



การประเมินความเหมาะสมของการใช้ดินท้องถิ่นจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา
สำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย

**Assessment of Utilization of Local Songkhla Soil – Rubber ash Mixture as
Landfill Liner**

ณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ

Nattarat Chaipolrit

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

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประเมินความเหมาะสมของการใช้ดินท้องถิ่นจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา
สำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย

**Assessment of Utilization of Local Songkhla Soil – Rubber ash Mixture as
Landfill Liner**

ณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ

Nattarat Chaipolrit

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

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินความเหมาะสมของการใช้ดินที่องถิ่นจังหวัดสงขลาผสมถ้ำลอย
ไม้ยางพาราสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย

ผู้เขียน นางสาวณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์)

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูบุอุปการ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพยม สราภิรมย์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เฉลิมยานนท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
โยธา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกัง วงศ์ศิริโชติ)
รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เถลิมนานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ์)

นักศึกษา

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การประเมินความเหมาะสมของการใช้ดินท้องถิ่นจังหวัดสงขลาผสมเถาลอย ไม้ยางพาราสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย |
| ผู้เขียน | นางสาวณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| ปีการศึกษา | 2565 |

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการใช้วัสดุผสมจากดินเหนียวท้องถิ่น จังหวัดสงขลาและเถาลอยไม้ยางพารา สำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมบ่อฝังกลบมูลฝอย งานวิจัยของ Benson และ Daniel แสดงให้เห็นว่าช่วงของค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นกันซึม ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องมีค่าต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ค่ากำลังอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต้องต่ำกว่า 4% ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้อัตราส่วนของดินเหนียวต่อเถาลอยไม้ยางพาราของวัสดุผสมโดยน้ำหนักแห้งได้แก่ 100:0 และ 80:20 และมีการแปรผันระยะเวลาในการ บ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่าดินเหนียวอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) ถึงแม้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s แต่ก็ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมเนื่องจากมีค่ากำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่า 200 kPa และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 4% อย่างไรก็ตาม สำหรับวัสดุผสมในอัตราส่วน 80:20 ในทุกระยะเวลาการบ่ม ผลการทดสอบได้ค่าทุกคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ที่เหมาะสมตามที่กำหนดไว้ ดังนั้นวัสดุผสมในอัตราส่วน 80:20 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ในการใช้เป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย

คำสำคัญ: ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ, ค่ากำลังอัดแกนเดียว, ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร

Thesis Title Assessment of Utilization of Local Songkhla Soil – Rubber ash mixture as Landfill Liner

Author Ms. Nattarat Chaipolrit

Major Program Civil Engineering

Academic Year 2022

Abstract

In this study, mixtures of Songkhla local clay and rubber wood ash were studied as a landfill liner. Benson and Daniel showed that suitable liner properties consist of a hydraulic conductivity lower than 1×10^{-7} cm/s, an unconfined compressive strength not less than 200 kPa and a volumetric shrinkage strain lower than 4%. In order to determine an appropriate mixture, the clay-rubber wood ash ratios of 100:0 and 80:20 were used. For the mixture of 80:20, incubation times of 0, 7, and 28 days were employed. Experimental results show that for the 100:0 mixture (clay only) although its coefficient of hydraulic conductivity is lower than 1×10^{-7} cm/s but it is not suitable for use as a liner because its unconfined compressive strength and volumetric shrinkage strain are less than 200 kPa and more than 4%, respectively. On the other hand, for the 80:20 mixture with all incubation times, the test results meet the specified criteria. Hence, it is suitable for use as the landfill liner.

Keywords: Compacted clay liner, Hydraulic conductivity, Unconfined compressive, Volumetric shrinkage strain

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูบุญอุปการ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพยม สราภิรมย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจ ทั้งในเชิงวิชาการและเทคนิคต่าง ๆ มากขึ้น รวมถึงการตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดจากความเอาใจใส่ อบรมสั่งสอนทางด้านวิชาการเป็นสำคัญ ซึ่งทำให้เพิ่มพูนความรู้ ความสามารถของผู้วิจัยได้เป็นอย่างดี และเป็นต้นแบบในการทำงานที่ดีให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณพลวัฒน์ คงสม สำหรับความช่วยเหลือในการทดสอบในห้องปฏิบัติการและให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ทำให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณสุพิศ นนทะสร และคุณจิราพร ขวงไข นักวิชาการอุดมศึกษาประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ที่อำนวยความสะดวกในการจัดส่งเอกสารต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบคุณ พี่น้องและเพื่อนปริญญาโททุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ท้ายที่สุดผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่มอบความรัก อบรมสั่งสอน เลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้การช่วยเหลือด้านต่าง ๆ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ทำให้การศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อ | (5) |
| กิตติกรรมประกาศ | (7) |
| สารบัญ | (8) |
| สารบัญรูป | (11) |
| สารบัญตาราง | (16) |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 4 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม | 5 |
| 2.1 บ่อฝังกลบมูลฝอย..... | 5 |
| 2.2 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบ | 5 |
| 2.2.1 ชั้นกันซึม | 5 |
| 2.2.2 วางระบบรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย | 9 |
| 2.2.3 การปิดชั้นฝังกลบชั้นสุดท้าย (Final Cover) | 10 |
| 2.3 โครงสร้างดินเหนียว..... | 11 |
| 2.3.1 โครงสร้างดินเหนียว | 11 |
| 2.3.2 แร่ดินเหนียวที่สำคัญ..... | 12 |
| 2.4 การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึม | 16 |
| 2.4.1 ทฤษฎี Daniel and Benson (1990) | 16 |
| 2.5 ไม้ยางพาราและเถาไม้ยางพารา | 21 |
| 2.5.1 ความสำคัญของอุตสาหกรรมไม้ยางพารา | 21 |
| 2.5.2 เถาไม้ยางพารา | 22 |
| 2.5.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถาลอยไม้ยางพารา | 22 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 23 |

สารบัญ

| | หน้า |
|---|-----------|
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 28 |
| 3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย..... | 28 |
| 3.2 อัตราส่วนของดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม่ย่างพารา..... | 29 |
| 3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ..... | 30 |
| 3.4 ทดสอบคุณสมบัติดัชนี (INDEX PROPERTIES TEST)..... | 30 |
| 3.5 ทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม ENGINEERING PROPERTIES TESTS..... | 31 |
| 3.5.1 Compaction test..... | 31 |
| 3.5.2 Hydraulic conductivity..... | 31 |
| 3.5.3 Volumetric shrinkage strain test..... | 32 |
| 3.5.4 Unconfined compression test..... | 33 |
| 3.6 ช่วงที่ยอมรับได้ (ACCEPTABLE ZONE) และขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (OVERALL ACCEPTABLE ZONE)..... | 34 |
| 3.7 การประเมินความเหมาะสมของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ย่างพารา 0% และ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน..... | 34 |
| บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล | 35 |
| 4.1. ผลการศึกษาคุณสมบัติดัชนี (INDEX PROPERTIES)..... | 35 |
| 4.2. ผลการศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรม (ENGINEERING PROPERTIES)..... | 35 |
| 4.3. ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมบดอัด (OVERALL ACCEPTABLE ZONE) ของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดและวัสดุผสมดินเหนียวกับเถ้าลอยไม่ย่างพารา..... | 35 |
| 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติดัชนี (INDEX PROPERTIES) ของดินเหนียวทำนางหอมและเถ้าลอยไม่ย่างพารา | 35 |
| 4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรม (ENGINEERING PROPERTIES)..... | 37 |
| 4.2.1 ผลการทดสอบการบดอัด..... | 37 |
| 4.2.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ..... | 39 |
| 4.2.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว..... | 43 |
| 4.2.4 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร..... | 47 |
| 4.3 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมบดอัด (OVERALL ACCEPTABLE ZONE)..... | 51 |

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|-----------|
| 4.3.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมแก้ลอยไม้ ยางพาราที่ 100 : 0..... | 51 |
| 4.3.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมแก้ลอยไม้ ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน | 55 |
| 4.3.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมแก้ลอยไม้ ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน | 59 |
| 4.3.4 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมแก้ลอยไม้ ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน | 63 |
| 4.4 ประเมินความเหมาะสมของดินเหนียวทำนางหอมผสมแก้ลอยไม้ยางพาราใน อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน..... | 67 |
| บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ | 69 |
| 5.1 สรุปผลการศึกษา..... | 69 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 70 |
| บรรณานุกรม | 71 |
| ภาคผนวก ก ตัวอย่าง $E_{(50)}$ ในอัตราส่วนผสมดินเหนียวต่อแก้ลอยไม้ยางพารา 10:0 และ 80:20 ระยะบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน | 74 |
| ภาคผนวก ข บททความวิจัย | 82 |
| บททความวิจัยเรื่องที่ 1 | 83 |
| ประวัติผู้เขียน | 92 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1-1 ข้อมูลสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศ ปี 2565..... | 1 |
| รูปที่ 1-2 ส่วนประกอบสำคัญของบ่อฝังกลบ | 3 |
| รูปที่ 2-1 วัสดุกันซึมแบบดินที่มีอัตราการใช้โคลนต่ำ..... | 6 |
| รูปที่ 2-2 วัสดุกันซึมแบบแผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว | 7 |
| รูปที่ 2-3 วัสดุกันซึมผสม..... | 8 |
| รูปที่ 2-4 วัสดุกันซึมสองชั้น | 9 |
| รูปที่ 2-5 ท่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอย..... | 10 |
| รูปที่ 2-6 การปิดทับสุดท้ายสำหรับการใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ปิดคลุมด้านบน | 10 |
| รูปที่ 2-7 รายละเอียดแผ่นซีลิกา..... | 11 |
| รูปที่ 2-8 รายละเอียดแผ่นอลูมินา..... | 12 |
| รูปที่ 2-9 โครงสร้างแร่ดินเหนียวกาลิไนต์..... | 13 |
| รูปที่ 2-10 โครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ | 14 |
| รูปที่ 2-11 โครงสร้างแร่ดินเหนียวอิลไลต์ | 15 |
| รูปที่ 2-12 โครงสร้างแร่ดินเหนียวคลอไรต์..... | 15 |
| รูปที่ 2-13 กราฟการบดอัดและสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน..... | 17 |
| รูปที่ 2-14 การปรับปรุงช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน | 18 |
| รูปที่ 2-15 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว a) ค่ากำลังอัดแกนเดียว | 19 |
| รูปที่ 2-16 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร a) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร | 20 |
| รูปที่ 2-17 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Acceptable Zone)..... | 21 |
| รูปที่ 3-1 กรอบการดำเนินงานวิจัย | 28 |
| รูปที่ 3-2 วัสดุในการทดสอบ | 30 |
| รูปที่ 3-3 บ่มดินในถุงพลาสติก..... | 32 |
| รูปที่ 3-4 การทดสอบ Hydraulic conductivity | 32 |
| รูปที่ 3-5 การทดสอบ Volumetric shrinkage strain | 33 |
| รูปที่ 3-6 การทดสอบ Unconfined compression..... | 34 |
| รูปที่ 4-1 กราฟแสดงการตัวของขนาดคละของดินเหนียวทำนางหอมและถั่วลอยไม้ยางพารา | 36 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4-2 กราฟการบดอัดในอัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอยไม้ยางพารา 100:0 และ 80-20 | 38 |
| รูปที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content..... | 41 |
| รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content..... | 42 |
| รูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content..... | 43 |
| รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength | 45 |
| รูปที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content บดอัดแบบ Standard Proctor | 46 |
| รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content บดอัดแบบ Reduced proctor..... | 47 |
| รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content..... | 49 |
| รูปที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content บด อัดแบบ Standard Proctor..... | 50 |
| รูปที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content บดอัดแบบ Reduced proctor..... | 51 |
| รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของ อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน | 52 |
| รูปที่ 4-13 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตรา ส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน | 52 |
| รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength | 53 |
| รูปที่ 4-15 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมเถ้า ลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน | 53 |
| รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของ อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน | 54 |
| รูปที่ 4-17 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนผสม เถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน | 54 |
| รูปที่ 4-18 กราฟแสดงว่าไม่มีพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสม..... | 55 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของ อัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน | 56 |
| รูปที่ 4-20 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตรา ส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน | 56 |
| รูปที่ 4-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength | 57 |
| รูปที่ 4-22 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมแกล ลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน | 57 |
| รูปที่ 4-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของ อัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน | 58 |
| รูปที่ 4-24 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนผสม แกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน | 58 |
| รูปที่ 4-25 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน | 59 |
| รูปที่ 4-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของ อัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน | 60 |
| รูปที่ 4-27 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตรา ส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน | 60 |
| รูปที่ 4-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength | 61 |
| รูปที่ 4-29 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมแกล ลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน | 61 |
| รูปที่ 4-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของ อัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน | 62 |
| รูปที่ 4-31 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนผสม แกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน | 62 |
| รูปที่ 4-32 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน | 63 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของ อัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน | 64 |
| รูปที่ 4-34 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตรา ส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน | 64 |
| รูปที่ 4-35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ | 65 |
| รูปