL	1.959	11.01
ดินเหนียวนา	OH	1.655	20.31
ดินเหนียวทะเล	CH	1.755	15.37
ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%	-	1.973	9.88



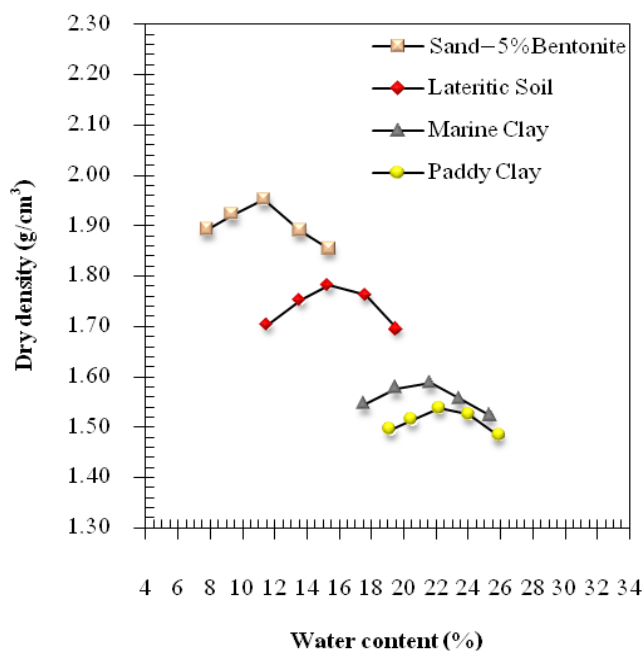
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดสอบบดอัดดินตัวอย่าง วิธี Modified Proctor

4.2.1.2 ผลการการบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor, SP

ผลการทดสอบบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Standard Proctor จากรูปที่ 4.3 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างเหมือนกับการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor กล่าวคือ ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% คงมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด สูงที่สุด 1.951 g/cm³ ปริมาณความชื้น 11.34% ตามด้วยดินลูกรัง 1.781 g/cm³ ปริมาณความชื้น 15.34% ดินเหนียวทะเล 1.587 g/cm³ ปริมาณความชื้น 21.65% และดินเหนียวนา 1.537 g/cm³ ปริมาณความชื้น 22.19% ตามลำดับ และความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\psi_{d\max}$) ของดินตัวอย่างอยู่ระหว่าง 1.951 g/cm³–1.537 g/cm³ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (O.M.C.) อยู่ระหว่าง 11.34%–22.19% ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor

ชนิดของดิน	สัญลักษณ์กลุ่มดิน	$\psi_{d\max}$ (g/cm ³)	w_{opt} (%)
ดินลูกรัง	CL	1.781	15.34
ดินเหนียวนา	OH	1.537	22.19
ดินเหนียวทะเล	CH	1.587	21.65
ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%	-	1.951	11.34



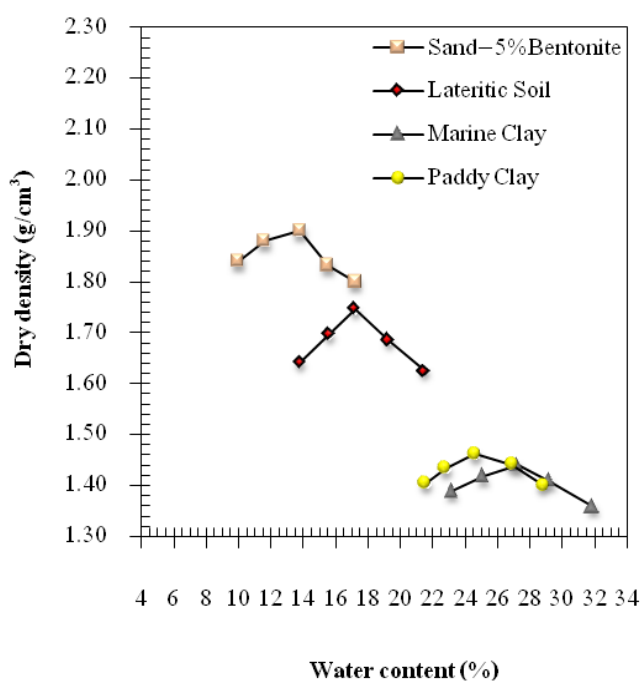
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดสอบบดอัดของดินตัวอย่าง วิธี Standard Proctor

4.2.1.3 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor, RP

การทดสอบบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Reduced Proctor จากรูปที่ 4.4 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างเป็นดังนี้ ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% คงมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด สูงที่สุด 1.900 g/cm^3 ปริมาณความชื้น 13.80% ตามด้วยดินลูกรัง 1.746 g/cm^3 ปริมาณความชื้น 17.20% ดินเหนียวนา 1.462 g/cm^3 ปริมาณความชื้น 24.62% และดินเหนียวทะเล 1.440 g/cm^3 ปริมาณความชื้น 27.27% ตามลำดับ และความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\psi_{d \max}$) ของดินตัวอย่างทั้งสี่ชนิดอยู่ระหว่าง 1.900 g/cm^3 – 1.440 g/cm^3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (O.M.C.) อยู่ระหว่าง 13.80%–27.27% ตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor

ชนิดของดิน	สัญลักษณ์กลุ่มดิน	$\psi_{d \max} (\text{g/cm}^3)$	$W_{opt} (\%)$
ดินลูกรัง	CL	1.746	17.20
ดินเหนียวนา	OH	1.462	24.62
ดินเหนียวทะเล	CH	1.440	27.27
ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%	-	1.900	13.80



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบบดอัดดินตัวอย่าง วิธี Reduced Proctor

ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดิน ตัวอย่างทั้งสี่ชนิด เมื่อบดอัดด้วยวิธีบดอัด แบบ Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของดินบดอัดตามในตารางที่ 4.7 (U.S.Navy, 1982) พบว่า ดินลูกรังจำแนกได้เป็น CL มีค่า $\psi_{d\max}$ อยู่ระหว่าง 1.725-1.942 g/cm³ W_{opt} อยู่ระหว่าง 11.30–17.40 % มีค่าใกล้เคียงกับการบดอัดของ U.S. Navy, 1982 ดินเหนียวนา จำแนกได้เป็น OH มีค่า $\psi_{d\max}$ อยู่ระหว่าง 1.470–1.655 g/cm³ W_{opt} อยู่ระหว่าง 20.27-24.28 % มีค่าใกล้เคียงกับการบดอัดของ U.S. Navy, 1982 ดินเหนียวทะเล จำแนกได้เป็น CH มีค่า $\psi_{d\max}$ อยู่ระหว่าง 1.4345–1.750 g/cm³ W_{opt} อยู่ระหว่าง 15.10–27.98 % มีค่าใกล้เคียงกันกับการบดอัดของ U.S. Navy, 1982 แต่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor มีค่าต่ำกว่าไปประมาณ 3.9% และ $\psi_{d\max}$ มีค่าสูงกว่าค่าแนะนำ 0.150 g/cm³ สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ไม่ได้จำแนกชนิดของดิน

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินตัวอย่าง

ชนิดของดิน	สัญลักษณ์กลุ่มดิน	$\psi_{d\max}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)
ดินลูกรัง	CL	1.725–1.942	11.30–17.45
ดินเหนียวนา	OH	1.470–1.655	20.27–24.28
ดินเหนียวทะเล	CH	1.434–1.750	15.10–27.98
ทรายผสมเบนโทไนต์5%	-	1.890–1.982	9.00–12.54

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของดินบดอัดชนิดต่างๆ

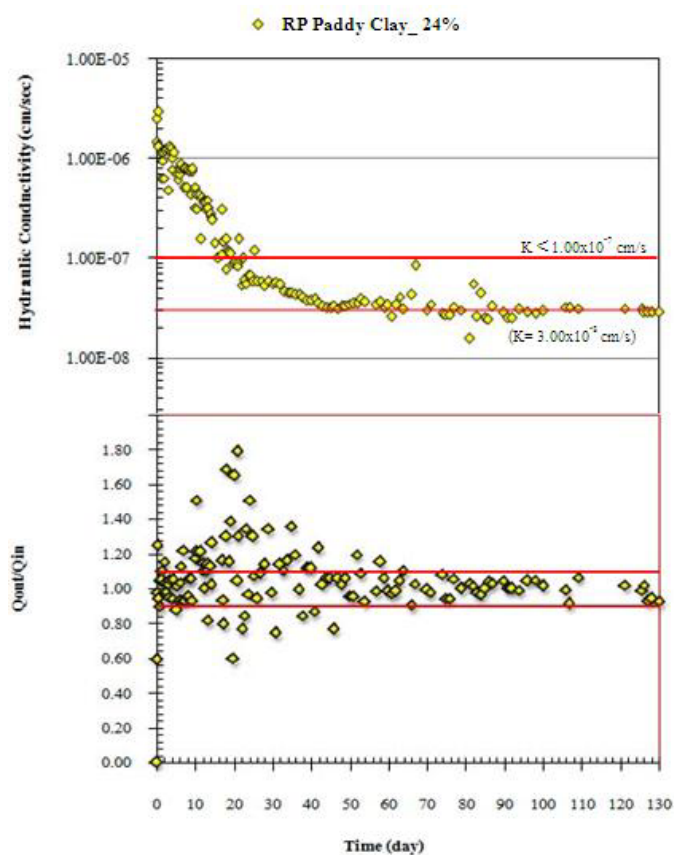
สัญลักษณ์กลุ่มดิน	$\psi_{d\max}$ (g/cm ³)	W_{opt} (%)
CL	1.520–1.920	12–24
OH	1.040–1.600	21–45
CH	1.200–1.680	19–36

ที่มา: U.S. Navy, 1982

4.2.2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity Test) วิธีระดับน้ำแปรเปลี่ยน (Falling head)

เนื่องจากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, K มีจำนวนมาก ขอเสนอเฉพาะ รายละเอียดการทดสอบของดินเหนียวนา ที่ปริมาณความชื้น 24% บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor เป็นตัวอย่าง

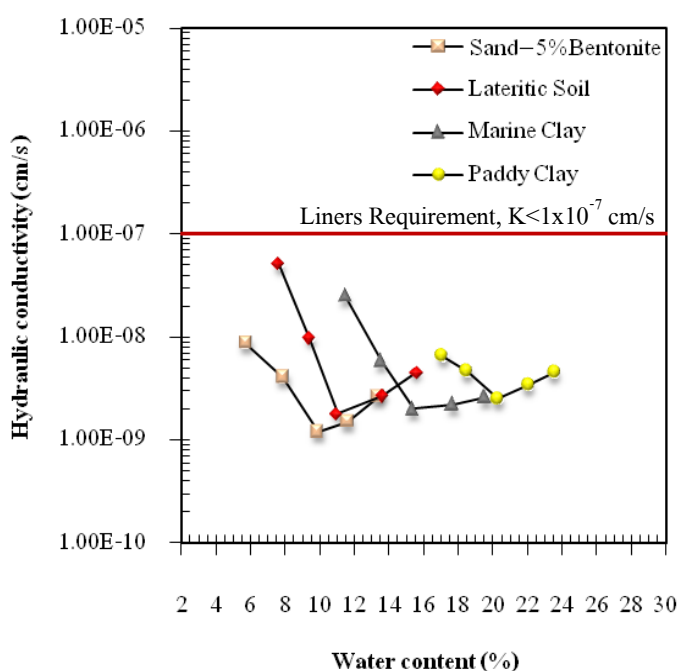
จากความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านกับเวลาของดินเหนียวนา ที่ปริมาณความชื้น 24% บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor (รูปที่ 4.5) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านตอนเริ่มต้นจะมีค่าสูง ประมาณ $3.00 \Delta 10^{-6}$ cm/s และลดต่ำลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 20 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวนาลดลงเหลือ $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s และเมื่อเวลาผ่านไป 70 วัน ดินจึงมีความอิ่มตัว สังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าไปในตัวอย่าง (Q_{in}) และอัตราการไหลออกจากตัวอย่าง (Q_{out}) อยู่ระหว่าง 0.9–1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมี จึงหยุดการทดสอบ อ่านค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเท่ากับ $3.00 \Delta 10^{-8}$ cm/s ใช้เวลาทดสอบ 130 วัน



รูปที่ 4.5 เงาม์การหยุดทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

4.2.2.1 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ของดินตัวอย่าง บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor

จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ตามรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.8 พบว่า ทราผสมเบนโทไนต์ 5% ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำที่สุด ตามด้วยดินลูกรัง ดินเหนียวนา ดินเหนียวทะเล โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเท่ากับ $1.2 \Delta 10^{-9}$ cm/s, 1.80×10^{-9} cm/s, $2.00 \Delta 10^{-9}$ cm/s และ $2.50 \Delta 10^{-9}$ cm/s ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินตัวอย่างทั้งหมด ทุกความหนาแน่นแห้งและทุกความชื้นต่ำกว่า $1.00 \Delta 10^{-7}$ cm/s ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมดินบดอัด สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำสุดของดินตัวอย่างอยู่ระหว่าง $1.20 \Delta 10^{-9}$ cm/s ถึง $2.50 \Delta 10^{-9}$ cm/s ค่าปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 9.88% ถึง 20.31% และจากการทดสอบการบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor ทราผสมเบนโทไนต์ 5% ให้น้ำผ่านซึมต่ำที่สุด $1.20 \Delta 10^{-9}$ cm/s ดินเหนียวนาให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงที่สุด 2.50×10^{-9} cm/s



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor

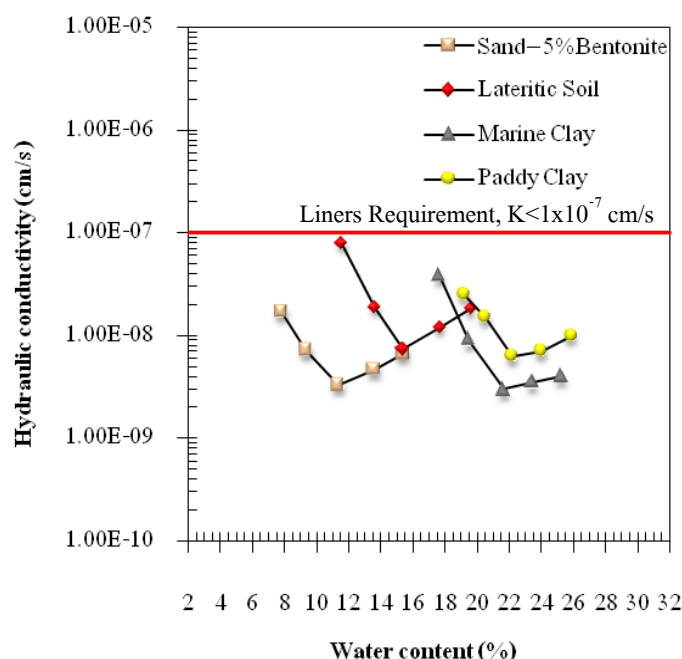
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity, K)

ทรายผสมเลนใน 5%		ดินลูกรังคอห่าน		ดินเหนียวทะเล		ดินเหนียวนา	
วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	K (cm/s)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	K (cm/s)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	K (cm/s)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	K (cm/s)
MP 6%	8.60E-09	MP 8%	5.00E-08	MP 12%	2.50E-08	MP 18%	6.50E-09
8%	4.00E-09	10%	9.60E-09	14%	5.80E-09	20%	4.60E-09
10%	1.20E-09	12%	1.80E-09	16%	2.00E-09	22%	2.50E-09
12%	1.50E-09	14%	2.70E-09	18%	2.20E-09	24%	3.40E-09
14%	2.60E-09	16%	4.50E-09	20%	2.60E-09	26%	4.50E-09
SP 8%	1.70E-08	SP 12%	7.80E-08	SP 18%	3.80E-08	SP 20%	2.50E-08
10%	7.20E-09	14%	1.88E-08	20%	9.00E-09	22%	1.50E-08
12%	3.30E-09	16%	7.40E-09	22%	3.00E-09	24%	6.24E-09
14%	4.65E-09	18%	1.20E-08	24%	3.50E-09	26%	7.00E-09
16%	6.64E-09	20%	1.80E-08	26%	4.00E-09	28%	9.85E-09
RP 10%	2.50E-08	RP 14%	2.17E-07	RP 24%	4.00E-08	RP 22%	7.00E-08
12%	1.30E-08	16%	7.33E-08	26%	1.60E-08	24%	3.00E-08
14%	6.46E-09	18%	2.11E-08	28%	4.50E-09	26%	1.80E-08
16%	8.80E-09	20%	3.00E-08	30%	5.00E-09	28%	2.20E-08
18%	1.30E-08	22%	5.43E-08	32%	5.80E-09	30%	2.50E-08

4.2.2.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินตัวอย่าง บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor

จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ตามรูปที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับ ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด ($1 \Delta 10^{-7}$ cm/s) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำสุดของดินแต่ละ ชนิดเป็นดังนี้ ทราชผสมเบนโทไนต์ 5% $3.3 \Delta 10^{-9}$ cm/s ดินลูกรัง $7.40 \Delta 10^{-9}$ cm/s ดินเหนียวทะเล 3.00×10^{-9} cm/s ดินเหนียวนา $6.24 \Delta 10^{-9}$ cm/s สังเกตว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำ ซึมผ่านอยู่ ระหว่าง 3.00×10^{-9} cm/s ถึง $7.40 \Delta 10^{-9}$ cm/s และปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 11.34% ถึง 22.20% นอกจากนี้ ดินลูกรังให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงที่สุด $7.40 \Delta 10^{-9}$ cm/s ดินเหนียวทะเล ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำที่สุด $3.00 \Delta 10^{-9}$ cm/s

จากการทดสอบ ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ นันท นิษฐ์ (2549) ซึ่งได้ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ของทราชผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล เท่ากับ $5.15 \Delta 10^{-9}$ cm/s, $3.39 \Delta 10^{-8}$ cm/s, $5.67 \Delta 10^{-8}$ cm/s ตามลำดับ

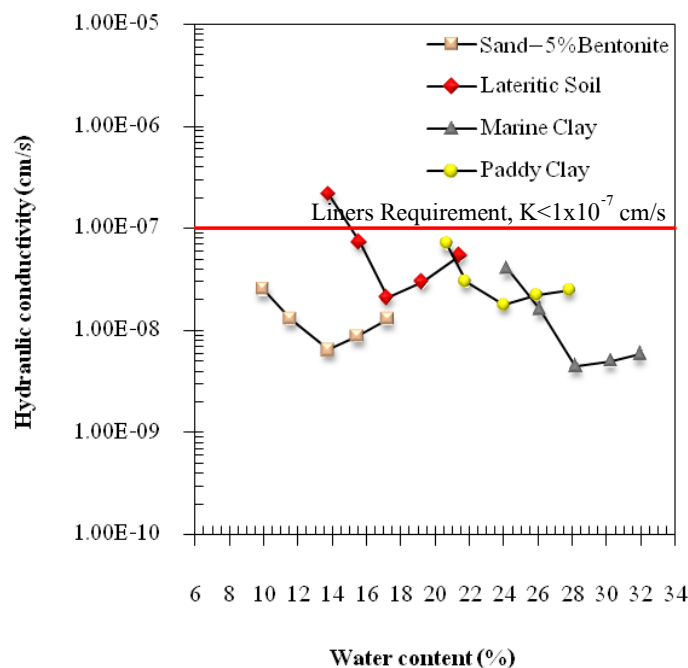


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor

4.2.2.3 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน บดอัดด้วยวิธี

Reduced Proctor

จากการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ตามรูปที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.8 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรัง ที่ปริมาณความชื้น 13.81% มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเท่ากับ $2.17 \Delta 10^{-7}$ cm/s สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s นอกนั้นผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทั้งหมดและค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำสุดของดิน ตัวอย่างเป็น ดังนี้ ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% $6.46 \Delta 10^{-9}$ cm/s ดินลูกรัง $2.11 \Delta 10^{-8}$ cm/s ดินเหนียวทะเล $4.50 \Delta 10^{-9}$ cm/s ดินเหนียวนา $1.80 \Delta 10^{-8}$ cm/s สังเกตว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านอยู่ระหว่าง $2.11 \Delta 10^{-8}$ cm/s ถึง $4.50 \Delta 10^{-9}$ cm/s ค่าปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 13.80% ถึง 28.20% และจากการบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Reduce Proctor ดินลูกรังให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงที่สุด $2.11 \Delta 10^{-8}$ cm/s ดินเหนียวทะเลให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำที่สุด $4.50 \Delta 10^{-9}$ cm/s



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor

4.2.3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, q_u)

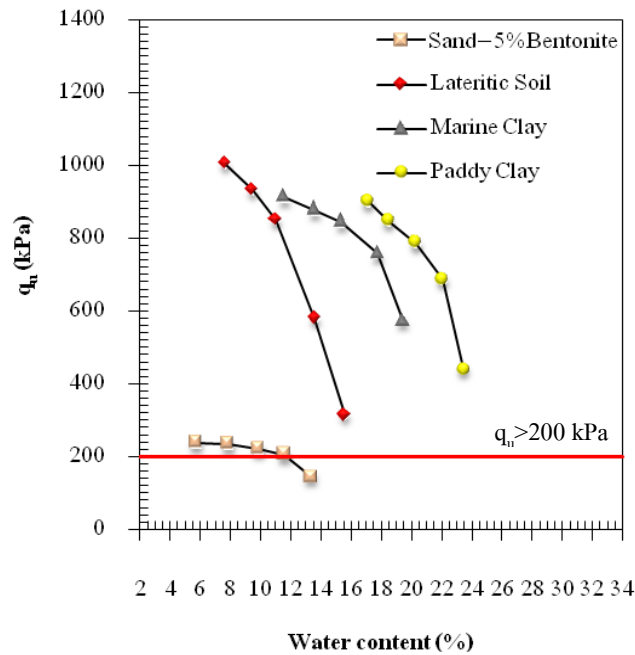
และ $E_{(50)}$

จากการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) ของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวนา ดินเหนียวทะเล บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor (รูปที่ 4.9) บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor (รูปที่ 4.10) บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor (รูปที่ 4.11) ทั้งหมดแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้น พบว่าดินตัวอย่างที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด ไม่ได้ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด และค่าความแข็งแรงจะลดลงอย่างมาก เริ่มตั้งแต่ปริมาณความชื้นเข้าใกล้จุดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ชินะวัฒน์, 2544) ทั้งนี้เพราะดินเมื่อบดอัดด้วยปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม จะมีน้ำในมวลดินเป็นจำนวนมากแทรกอยู่ระหว่างเม็ดดิน ทำให้แรงเสียดทานภายในเม็ดดินลดลง ค่ากำลังรับแรงเฉือนจึงลดลงตามไปด้วย

$E_{(50)}$ เป็นค่าที่ได้จากผลการคำนวณของค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, q_u) แสดงถึงความแข็งแรงหรือความต้านทานต่อการเสียรูปของดินตัวอย่างเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ ความสัมพันธ์ระหว่าง $E_{(50)}$ กับพลังงานการบดอัด ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น และชนิดของดิน พบว่าค่า $E_{(50)}$ ที่พลังงานบดอัดแต่ละวิธี มีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น ตามตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10

4.2.3.1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor

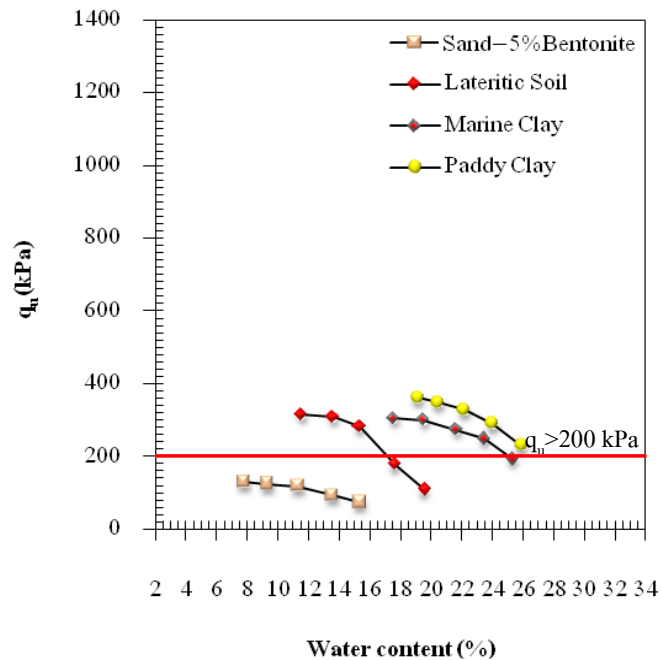
จากการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียว ดินตัวอย่างบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor ตามรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.9 มีค่าอยู่ในช่วง 147.11–1010.12 kPa ที่ปริมาณความชื้น 13.34%, 7.65% ตามลำดับและพบอีกว่าทรายผสมเบนโทไนต์ 5% มีค่ากำลังอัดแกนเดียวส่วนใหญ่สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 200 kPa ยกเว้นที่ปริมาณความชื้น 13.34% มีค่ากำลังอัดแกนเดียว 147.11 kPa ไม่ผ่านเกณฑ์ ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด 243.21 kPa ที่ปริมาณความชื้น 5.75% ดินลูกรัง มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด 1010.12 kPa ที่ปริมาณความชื้น 7.65 % ดินเหนียวทะเลและดินเหนียวนา มีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุด 912.05 kPa, และ 902.24 kPa และปริมาณความชื้น 11.57% และ 17.14% ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งหมดในทุกช่วงความชื้น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor

4.2.3.2 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor

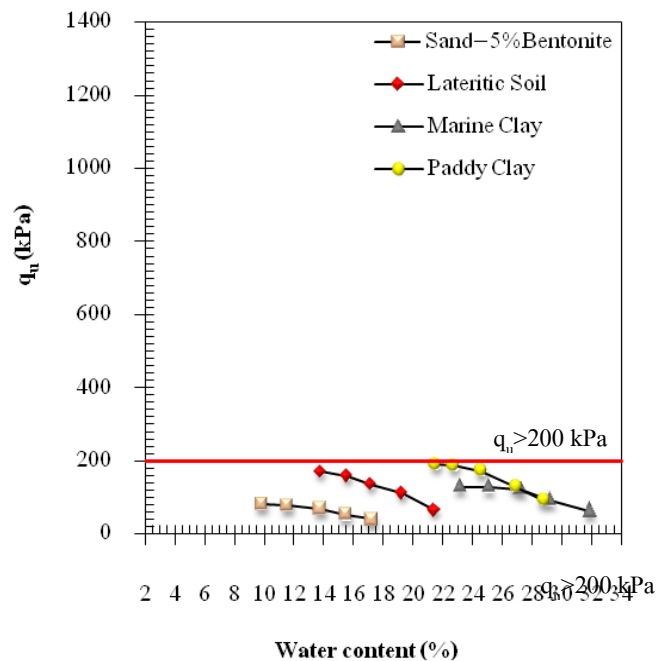
จากการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียว ดินตัวอย่างบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ตามรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.9 มีค่าอยู่ในช่วง 73.55–354.03 kPa ที่ปริมาณความชื้น 15.34%, 19.17% ตามลำดับ ทราบผสมเบนโทไนต์ 5% ให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 200 kPa ทุกปริมาณความชื้น ดินลูกรังที่ปริมาณความชื้น 17.64% และ 19.55% ไม่ผ่านเกณฑ์ ดินเหนียวทะเลผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้เกือบทุกปริมาณความชื้น ยกเว้นที่ปริมาณความชื้น 25.20% ไม่ผ่านเกณฑ์ ดินเหนียวนาค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทุกปริมาณความชื้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor

4.2.3.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor

จากการทดสอบแรงเนียนแบบ ไม่ถูกจำกัด พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียว ดินตัวอย่างบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor ตามรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.9 มีค่าอยู่ในช่วง 41.19–188.29 kPa ค่าปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 17.20%, 21.55% ตามลำดับ และพบว่าทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา มีค่ากำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 200 kPa ทั้งหมด โดยที่ดินเหนียวนามีค่ากำลังอัดแกนเดียวมากที่สุดและทรายผสมเบนโทไนต์ 5% มีค่ากำลังอัดแกนเดียวน้อยที่สุด

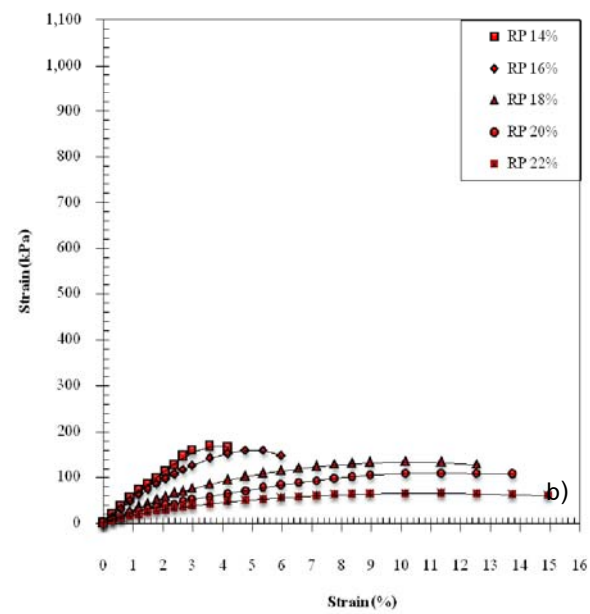
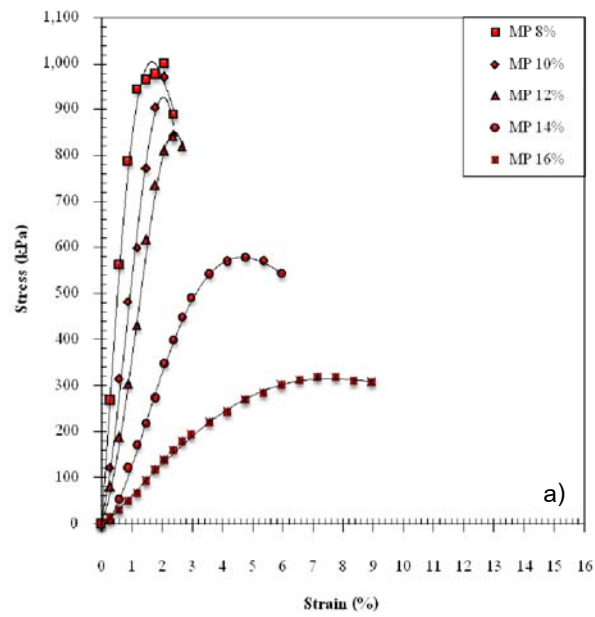


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor

4.2.3.4 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่างทั้งสี่ชนิดมีจำนวนมาก ขอเสนอผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง เป็นตัวอย่างเท่านั้น

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรังบดอัด ด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor ที่ปริมาณความชื้นต่างๆ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของดินลูกรังบดอัด ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 4.12 a, b และสังเกตพบอีกว่า ดินที่มีความแน่นหรือแข็ง กราฟจะแสดงค่ากำลังสูงสุดอย่างชัดเจน ตามรูปที่ 4.12 a ส่วนดินที่มีสภาพหลวมหรืออ่อนนุ่มนั้นกราฟจะไม่แสดงค่ากำลังสูงสุดให้เห็นอย่างชัดเจนแต่จะเอียงลาดไปตามแนวราบ แสดงตามรูปที่ 4.12 b



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงกำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง a) กราฟแสดงค่ากำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor b) กราฟแสดงค่ากำลังอัดแกนเดียว บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor

ตารางที่ 4.9 ค่ากำลังอัดแกนเดียว(Unconfined compressive strength, q_u) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% ($E_{(50)}$)

ทรายผสมบนโพใน 5%			ดินลูกรัง (CL)				
วิธีบดอัดและ ปริมาณ ความชื้น	q_u (kPa)	$E_{(50)}$ (kPa)	$S_u/E_{(50)}$	วิธีบดอัดและ ปริมาณ ความชื้น	q_u (kPa)	$E_{(50)}$ (kPa)	$S_u/E_{(50)}$
MP 6%	243.21	20967.37	5.80E-03	MP 8%	1010.12	95294.62	5.30E-03
8%	232.43	14172.31	8.20E-03	10%	931.67	51761.35	9.00E-03
10%	219.68	12922.16	8.50E-03	12%	853.21	42660.45	1.00E-02
12%	205.95	9534.58	1.08E-02	14%	580.57	19290.37	1.50E-02
14%	147.11	7742.37	9.50E-03	16%	315.79	6443.20	2.45E-02
SP 8%	130.04	11495.98	5.66E-03	SP 12%	313.82	12072.42	1.30E-02
10%	125.53	10638.10	5.90E-03	14%	308.92	9081.28	1.70E-02
12%	117.68	9340.00	6.30E-03	16%	281.46	7041.43	2.00E-02
14%	94.15	5671.52	8.30E-03	18%	176.53	2922.49	3.02E-02
16%	73.55	3605.51	1.02E-02	20%	106.90	1618.16	3.30E-02
RP 10%	80.42	6185.95	6.50E-03	RP 14%	168.68	5619.41	1.50E-02
12%	74.53	5248.82	7.10E-03	16%	158.87	4785.82	1.66E-02
14%	70.61	3461.29	1.02E-02	18%	134.36	2687.12	2.50E-02
16%	54.92	2408.74	1.14E-02	20%	109.84	1657.38	3.31E-02

18%	41.19	1337.32	1.54E-02	22%	66.69	1323.95	2.52E-02
-----	-------	---------	----------	-----	-------	---------	----------

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ดินเหนียวทะเล (CH)				ดินเหนียวนา (OH)			
วิธีบดอัดและ ปริมาณ ความชื้น	q_u (kPa)	$E_{(50)}$ (kPa)	$S_u/E_{(50)}$	วิธีบดอัดและ ปริมาณ ความชื้น	q_u (kPa)	$E_{(50)}$ (kPa)	$S_u/E_{(50)}$
MP 12%	912.05	56038.04	9.00E-03	MP 18%	902.24	50398.728	8.00E-03
14%	875.77	45560.02	9.70E-03	20%	848.31	46425.073	7.90E-03
16%	845.36	37377.85	1.00E-02	22%	789.46	34100.370	1.08E-02
18%	755.14	22839.98	1.45E-02	24%	686.49	16190.191	2.10E-02
20%	578.61	16307.77	1.75E-02	26%	433.47	9422.033	2.70E-02
SP 18%	302.06	14656.72	9.20E-03	SP 20%	354.03	31919.665	3.14E-03
20%	294.21	13962.80	1.08E-02	22%	350.11	23097.210	7.50E-03
22%	274.60	7780.30	1.82E-02	24%	324.61	16098.499	7.20E-03
24%	243.21	5521.73	2.08E-02	26%	289.31	10806.634	1.50E-02
26%	192.22	3890.88	2.70E-02	28%	228.50	4945.396	2.15E-02
RP 24%	129.45	2404.68	2.102E-02	RP 22%	188.29	10603.440	8.30E-03
26%	126.51	2318.88	2.304E-02	24%	184.37	8424.795	9.80E-03
28%	119.65	1659.57	3.315E-02	26%	174.56	7886.214	1.35E-02

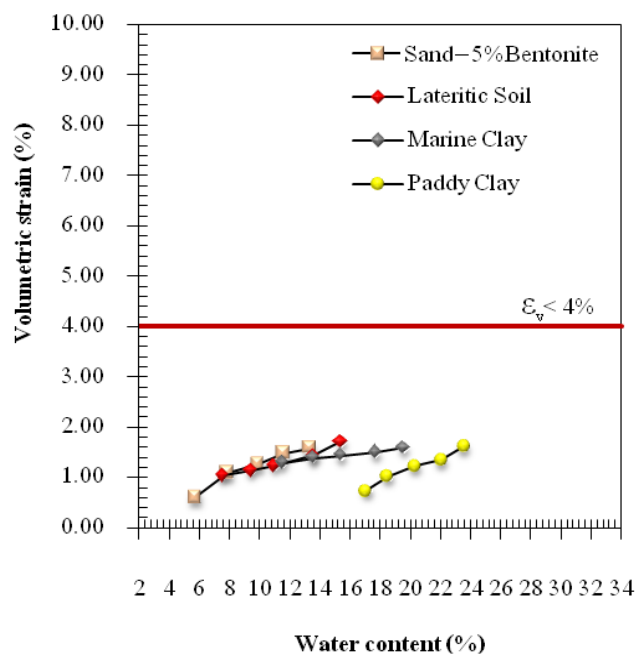
30%	88.26	1079.22	3.947E-02	28%	129.45	4554.993	1.52E-02
32%	63.75	722.06	4.333E-02	30%	93.17	2855.108	1.62E-02

4.2.4 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร(Volumetric Strain Test)

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรเป็นการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นของดิน เนื่องจากอุณหภูมิ ทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น ส่งผลต่อความมีเสถียรภาพในโครงสร้างของมวลดิน ทำให้เกิดการแบ่งแยกหรือเกิดความไม่ต่อเนื่องของวัสดุขึ้น และเมื่อมีน้ำชะขยะซึ่งเป็นของเหลวแทรกซึมระหว่างรอยแยกของมวลดินนั้น ย่อมส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ดินที่มีค่า PI สูงและบดอัดด้วยปริมาณความชื้นสูงๆ จะเกิดการหดตัวเชิงปริมาตรมากกว่าดินที่มีค่า PI น้อย ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10

4.2.4.1 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินตัวอย่าง บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor

จากการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินตัวอย่าง พบว่าการหดตัวเชิงปริมาตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกดินตัวอย่างและปริมาณความชื้น สังเกตได้ว่าดินตัวอย่างมีการหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุดต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.605%–1.712% ที่ปริมาณความชื้น 5.75%, 15.55% ตามรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.10

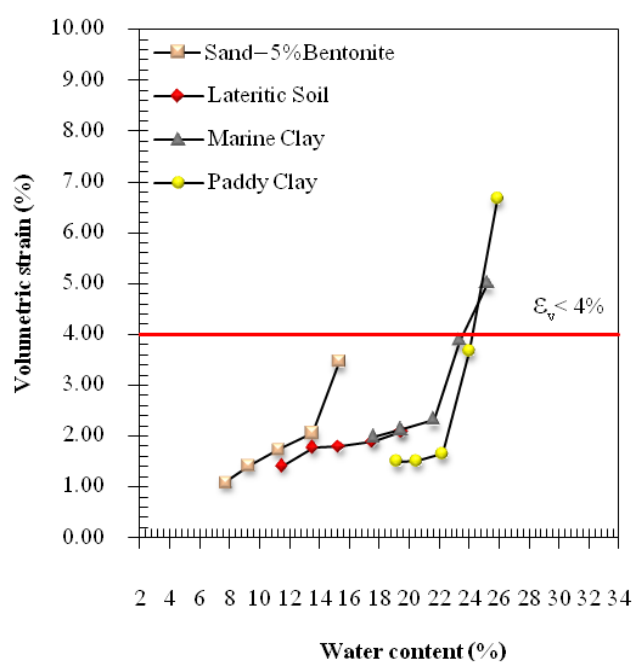


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการหดตัวเชิงปริมาตร บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor

4.2.4.2 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรดินตัวอย่าง บดอัดด้วยวิธี

Standard Proctor

จากการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินตัวอย่าง พบว่าทรายผสมเบนโทไนต์ 5% และดินลูกรัง มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตร ต่ำกว่าเกณฑ์ 4% ทุกปริมาณความชื้น สำหรับค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินเหนียวทะเล ที่ปริมาตรความชื้น 25.3% และดินเหนียวนา ที่ปริมาตรความชื้น 25.87% มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตร 4.996%, 6.662% ตามลำดับ ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ตามรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.10

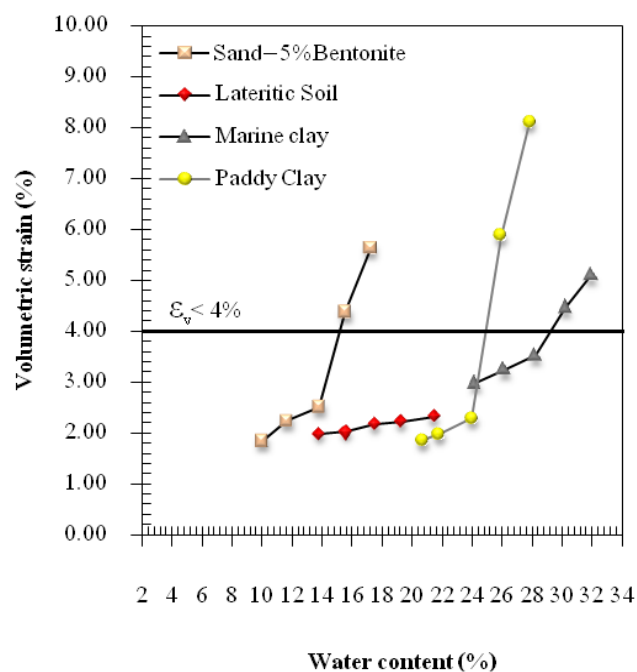


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการหดตัวเชิงปริมาตร บดอัดด้วยวิธี Standard proctor

4.2.4.3 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรดินตัวอย่างบดอัดด้วยวิธี

Reduced Proctor

จากการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินตัวอย่าง พบว่า ดินลูกรัง มีการหดตัวเชิงปริมาตร ผ่านเกณฑ์ 4% ทุกปริมาณความชื้น สำหรับการหดตัวเชิงปริมาตรของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ที่ปริมาณความชื้น 15.50% และ 17.20% ดินเหนียวทะเล ที่ปริมาณความชื้น 29.21% และ 31.87% ดินเหนียวนา ที่ปริมาณความชื้น 26.90% และ 28.78% มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตร 4.374, 5.635, 4.458, 5.100, 5.873, 8.109 ตามลำดับ ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ตามรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการหดตัวเชิงปริมาตร บดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor

ตารางที่ 4.10 ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Shrinkage Strain, ϵ_v)

ทรายผสมบนโทใน 5%		คินดูกรัง		คินหนียวทะเล		คินหนียวนา	
วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ϵ_v (%)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ϵ_v (%)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ϵ_v (%)	วิธีบดอัดและ ปริมาณความชื้น	ϵ_v (%)
MP 6%	0.605	MP 8%	1.044	MP 12%	1.292	MP 18%	0.749
8%	1.081	10%	1.138	14%	1.390	20%	1.027
10%	1.250	12%	1.237	16%	1.429	22%	1.230
12%	1.466	14%	1.443	18%	1.489	24%	1.349
14%	1.582	16%	1.712	20%	1.585	26%	1.616
SP 8%	1.103	SP 12%	1.422	SP 18%	1.992	SP 20%	1.494
10%	1.431	14%	1.776	20%	2.126	22%	1.509
12%	1.744	16%	1.792	22%	2.322	24%	1.649
14%	2.062	18%	1.889	24%	3.872	26%	3.671
16%	3.463	20%	2.083	26%	4.996	28%	6.662
RP 10%	1.844	RP 14%	1.985	RP 24%	2.983	RP 22%	1.852
12%	2.245	16%	2.020	26%	3.252	24%	1.975
14%	2.512	18%	2.164	28%	3.524	26%	2.287
16%	4.374	20%	2.218	30%	4.458	28%	5.873
18%	5.635	22%	2.320	32%	5.100	30%	8.109

4.3 ผลการศึกษาการประเมินความเหมาะสมของชั้นดินกันซึมบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบ ด้วยวิธี Daniel และ Benson (1990)

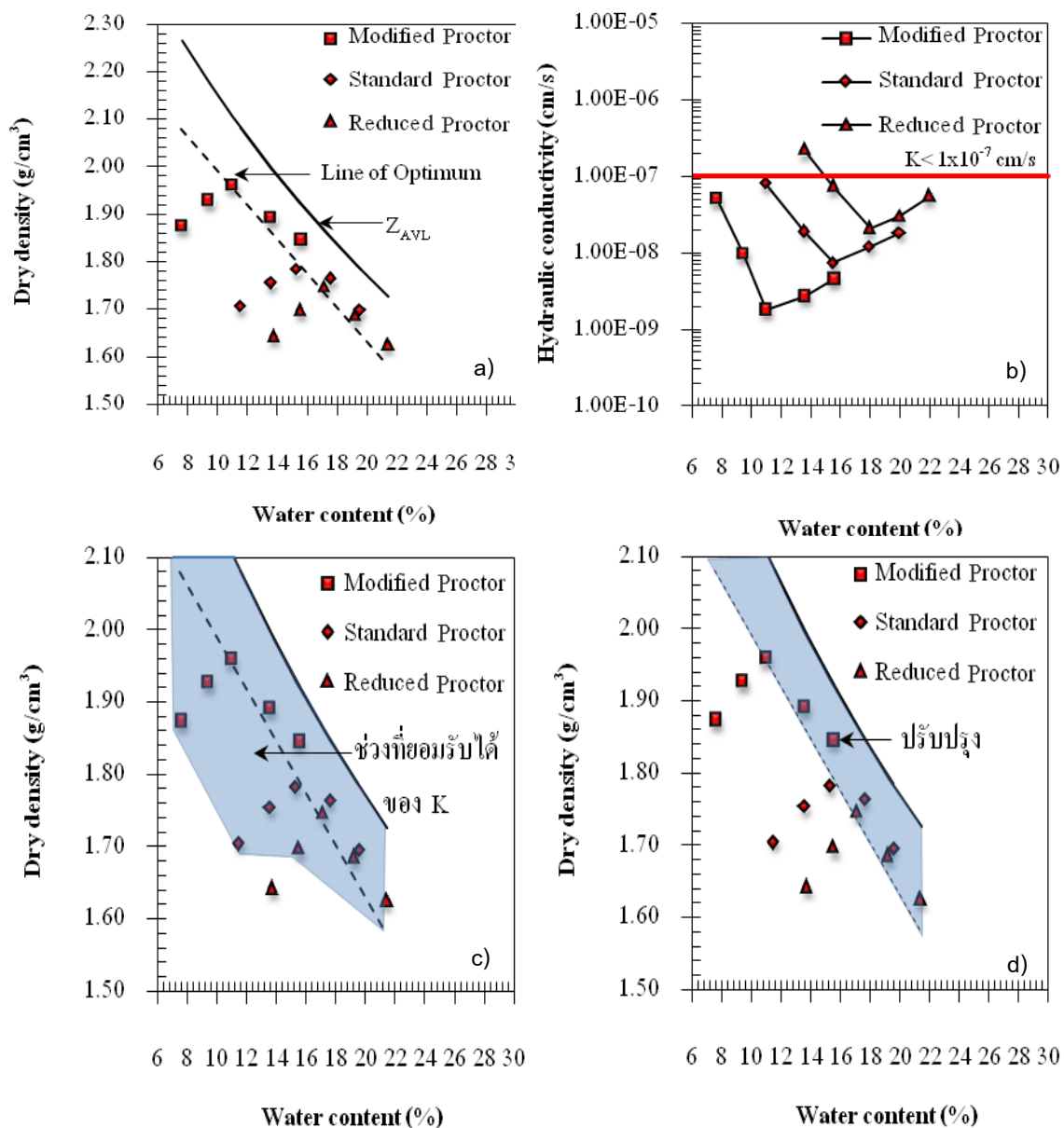
Daniel และ Benson (1990) ได้เสนอแนะเกี่ยวกับคุณสมบัติที่เหมาะสมของดินบดอัดสำหรับชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบ ดังนี้ 1) มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ต่ำกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s 2) มีกำลังรับแรงเฉือนที่เพียงพอ กำลังแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa และ 3) มีการหดตัวน้อย การหดตัวเชิงปริมาตรไม่เกิน 4% โดยกระบวนการหาช่วงของความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่ผ่านเกณฑ์ทั้ง 3 ข้อ แสดงในรูปของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone)

4.3.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของดินลูกรัง

4.3.1.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรัง พบว่าเมื่อบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Reduced Proctor ที่ปริมาณความชื้น 13.81% ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเท่ากับ $2.17 \Delta 10^{-7}$ cm/s สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s ส่วนการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor และ Standard Proctor ดินทุกปริมาณความชื้นผ่านเกณฑ์ทั้งหมด (รูปที่ 4.16 b) จากข้อมูลของกราฟการบดอัด (รูปที่ 4.16 a) จะใช้สัญลักษณ์แบบที่บดกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งสำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านเกณฑ์ ถูกนำมาใช้กำหนดช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (c)

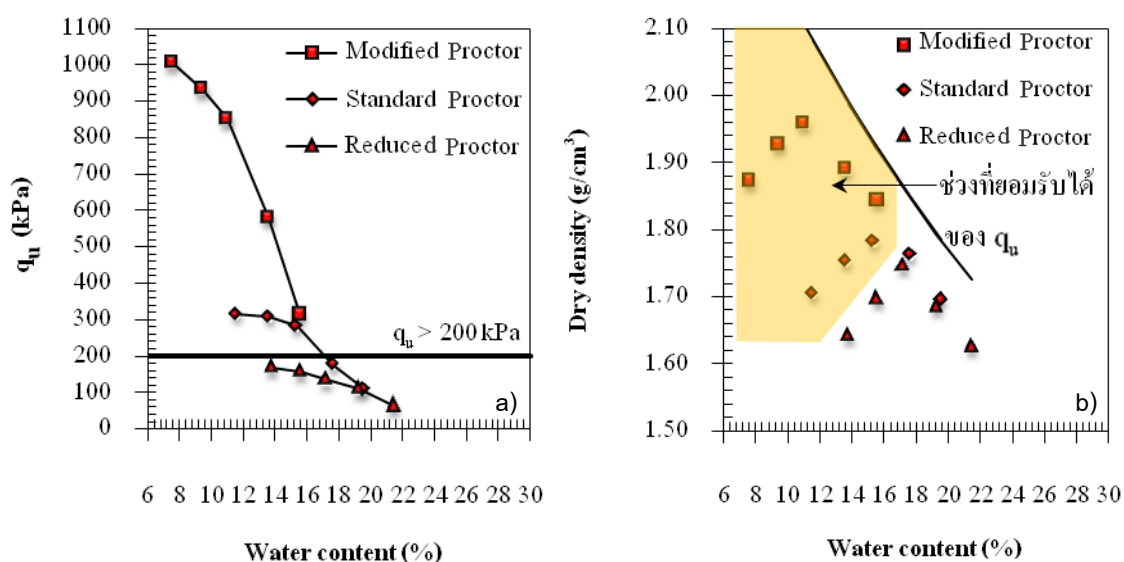
จากกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (รูปที่ 4.16 c) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดทั้งสามวิธี พบว่าจะเป็นสัญลักษณ์แบบที่บด ยกเว้นที่ความหนาแน่นแห้ง 1.642 g/cm^3 ปริมาณความชื้น 13.81% เมื่อบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน สูงกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s จึงใช้สัญลักษณ์แบบโปร่ง และรูปที่ 4.16 (d) เป็นการปรับปรุงกราฟ โดยตัดกราฟที่อยู่ทางด้านหนึ่งของ Line of optimum ออกไป เพราะจากข้อมูลการทำงานบดอัดดินในสนามส่วนใหญ่ เมื่อบดอัดดินทางด้านหนึ่งของ Optimum water content จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่า มากกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s (Benson et al., 1999)



รูปที่ 4.16 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน a) กราฟการบดอัดดินลูกกรง b) กราฟสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน c) ช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน d) ช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่ปรับปรุงแล้ว

4.3.1.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

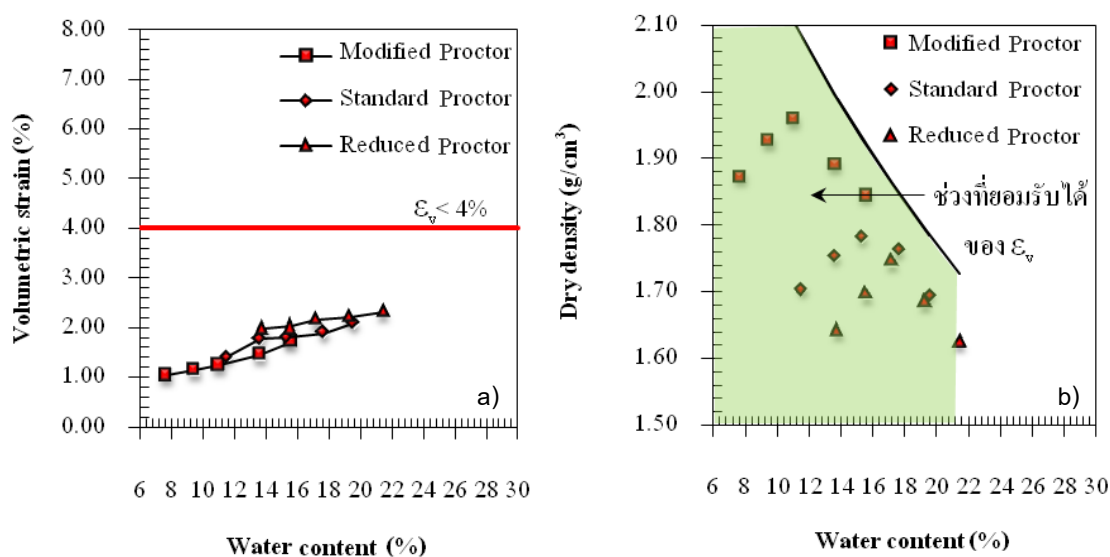
ค่ากำลังอัดแกนเดียว ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่า เมื่อบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor ทุกปริมาณความชื้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ส่วนการบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ที่ความชื้นระหว่าง 17.64%–19.55% และวิธี Reduced Proctor ทุกปริมาณความชื้น พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียว ต่ำกว่าเกณฑ์ 200 kPa (รูปที่ 4.17 a) กราฟแสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว ในกราฟบดอัด ได้แสดงในรูปที่ 4.17 b โดยใช้สัญลักษณ์แบบเดียวกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปรงสำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านเกณฑ์ แสดงในรูปที่ 4.17 (b)



รูปที่ 4.17 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว a) กราฟกำลังอัดแกนเดียว b) ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

4.3.1.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้ไม่เกิน 4% จากการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินลูกรังบดอัดทั้งสามวิธี พบว่าอยู่ในช่วง 1.00%–2.40% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ทั้งหมด (รูปที่ 4.18 a) กราฟแสดงช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร ในกราฟการบดอัด ได้แสดงในรูปที่ 4.16 a โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บัพกับตัวอย่างดินทั้งหมด

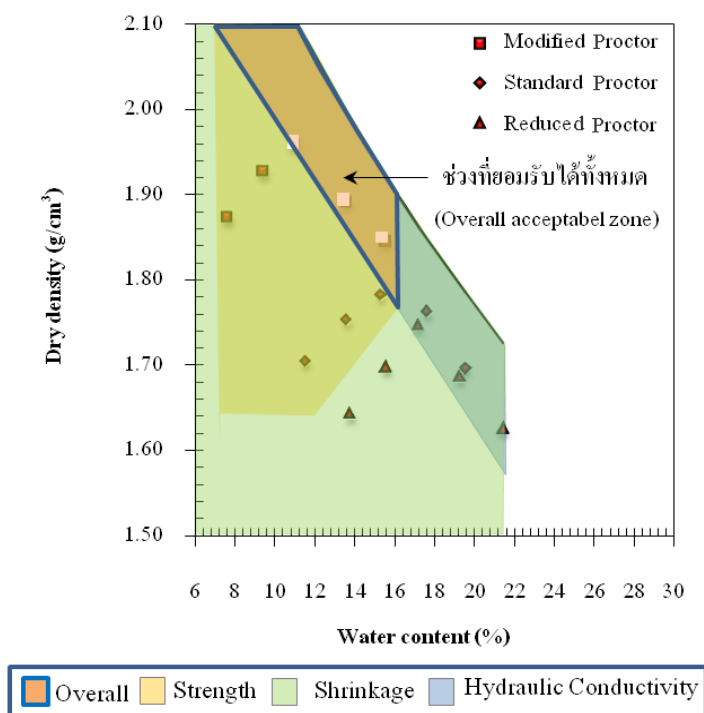


รูปที่ 4.18 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร a) กราฟการหดตัวเชิงปริมาตร b) ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

4.3.1.4 ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall Acceptable Zone)

จากการนำกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียวและช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกัน จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด นำมาประเมิน ความเหมาะสมของดินลูกรังบดอัด ได้ดังนี้ ดินลูกรังบดอัดสามารถเป็นชั้นกันซึม สำหรับสถานที่ฝังกลบได้ โดยบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor ให้ค่าความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง $1.846\text{--}1.959 \text{ g/cm}^3$ ที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 11.01%–15.55%



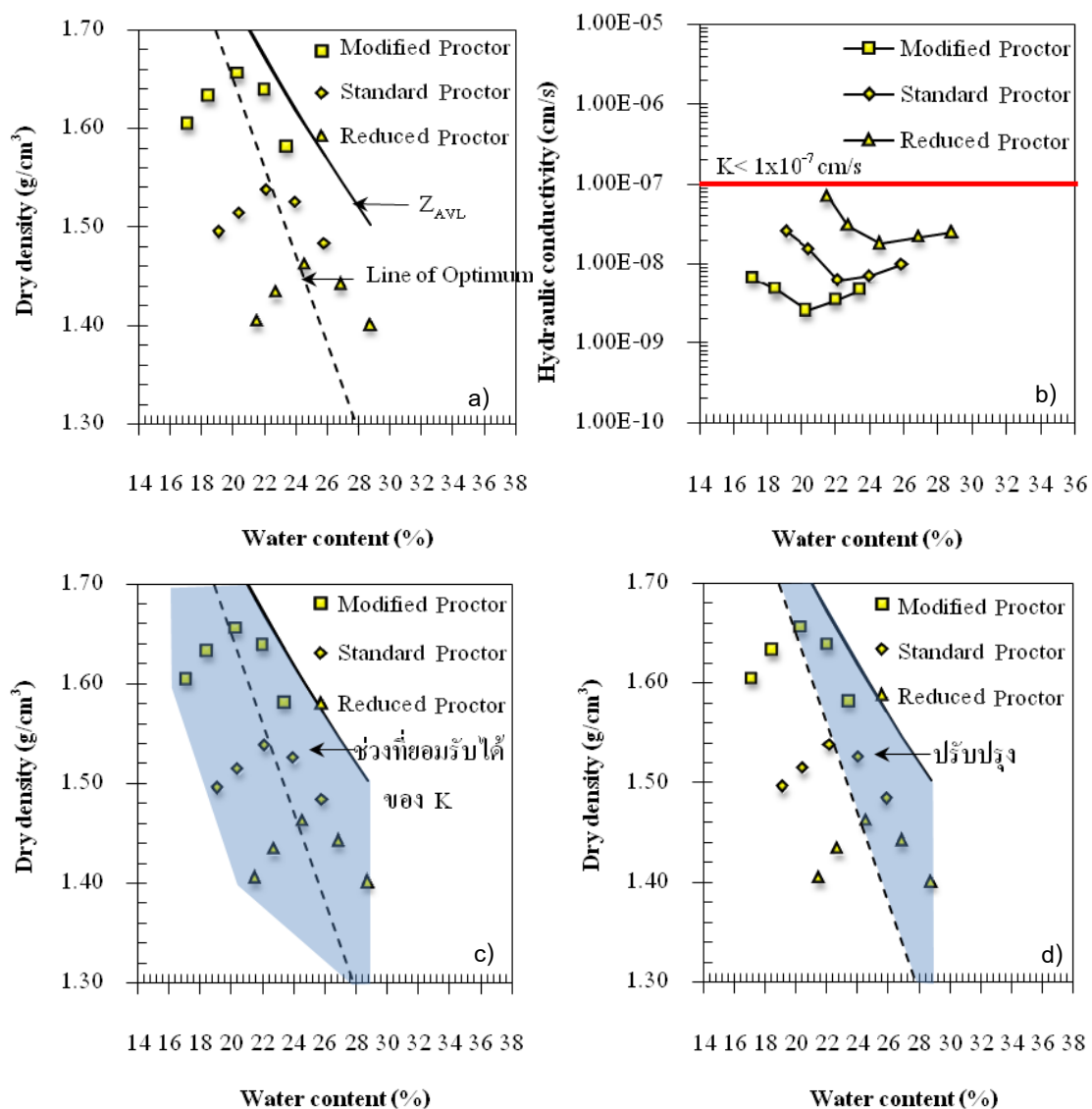
รูปที่ 4.19 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินลูกรัง

4.3.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของดินเหนียวนา

4.3.2.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวนาพบว่าเมื่อบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor ทุกปริมาณความชื้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ต่ำกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s ตามรูปที่ 4.20 (b) จากข้อมูลของกราฟการบดอัด (รูปที่ 4.20 a) จะใช้สัญลักษณ์แบบที่บัพกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์ ถูกนำมาใช้กำหนดช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (c)

จากกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (รูปที่ 4.20 c) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวนาบดอัดทั้งสามวิธีพบว่าเป็นสัญลักษณ์แบบที่บัพทั้งหมด และรูปที่ 4.20 (d) เป็นการปรับปรุงกราฟ โดยตัดกราฟที่อยู่ทางด้านหนึ่งของ Line of optimum ออกไป เพราะจากข้อมูลการทำงานบดอัดดินในสนามส่วนใหญ่ เมื่อบดอัดดินทางด้านหนึ่งของ Optimum water content จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่ามากกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s (Benson et al., 1999)

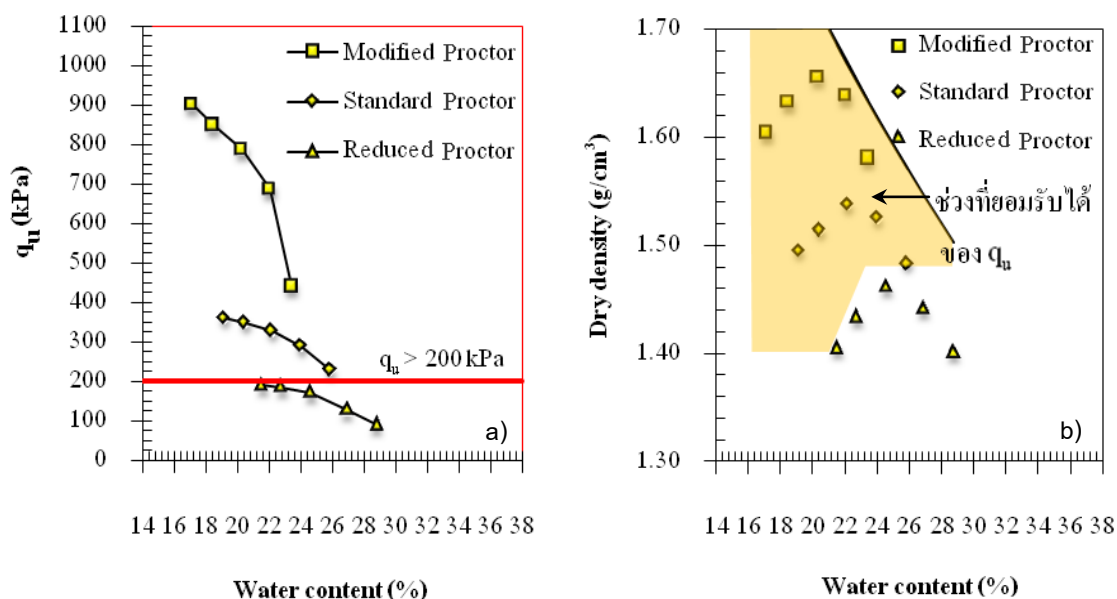


รูปที่ 4.20 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน a) กราฟการบดอัดของดินเหนียวนา b) กราฟสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน c) ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน d) ช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่ปรับปรุงแล้ว

4.3.2.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

ค่ากำลังอัดแกนเดียว ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่า เมื่อบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor และ Standard Proctor ทุกปริมาณความชื้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ส่วนการบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor

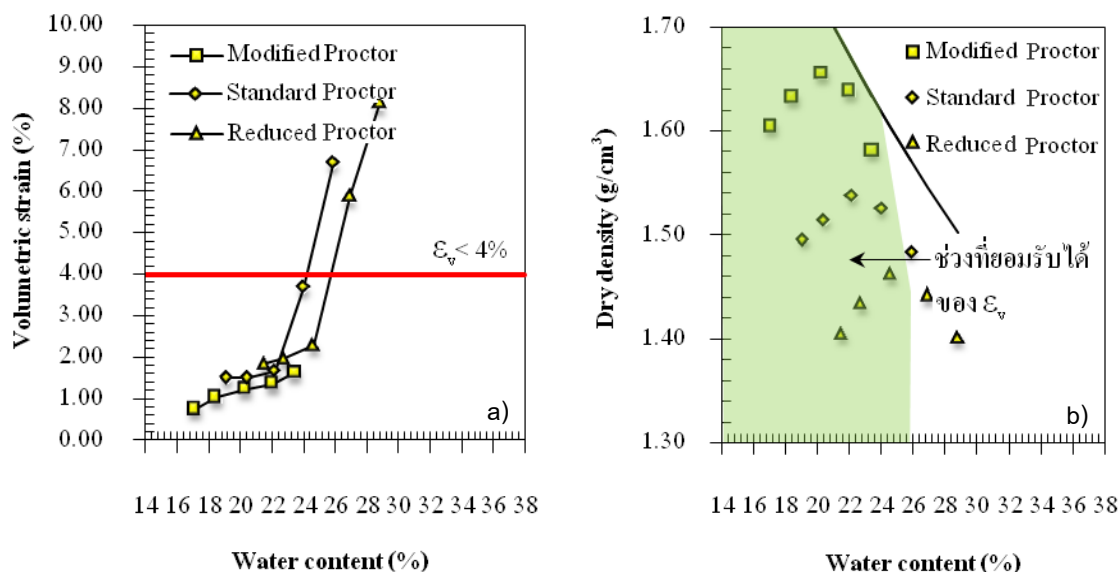
ทุกปริมาณความชื้น ค่ากำลังอัดแกนเดียว ต่ำกว่าเกณฑ์ 200 kPa (รูปที่ 4.21 a) กราฟแสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว ในกราฟบดอัด ได้แสดงในรูปที่ 4.20 a) โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บัพกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและแบบโปร่งสำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านเกณฑ์ แสดงในรูปที่ 4.21 (b)



รูปที่ 4.21 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว a) กราฟกำลังอัดแกนเดียว b) ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

4.3.2.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้ไม่เกิน 4% ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินเหนียวบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor การหดตัวเชิงปริมาตร ผ่านเกณฑ์ทุกปริมาณความชื้น เมื่อบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ที่ปริมาณความชื้น 25.87% ไม่ผ่านเกณฑ์และบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor ที่ปริมาณความชื้น 26.90%, 28.78% ไม่ผ่านเกณฑ์ (รูปที่ 4.22 a) กราฟช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร ในกราฟการบดอัดได้แสดงในรูปที่ 4.22 b) โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บัพกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์

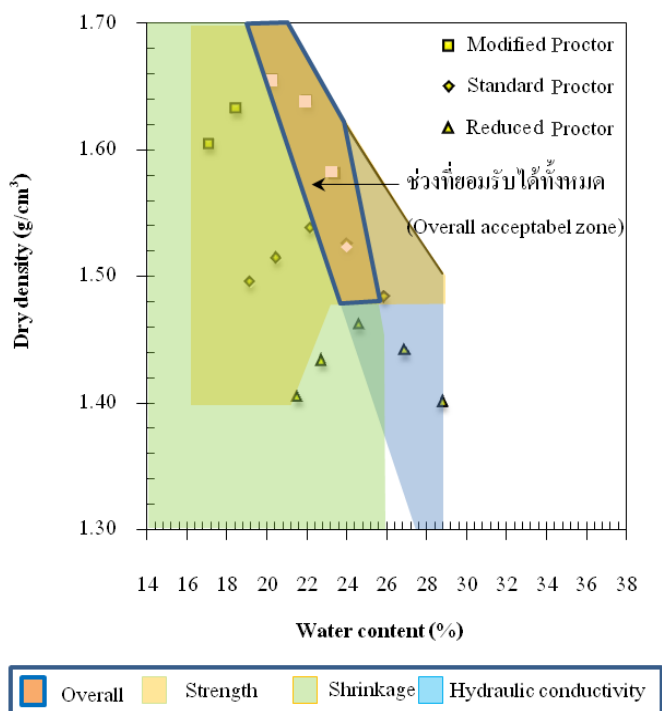


รูปที่ 4.22 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร a) กราฟการหดตัวเชิงปริมาตร
b) ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

4.3.2.4 ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall Acceptable Zone)

จากการนำกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียวและช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกัน จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.23

ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด นำมาประเมิน ความเหมาะสม ของดินเหนียวนาบอัด ได้ดังนี้ ดินเหนียวนาบอัดสามารถเป็นชั้นกันซึม สำหรับสถานที่ฝังกลบ ได้ โดยบดอัด ด้วยวิธี Modified Proctor ให้มีค่าความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง $1.581\text{--}1.655\text{ g/cm}^3$ ที่ปริมาณความชื้นระหว่าง $20.31\text{--}23.42\%$ และสามารถบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ให้มีความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง $1.525\text{ g/cm}^3\text{--}1.537\text{ g/cm}^3$ ที่ปริมาณความชื้นระหว่าง $22.19\text{--}24.03\%$



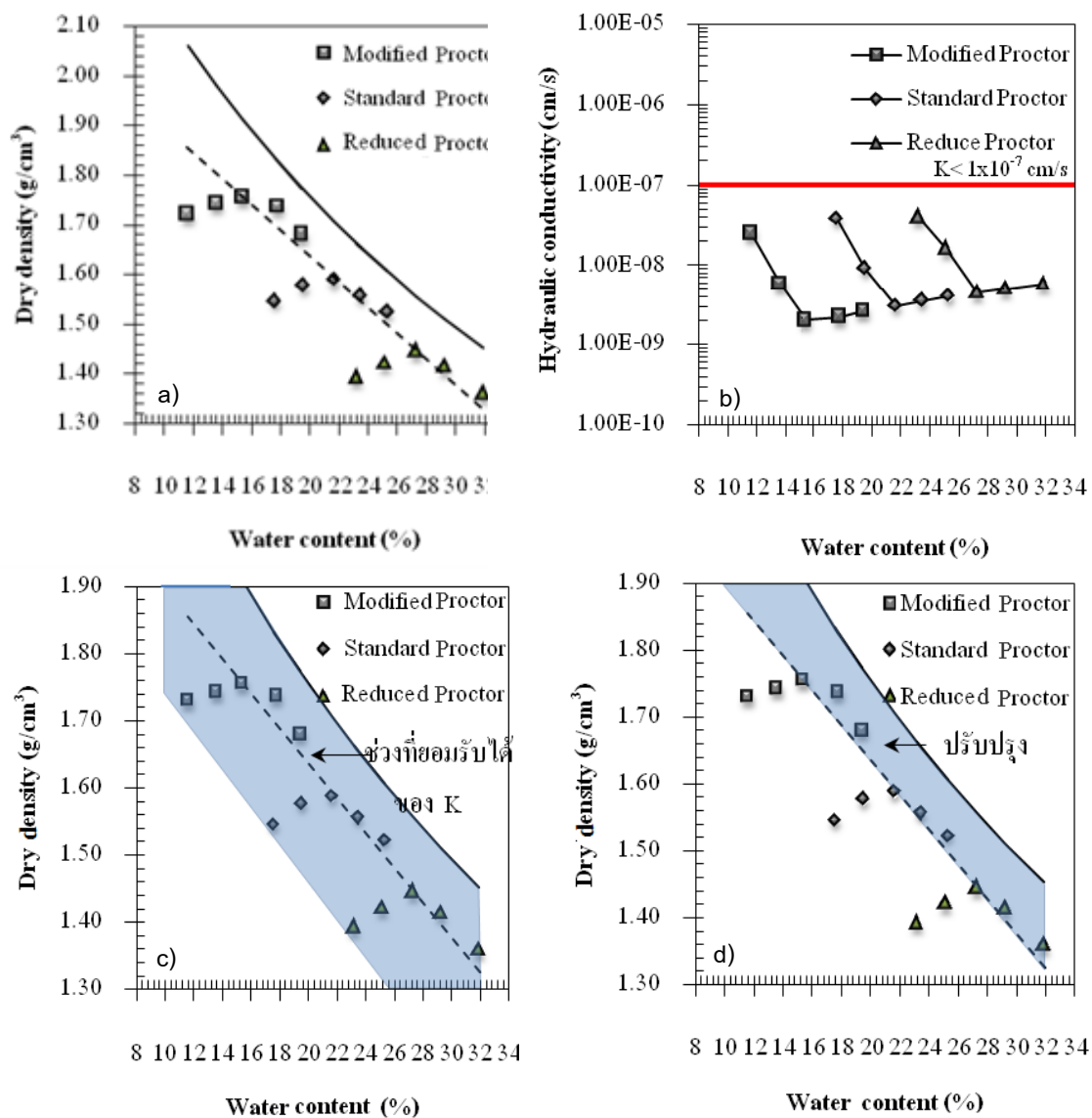
รูปที่ 4.23 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินเหนียวนา

4.3.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของดินเหนียวทะเล

4.3.3.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวทะเล พบว่าการบดอัดทั้งสามวิธี ทุกปริมาณความชื้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s ทั้งหมด ตามรูปที่ 4.24 (b) จากข้อมูลกราฟการบดอัด (รูปที่ 4.24 a) จะใช้สัญลักษณ์แบบทึบกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (c)

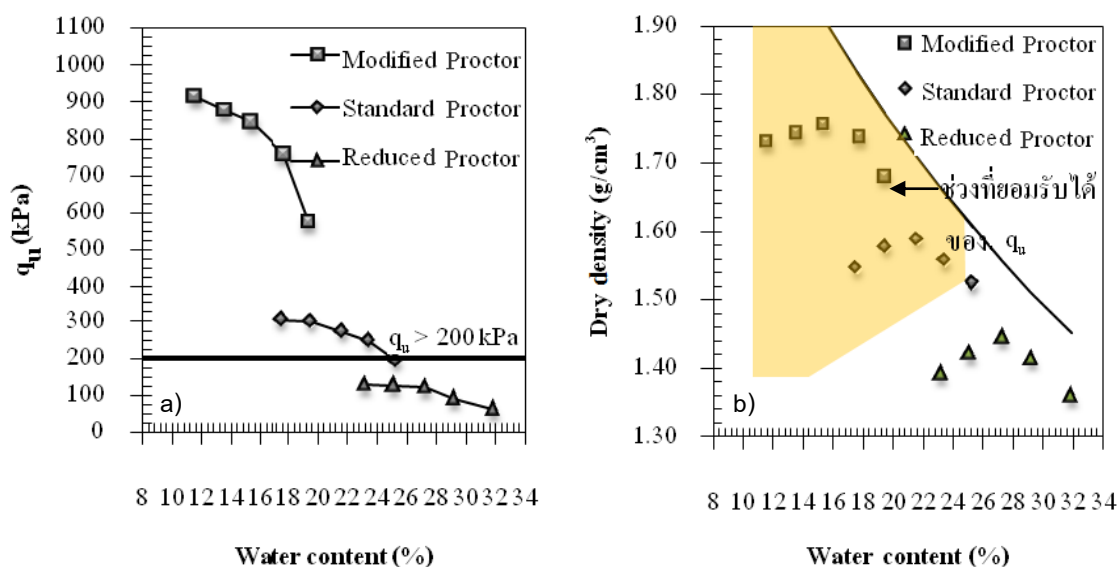
จากกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (รูปที่ 4.24 c) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินเหนียวทะเลบดอัดทั้งสามวิธี พบว่า จะเป็นสัญลักษณ์แบบทึบทั้งหมด และรูปที่ 4.24 (d) เป็นการปรับปรุงกราฟ โดยตัดกราฟที่อยู่ทางด้านหนึ่งของ Line of optimum ออกไป เพราะจากข้อมูลการทำงานบดอัดดินในสนามส่วนใหญ่ เมื่อบดอัดดินทางด้านหนึ่งของ Optimum water content จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่า มากกว่า $1 \Delta 10^{-7}$ cm/s (Benson et al., 1999)



รูปที่ 4.24 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน a) กราฟการบดอัดดินเหนียวทะเล b) กราฟสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน c) ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน d) ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่ปรับปรุงแล้ว

4.3.3.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

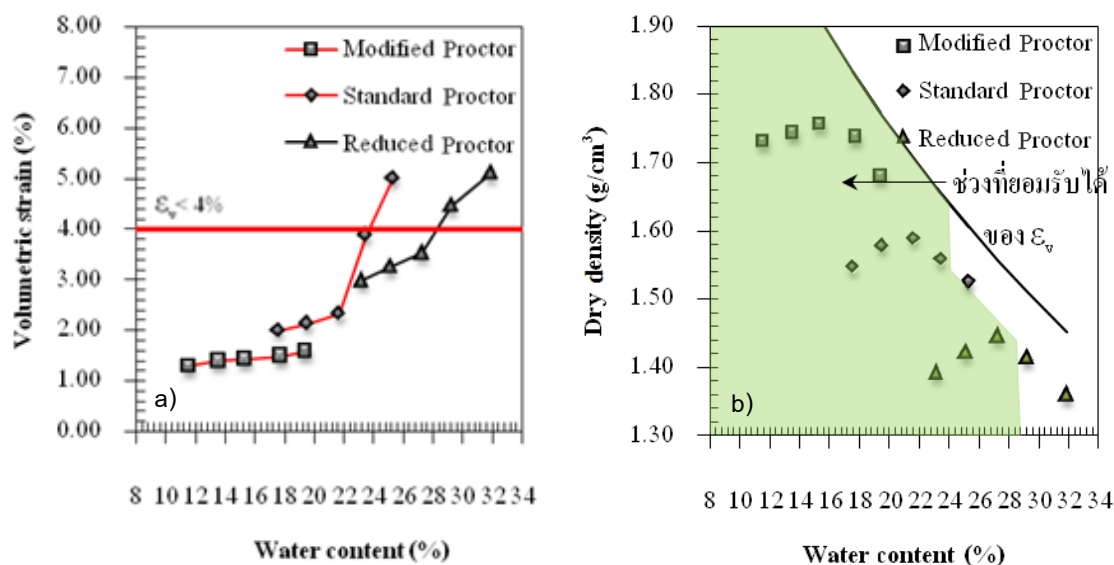
ค่ากำลังอัดแกนเดียว ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่า เมื่อบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor ทุกปริมาณความชื้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ส่วนการบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ที่ความชื้นระหว่าง 25.30% และวิธี Reduced Proctor ทุกปริมาณความชื้น ค่ากำลังอัดแกนเดียว ต่ำกว่าเกณฑ์ (รูปที่ 4.25 a) กราฟแสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว ในกราฟบดอัด ได้แสดงในรูปที่ 4.25 (b) โดยใช้สัญลักษณ์แบบทึบกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งสำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านเกณฑ์



รูปที่ 4.25 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว a) กราฟกำลังอัดแกนเดียว b) ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

4.3.3.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้ดินหดตัวได้ไม่เกิน 4% จากการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินเหนียวทะเลบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor การหดตัวเชิงปริมาตรผ่านเกณฑ์ทั้งหมด แต่บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ที่ปริมาณความชื้น 25.30% ไม่ผ่านเกณฑ์ และบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor ที่ปริมาณความชื้น 29.21%, 30.87% การหดตัวเชิงปริมาตรไม่ผ่านเกณฑ์ ตามรูปที่ 4.26 (a) กราฟแสดงช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร ในกราฟการบดอัด ได้แสดงในรูปที่ 4.24 b โดยใช้สัญลักษณ์แบบทึบกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์

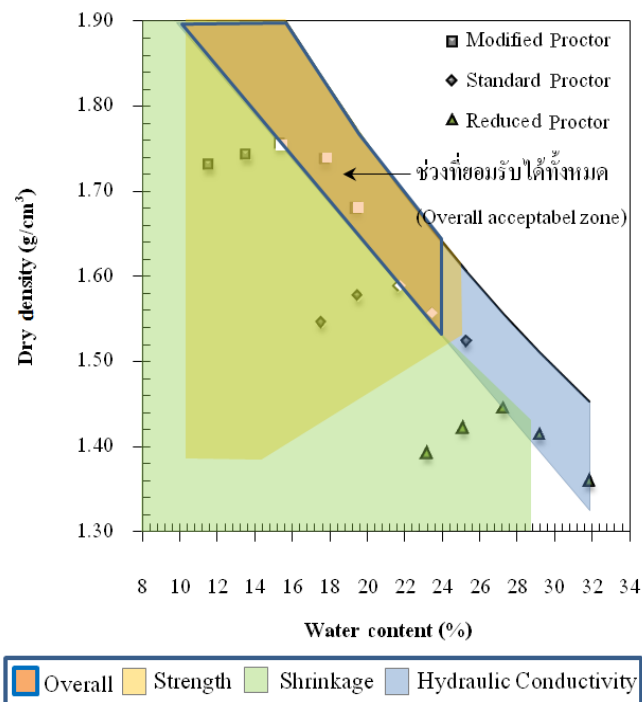


รูปที่ 4.26 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร a) กราฟการหดตัวเชิงปริมาตร
b) ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

4.3.3.4 ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด

จากการนำกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียวและช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกัน จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (รูปที่ 4.27)

ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด นำมาประเมิน ความเหมาะสม ของดินเหนียวทะเล ได้ดังนี้ ดินเหนียวทะเลบดอัดสามารถเป็นชั้นกันซึม สำหรับสถานที่ฝังกลบได้ โดยบดอัด ด้วยวิธี Modified Proctor ให้มีค่าความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง 1.680–1.755 g/cm³ ที่ ปริมาณความชื้นระหว่าง 15.37%–19.41% และบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ให้มีความหนาแน่น แห้งอยู่ระหว่าง 1.556–1.587 g/cm³ ที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 21.65%–23.46%



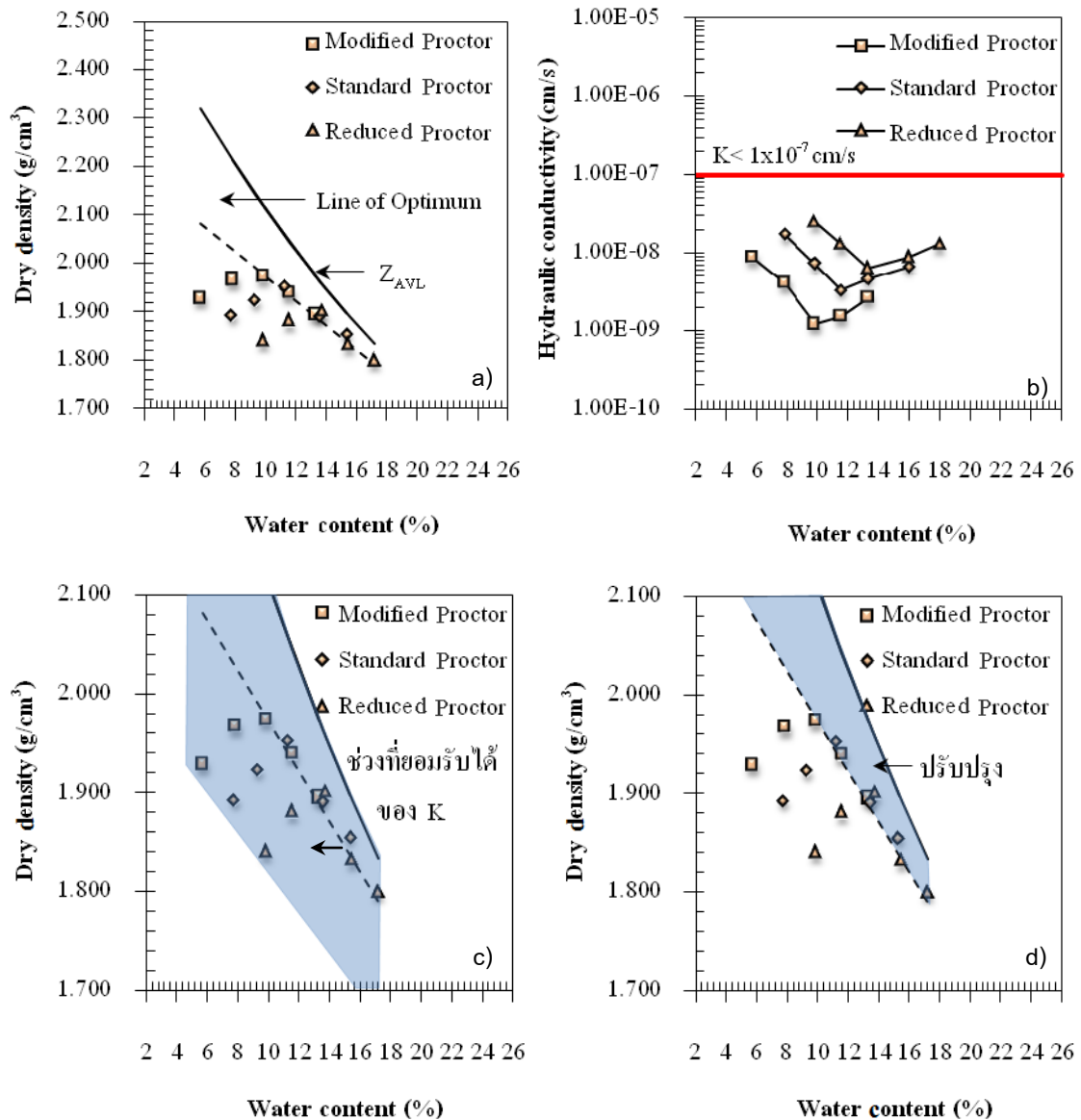
รูปที่ 4.27 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินเหนียวทะเล

4.3.4 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของทรายผสมเบนโทไนต์ 5%

4.3.4.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% พบว่าการบดอัดทั้งสามวิธี ทุกปริมาณความชื้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้ 1×10^{-7} cm/s ทั้งหมด (รูปที่ 4.28 b) จากข้อมูลของกราฟการบดอัด (รูปที่ 4.28 a) จะใช้สัญลักษณ์แบบที่บกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (c)

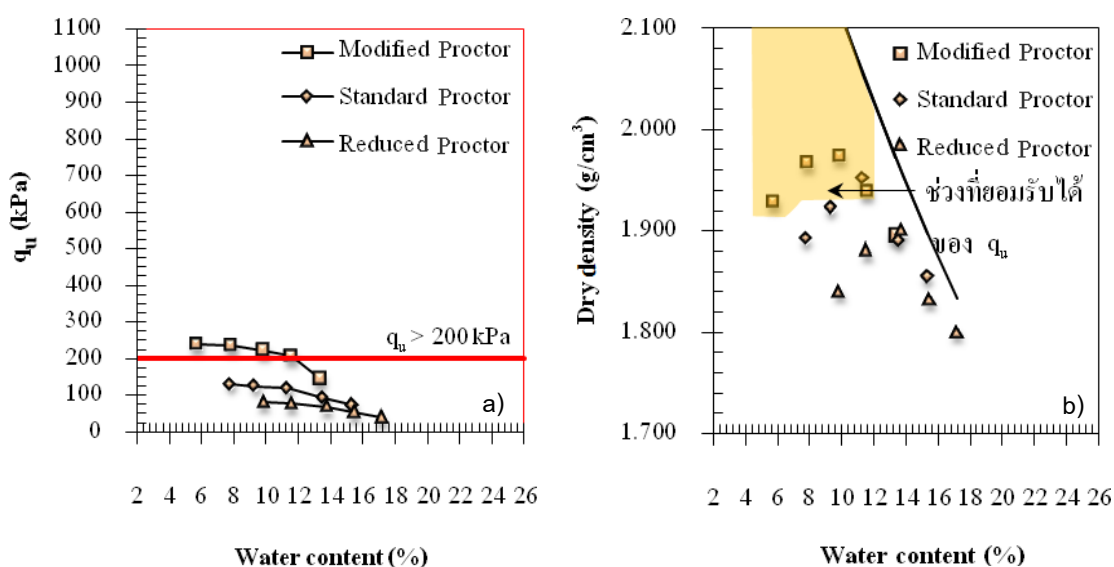
จากกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (รูปที่ 4.28 c) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% บดอัดทั้งสามวิธี จะเป็นสัญลักษณ์แบบที่บทั้งหมด และรูปที่ 4.28 (d) เป็นการปรับปรุงกราฟ โดยตัดกราฟที่อยู่ทางด้านหนึ่งของ Line of optimum ออกไป เพราะจากข้อมูลการทำงานบดอัดดินในสนามส่วนใหญ่ เมื่อบดอัดดินทางด้านหนึ่งของ Optimum water content จะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมีค่ามากกว่า 1×10^{-7} cm/s (Benson et al., 1999)



รูปที่ 4.28 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน a) กราฟการบดอัดทรายผสมเบนโทไนต์ 5% b) กราฟสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน c) ช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน d) ช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านที่ปรับปรุงแล้ว

4.3.4.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังเฉือน

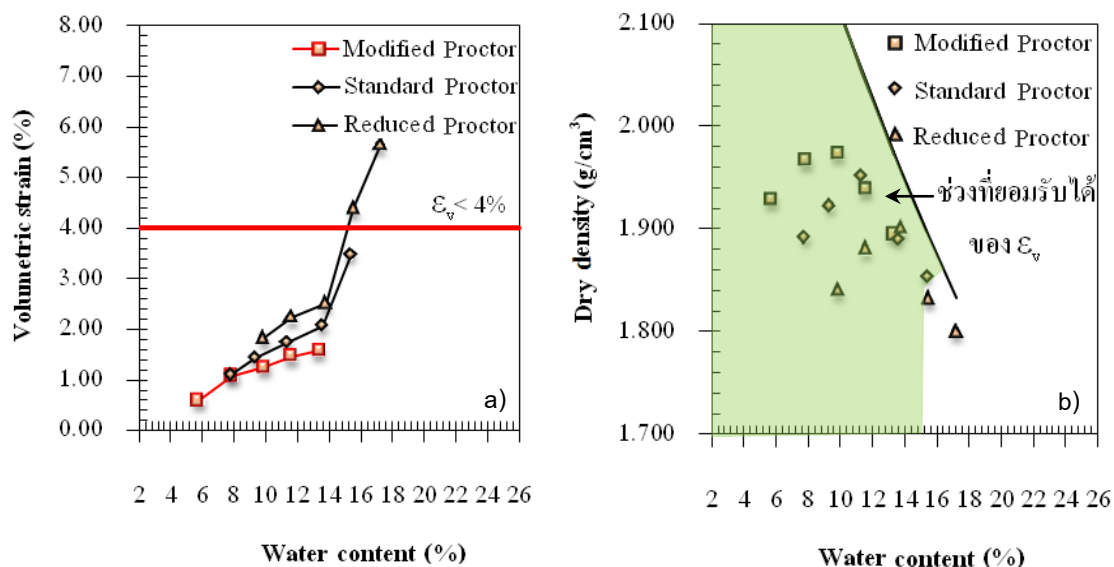
ค่ากำลังอัดแกนเดียว ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่า เมื่อบดอัดดินตัวอย่างด้วยวิธี Modified Proctor ทุกปริมาณความชื้น ค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นที่ปริมาณความชื้น 13.34% ค่ากำลังอัดแกนเดียวน้อยกว่าเกณฑ์ และบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor, Reduced Proctor ทุกปริมาณความชื้น ค่ากำลังอัดแกนเดียว ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (รูปที่ 4.29 a) กราฟแสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว ในกราฟบดอัด (รูปที่ 4.28 a) โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บัพกับตัวอย่างดินที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งสำหรับตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านเกณฑ์ แสดงในรูปที่ 4.29 b



รูปที่ 4.29 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว a) กราฟกำลังอัดแกนเดียว b) ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

4.3.4.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้ไม่เกิน 4% จากการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของทรายผสมเบนโทไนด์ 5% บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor และ Standard Proctor การหดตัวเชิงปริมาตรผ่านเกณฑ์ทุกปริมาณความชื้น แต่เมื่อบดอัดด้วยวิธี Reduce Proctor ที่ปริมาณความชื้น 15.50%, 17.20% ไม่ผ่านเกณฑ์ (รูปที่ 4.30 a) กราฟแสดงช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร ในกราฟการบดอัด ได้แสดงในรูปที่ 4.30 b) โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บัพกับตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านเกณฑ์

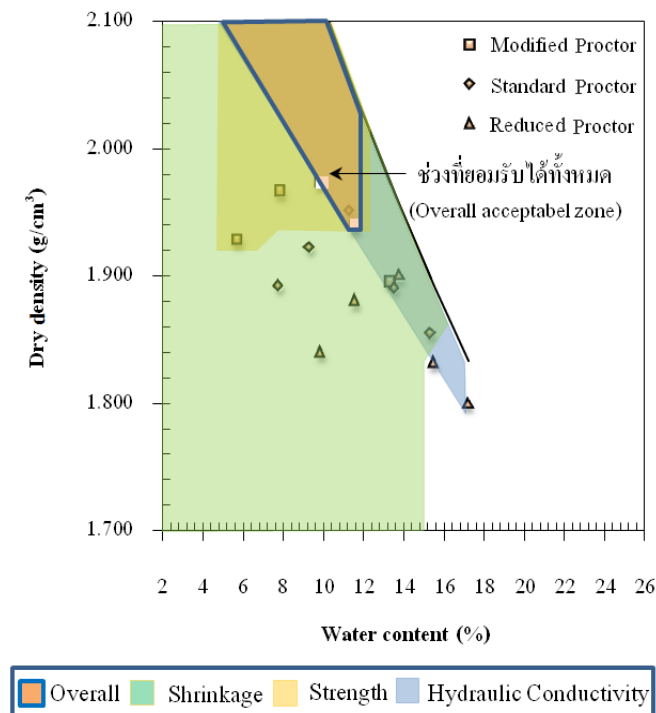


รูปที่ 4.30 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร a) กราฟการหดตัวเชิงปริมาตร
b) ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร

4.3.5 ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall Acceptable Zone)

จากการนำกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังเฉือนและช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกัน จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.31

ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด นำมาประเมิน ความเหมาะสมของทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ได้ดังนี้ ทรายผสมเบนโทไนต์ 5% สามารถเป็นบดอัดชั้นกันซึม สำหรับสถานที่ฝังกลบได้ โดยบดอัด ด้วยวิธี Modified Proctor ให้มีค่าความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง 1.938 g/cm^3 – 1.973 g/cm^3 ที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 9.88%–11.59%



รูปที่ 4.31 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของทรายผสมเบนโทไนต์ 5%

4.3.6 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของดินตัวอย่าง

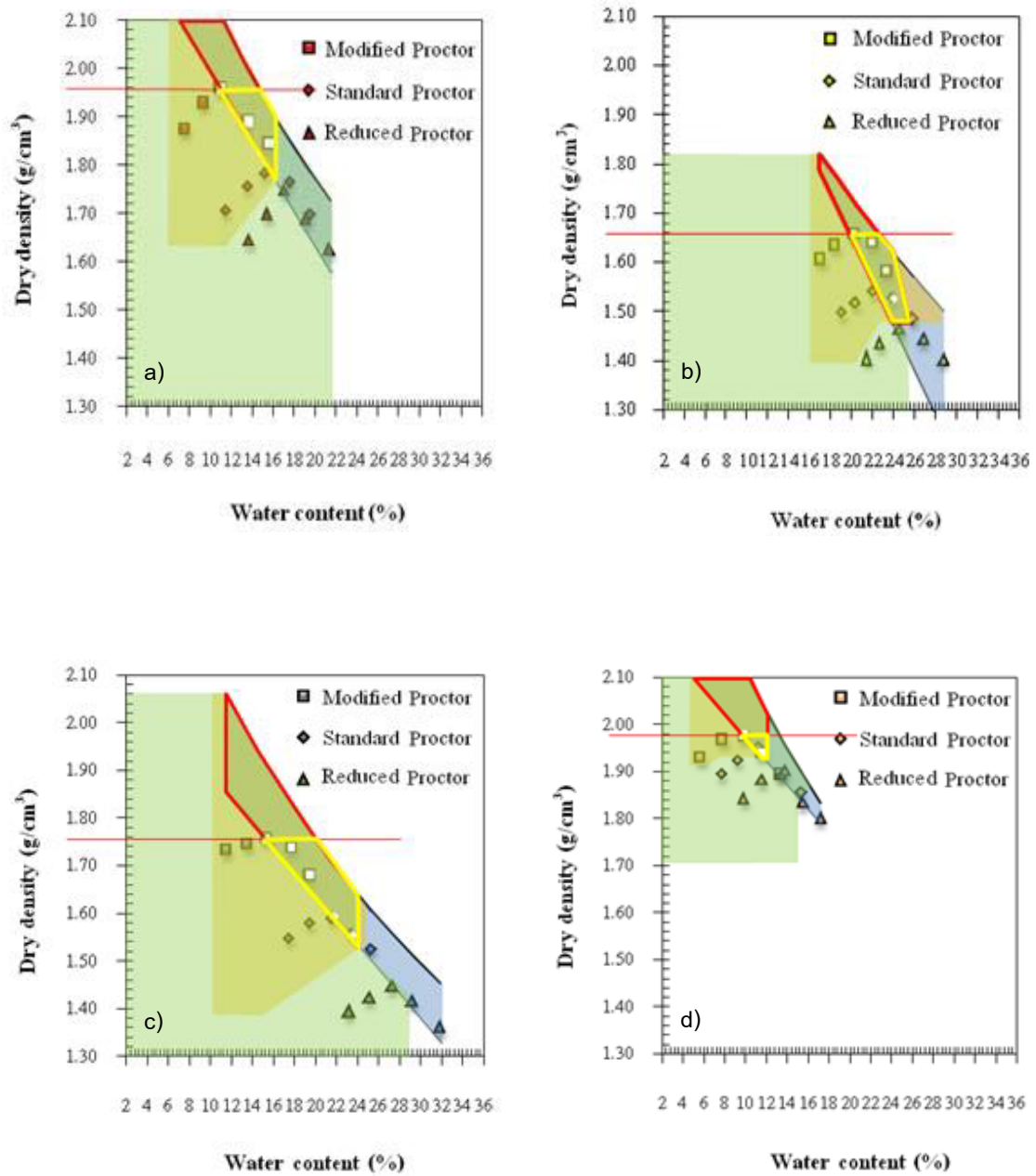
การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบพบว่าทรายผสมเบนโทไนต์ 5% ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเลและดินเหนียวนา สามารถประเมินผ่านเป็นชั้นกันซึมดินบดอัดทั้งหมด หากพิจารณาเรียงตามลำดับความเหมาะสมจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด สามารถพิจารณาได้จากพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) ที่จะสร้างขึ้นใหม่โดยปรับ scale ของความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของดินทั้ง 4 ชนิดให้เป็นขนาดเดียวกันคือค่าความหนาแน่นแห้งเริ่มจาก 1.30 g/cm^3 ถึง 2.10 g/cm^3 (แกน y) และปริมาณความชื้น เริ่มจาก 2% ถึง 36% (แกน x)

จากพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินตัวอย่างแต่ละชนิด โดยได้ทำการหาพื้นที่ยอมรับได้ใหม่ (พื้นที่ เส้นขอบสีเหลือง) โดยพื้นที่ใหม่ดังกล่าว จะแตกต่างจากพื้นที่ที่ยอมรับได้เดิมที่ขอบเขตบน โดยลากเส้นแสดงขอบบนของพื้นที่ที่จะสร้างใหม่ ให้สัมผัสกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของกราฟบดอัด ที่บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor (เส้นสีแดงขนาดกับแกน x) ให้ตัดผ่านพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด โดยเส้นนี้จะทำหน้าที่เป็นขอบเขตบน (ใหม่) โดยขอบเขตบนดังกล่าวตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า ในทางปฏิบัติค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่

ได้จากการบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor ควรเป็นค่าสูงสุดที่บดอัดได้ในโดยพื้นที่ใหม่ (เส้นสีเหลือง) ที่นำมาเปรียบเทียบขนาดกัน หากมีขนาดใหญ่ จะครอบคลุมช่วงความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นมาก ทำให้สามารถทำงานได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย จึงมีความเหมาะสมเป็นชั้นกันซึมดินบดอัดมากที่สุด

นำพื้นที่ใหม่ (เส้นสีเหลือง) ของรูปที่ 4.32 a, 4.32 b, 4.32 c, 4.32 d ไปคำนวณหาพื้นที่โดยใช้โปรแกรม AutoCAD ได้ขนาดพื้นที่เรียงตามลำดับจากพื้นที่มากไปหาน้อยเป็นดังนี้ ดินเหนียวทะเล เท่ากับ 25.50 หน่วย ดินเหนียวนา เท่ากับ 16.33 หน่วย ดินลูกรัง เท่ากับ 15.50 หน่วย และทรายผสมเบนโทไนต์ 5% เท่ากับ 2.4 หน่วย

ผลของการจัดลำดับดินที่เหมาะสมสำหรับเป็นชั้นกันซึมดินบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบเรียงตามลำดับ ได้ดังนี้ 1) ดินเหนียวทะเล 2) ดินเหนียวนา 3) ดินลูกรัง 4) ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%



รูปที่ 4.32 การปรับปรุงพื้นที่เพื่อจัดลำดับความเหมาะสม a) พื้นที่ของดินลูกรัง b) พื้นที่ของดินเหนียวนา c) พื้นที่ของดินเหนียวทะเล d) พื้นที่ของทรายผสมเบนโทไนต์ 5%

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมและการประเมินความเหมาะสมของดินตัวอย่างสามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 การบดอัดดิน ด้วยวิธี Modified Proctor Standard Proctor และ Reduced Proctor พบว่าทรายผสมเบนโทไนต์ 5% มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด สูงที่สุด ดินเหนียวนา มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ต่ำที่สุด แต่การบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor ดินเหนียวทะเล จะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ต่ำที่สุด แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นสูงสุด ต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด

ดินตัวอย่าง		Compaction		
		MP	SP	RP
ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%	$\psi_{d \max}$ (g/cm ³)	1.973–1.895	1.951–1.855	1.900–1.800
	w_{opt} (%)	5.75–13.34	7.81–15.34	9.98–17.20
ดินลูกรัง	$\psi_{d \max}$ (g/cm ³)	1.959–1.846	1.781–1.695	1.746–1.626
	w_{opt} (%)	7.65–15.55	11.56–19.55	13.81–21.44
ดินเหนียวทะเล	$\psi_{d \max}$ (g/cm ³)	1.755–1.680	1.587–1.523	1.440–1.359
	w_{opt} (%)	11.57–19.41	17.57–25.30	23.19–31.87
ดินเหนียวนา	$\psi_{d \max}$ (g/cm ³)	1.655–1.581	1.537–1.484	1.462–1.401
	w_{opt} (%)	17.14–23.42	19.17–25.87	21.55–28.78

หมายเหตุ MP = Modified Proctor, SP = Standard Proctor, RP = Reduced Proctor

5.1.2 สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ดินตัวอย่างบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor Standard Proctor และ Reduced Proctor ส่วนใหญ่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ต่ำกว่า $1.00 \Delta 10^{-7}$ cm/s ยกเว้นดินลูกรังบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor ที่ปริมาณความชื้น 13.81% ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านเท่ากับ $2.17 \Delta 10^{-7}$ cm/s ซึ่งสูงกว่า $1.00 \Delta 10^{-7}$ cm/s แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน สูงสุด ต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด

ดินตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (cm/s)		
	MP	SP	RP
ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%	8.60E-09–1.20E-09	1.70E-08–3.30E-09	2.50E-08–6.46E-09
ดินลูกรัง	5.00E-08–1.80E-09	7.80E-08–7.40E-09	2.17E-07–2.11E-08
ดินเหนียวทะเล	2.50E-08–2.00E-09	3.80E-08–3.00E-09	4.00E-08–4.50E-09
ดินเหนียวนา	6.50E-09–2.50E-09	2.50E-08–6.24E-09	7.00E-08–1.80E-08

หมายเหตุ MP = Modified Proctor, SP = Standard Proctor, RP = Reduced Proctor

5.1.3 กำลังอัดแกนเดียว เมื่อบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor ดินตัวอย่างส่วนใหญ่มีกำลังอัดแกนเดียวกว่า 200 kPa ยกเว้นทรายผสมเบนโทไนต์ 5% บางส่วน การบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ดินเหนียวนามีกำลังอัดแกนเดียวกว่า 200 kPa ส่วนดินลูกรัง ดินเหนียวทะเลที่ปริมาณความชื้นสูง จะมีกำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่า 200 kPa สำหรับทรายผสมเบนโทไนต์ 5% กำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่า 200 kPa และการบดอัดด้วยวิธี Reduced Proctor ดินตัวอย่างทั้งหมด กำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่า 200 kPa แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 กำลังอัดแกนเดียวสูงสุด ต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด

ดินตัวอย่าง	กำลังอัดแกนเดียว (kPa)		
	MP	SP	RP
ทรายผสมเบนโทไนต์ 5%	243.21–147.11	130.04–73.55	80.42–41.19
ดินลูกรัง	1010.12–315.79	313.82–106.90	168.68–66.69
ดินเหนียวทะเล	912.05–578.61	302.06–192.22	129.45–63.75
ดินเหนียวนา	902.24–433.47	354.03–228.50	188.29–93.17

หมายเหตุ MP = Modified Proctor, SP = Standard Proctor, RP = Reduced Proctor

5.1.4 การหัดตัวเชิงปริมาตร เมื่อบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor ดินตัวอย่างทั้งหมด มีการหัดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่า 4% การบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor ทราศผสมเบนโทไนด์ 5% และดินลูกรัง มีการหัดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่า 4% ส่วนดินเหนียวทะเลและดินเหนียวนา ที่ปริมาณความชื้นสูง การหัดตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 4% และการบดอัดดินด้วยวิธี Reduced Proctor การหัดตัวเชิงปริมาตรของดินลูกรังน้อยกว่า 4% ส่วนทราศผสมเบนโทไนด์ 5% ดินเหนียวทะเล และดินเหนียวนา ที่ปริมาณความชื้นสูง การหัดตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 4% แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การหัดตัวเชิงปริมาตรสูงสุด ต่ำสุดของดินตัวอย่างบดอัด

ดินตัวอย่าง	การหัดตัวเชิงปริมาตร (%)		
	MP	SP	RP
ทราศผสมเบนโทไนด์ 5%	0.605–1.582	1.103–3.463	1.844–5.635
ดินลูกรัง	1.044–1.712	1.422–2.083	1.985–2.320
ดินเหนียวทะเล	1.292–1.585	1.922–4.996	2.983–5.100
ดินเหนียวนา	0.749–1.616	1.494–6.662	1.852–8.109

หมายเหตุ MP = Modified Proctor, SP = Standard Proctor, RP = Reduced Proctor

5.1.5 การประเมินความเหมาะสมของดินบดอัด สำหรับชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบพิจารณาบริเวณที่ซ้อนทับของช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน กำลังอัดแกนเดียวและการหัดตัวเชิงปริมาตร จะได้พื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ซึ่งครอบคลุมการซึมผ่านกำลังต้านทานแรงเฉือนและการหัดตัวของดิน จากการประเมินความเหมาะสมของดินตัวอย่างบดอัดพบว่า ดินลูกรัง ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ทราศผสมเบนโทไนด์ 5% ผ่านการประเมินและเหมาะสมเป็นชั้นกันซึมดินบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบ ทั้งหมด

5.1.6 การจัดลำดับความเหมาะสมของดินตัวอย่าง พิจารณาจากพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด พื้นที่ที่มีขนาดใหญ่จะมีช่วงของความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นกว้าง ทำให้สามารถทำงานง่าย สะดวกและประหยัด โดยใช้พลังงานบดอัดไม่สูงมาก เพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่ต้องการ ดินที่เหมาะสมเป็นชั้นกันซึมดินบดอัด เรียงตามลำดับความเหมาะสมได้ ดังนี้ 1) ดินเหนียวทะเล 2) ดินเหนียวนา 3) ดินลูกรัง และ 4) ทราศผสมเบนโทไนด์ 5%

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อสังเกต อุปสรรคและแนวทางแก้ไขจากงานวิจัยดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน กระทำโดยใช้น้ำกลั่นเพียงอย่างเดียว ซึ่งในความเป็นจริงน้ำชะมูลฝอยจากบ่อฝังกลบมีส่วนประกอบมากมายหลากหลายชนิดปะปนกันอาจจะเป็นผลให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำกลั่น ดังนั้นควรศึกษาควกับน้ำชะมูลฝอยที่นำมาจากบ่อฝังกลบประกอบด้วย

2. วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด อาจจะมีผลกระทบจากปัจจัยอื่นนอกเหนือจากปริมาณเบนโทไนต์ที่เหมาะสม เช่น ขนาดละเอียดของทราย ของเหลวที่ใช้ทดสอบนอกจากน้ำกลั่น เป็นต้น โดยศึกษาเพิ่มเติมเพื่อค้นหาสภาพของวัสดุผสมที่มีอยู่ในท้องถิ่นๆ เพื่อที่จะนำไปประยุกต์กับการใช้งานต่อไป นอกจากนั้น พบว่า การใช้ค่ากำลังอัดแกนเดียว เพื่อประเมินความเหมาะสมของค่ากำลังเฉือนอาจไม่เหมาะสมเนื่องจากทรายผสมเบนโทไนต์อาจไม่ยึดติดกันเป็นชั้นทดสอบ (Specimen) ทำให้ผลทดสอบไม่ผ่าน

3. ดินเหนียวทะเล แม้จะมีคุณสมบัติเหมาะสม สำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดมากที่สุด (พื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดใหญ่ที่สุด) อย่างไรก็ตามดินเหนียวทะเลมีปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ อยู่ในเนื้อดินสูงมาก หากทำเป็นชั้นกันซึมดินบดอัด อาจทำให้แคลเซียมคลอไรด์ถูกชะออกมากจากเนื้อดิน ทำให้เกิดปัญหาความเค็มหรือกร่อยของแหล่งน้ำได้

4. การศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการนำดินในท้องถิ่นของจังหวัดสงขลาเป็นหลัก ควรนำดินจากบริเวณใกล้เคียงที่แตกต่างจากดินตัวอย่างข้างต้น นำมาศึกษาเพิ่มเติม

5. ประยุกต์ใช้วัสดุอื่นนอกเหนือจากใช้เบนโทไนต์ เช่น เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ขี้เถ้าจาก ไม้ยางพารา ตะกรันจากของเสีย ผสมกับวัสดุที่ไม่มีความทึบน้ำด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมบดอัด

6. การบดอัดดินเหนียวให้มีความหนาแน่นตามต้องการ ด้วยวิธี Modified Proctor หากนำไปใช้จริงในงาน อาจประสบปัญหาการบดอัดซึ่งมีความยากลำบากพอสมควร ดังนั้นจึงควรหาสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียว ให้สามารถบดอัดได้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีบดอัดที่ต่ำกว่าวิธีบดอัดแบบ Modified Proctor เป็นหลัก

บรรณานุกรม

- โกวิทย์ ทศศิริ. 2544. “คุณสมบัติการไหลซึมของของไหลที่มีสารปนเปื้อนผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2544. *เกณฑ์ มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอย*. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- พัฒนาที่ดิน, กรม 2554 “แนวทางการจัดการ ดินภาคใต้” ส่วนมาตรฐานการสำรวจจำแนกดินและที่ดิน (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก http://osl101.ddd.go.th/soilgr_man/south/m_sng_soils.htm [5 มกราคม 2554]
- ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. 2544. *ปฏิพิภพศาสตร์*. พิมพ์ครั้งที่ 7. ขอนแก่น : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนกฤษณ์ ทิพย์มนตรี. 2552. “ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านในดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์”, วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาโยธา ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ชนิด เถลิมนานนท์. 2550. *ธรณีเทคนิคของของเสีย*. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นันทนิตย์ เจริญไธสง. 2549. “ศักยภาพของการใช้ทรายผสมเบนโทไนท์และดินเหนียวสงขลาเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอย”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- นิตา รัตนดิถ ภูเก็ต. 2008. “คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมจากตะกอนในการผลิตน้ำประปา ถ้ำลอยจากถ่านหินและเบนโทไนท์ สำหรับใช้เป็นวัสดุกันซึมทางเลือกในหลุมฝังกลบขยะ”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ภริส เจนวิฑะเวชกุล. 2543. “การปรับปรุงคุณภาพวัสดุกันซึมดินเหนียวบดอัดผสมปูนขาวและถ้ำลอย”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- สรินทร ลีนปนาทร 2553. “ดินเบนโทไนต์”, สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ออนไลน์) เข้าถึงได้จาก : <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/June/radio6-2.htm> [10 ตุลาคม 2553]

- อภิชัย จุฑาศิริวงศ์. 2546. “สภาพทางธรณีและลักษณะของชั้นดินในบริเวณภาคใต้”. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรรถพล สังข์อริยกุล. 2542. “การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำระหว่างทรายกับแร่เพอร์ไลต์”, วิทยานิพนธ์ประกาศนียบัตรบัณฑิต ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Amer, A. AL–Rawas., Yahia, E.–A. Mohamedzein., Abdulaziz, S. AL–Shabibi. and Salem, AL – KatheiriI., 2005. “Sand – Attapulgate Clay Mixture as a Landfill Liner”. *Geotechnical and Geological Engineering.*, 24 : 1365 – 1383.
- Benson, C. H., Daniel, D. E. and Boutwell, G. P., 1999. “Field Performance of Compacted Clay Liners”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering.*, ASCE, 25(5): 390 – 403.
- Casagrande, A. 1948. “Classification and Identification of Soils”. *Transaction.*, ASCE, 113: P 901 – 930.
- Chalermyanont, T. and Arrykul, S. 2005. “Compacted sand – bentonite mixtures for hydraulic containment liners”. *Songklanakarinn J. Sci. Technol.*, 27(2):. 313 – 323.
- Daniel, D. E. and Benson, C. H. 1990. “Water Content – Density Criteria for Compacted Soil Liners”. *Journal of Geotechnical Engineering.*, ASCE, 116(12): 1811 – 1830.
- Daniel, D. E. and Wu, Y. K. 1993. “Compacted Clay Liners and Cover for Arid Sites”. *Journal of Geotechnical Engineering.*, ASCE, 119(2): 223 – 237.
- Doi, y. and Imaizumi, S., 2002. “Evaluation of Permeability of Compacted Pit Sand Mixed with Bentonite Using Flexible-Wall Permeameter” 2 nd Asian-Pacific Landfill Symposium, Seoul, Korea, pp. 240-246
- Garcia, – Bengochea, I., C., Lovell and Altschaeffl. 1979 “Pore distribution and permeability of silty clays”. *Journal of Geotechnical Engineering.*, ASCE, 105(7): 839 – 856.
- Grim, R.E. 1968. *Clay mineralogy*, 2nd ed, New York, McGraw – Hill.
- Kenny, T. C. van, W.A. Swallow, M. A. and Sungaila, M.A. 1992. “Hydraulic conductivity of compacted sand- bentonite mixtures”. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 364-374
- Odom, I. E. 1984 “Smectite clay minerals; Properties and uses” *Philos, Trans. R. Soc. London. Ser. A* 311: 391-409

- Osinubi, K.J. and Nwaiwu, Charles. M.O. 2006. "Design of Compacted Lateritic Soil Liners and Covers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(2):203-213.
- Qian, X., Koerner, R. M. and Gray, D. H. 2002. *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*, New Jersey, Prentice Hall.
- Sadek, S. Ghanimeh, S. and El – Fadel, M. 2006. "Predicted performance of clay – barrier landfill covers in arid and semi – arid environments". *Waste Management*, 27: 572 – 583.
- Tay, Y.Y., Stewart, D.I., Cousens, T.W. 2001. "Shrinkage and desiccation Cracking in bentonite – sand landfill liners". *Engineering Geology*, 60: 263 – 274
- U.S. Department of the Navy. 1982. "Foundation and Earth Structures", NAVFAC DM-7.2, Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, VA
- Yucel, Guney, Savas, Koparal. and Ahmet, H., Aydilek.2008. "Sepiolite as an Alternative Liner Material in Municipal Solid Waste Landfills". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 134(8):1166-1180

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

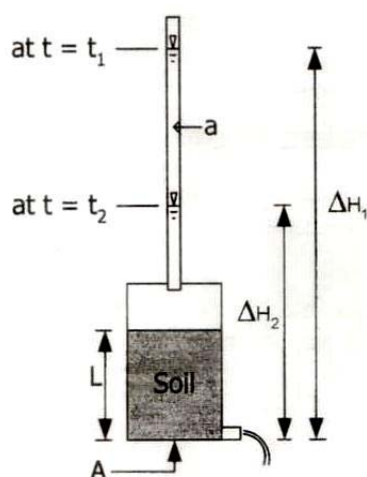
ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน
(Hydraulic Conductivity)

ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (k)

ดินเหนียวนา (Paddy Clay) บดอัดใน Mold มีขนาดความสูงของตัวอย่างดิน (L) = 11.65 cm มีพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน (A) = 82.80 cm² นำตัวอย่างดินที่บดอัดแล้ว ไปทดสอบ Permeability Test แบบค่าความดันแปร (Falling head test) ซึ่งเหมาะสมกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ เช่น ดินเหนียว ด้วยความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) เท่ากับ 200 cm กำหนดให้ head Different ณ เวลา $t_1 = 190.4$ cm และ $t_2 = 188.3$ cm พื้นที่หน้าตัดของ Standpipe (a) = 0.28 cm² จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่า K ตามสมการ ได้ดังนี้

$$K = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$$

เมื่อ	K	=	สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน	(cm/s)
	a	=	พื้นที่หน้าตัดของ Standpipe	(cm ²)
	h	=	ความสูงของตัวอย่างดิน	(cm)
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน	(cm ²)
	Δt	=	ผลต่างของเวลา $t_1 - t_2$	(sec)
	$\Delta H_1, \Delta H_2$	=	ผลต่างของระดับน้ำที่ต้นน้ำและท้ายน้ำ ณ เวลา t_1 และ t_2	(cm)



รูปที่ ก.1 การทดสอบ Permeability Test แบบความดันแปรเปลี่ยน
(ที่มา: ธนิต, 2550)

แทนค่า

$$K = \frac{(0.28 \text{ cm}^2 \times 11.65 \text{ cm})}{\left[82.80 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ d} \times \frac{24 \text{ hr}}{1 \text{ d}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right]} \ln \left[\frac{190.4 \text{ cm}}{188.3 \text{ cm}} \right]$$

$$= 5.057 \Delta 10^{-7} \text{ cm/s}$$

ดังนั้นค่า K ของดินเหนียวนา มีค่าเท่ากับ $5.057 \Delta 10^{-7} \text{ cm/s}$

ภาคผนวก. ข

ตัวอย่างการคำนวณการหดตัวเชิงปริมาตร
(Volumetric Strain)

ตัวอย่างการคำนวณการหดตัวเชิงปริมาตร

ดินเหนียวนาถูกดันออกจาก Mold วัดขนาดความสูงของตัวอย่างดินเฉลี่ยเท่ากับ 11.65 cm มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 10.26 cm วางไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 27° C วัดขนาดหาการเปลี่ยนแปลงทุกๆ 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน ความสูงของตัวอย่างดินเฉลี่ยเท่ากับ 11.50 cm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 10.20 cm จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่า ϵ_v ตามสมการได้ดังนี้

$$\epsilon_v = \left[\frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \right] \times 100$$

$$\epsilon_v = \text{การหดตัวเชิงปริมาตร} \quad (\%)$$

เมื่อ $V_1 =$ ปริมาตรดินตัวอย่างก่อนทดสอบ (cm^3)

$V_2 =$ ปริมาตรดินตัวอย่างหลังทดสอบ (cm^3)

แทนค่า

$$\epsilon_v = \left[\frac{\left(\frac{\pi \times 10.26^2}{4} \times 11.65 \right) - \left(\frac{\pi \times 10.20^2}{4} \times 11.50 \right)}{\left(\frac{\pi \times 10.26^2}{4} \times 11.65 \right)} \right] \times 100$$

$$= 2.76 \%$$

ดังนั้นค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินเหนียวนา มีค่าเท่ากับ 2.76%

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายชัยเจริญ มาังคสาระ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4910120009

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ครุศาสตรอดศาสตรกรรมบัณฑิต
(โยธา-ก่อสร้าง)มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตเทเวศร์

2530

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

ชัยเจริญ มาังคสาระ และ ธนิต เกลิมยานนท์. (2552). การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัด สำหรับสถานที่ฝังกลบ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. วันที่ 13 – 15 พฤษภาคม 2552. สโมสรมณาคาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา.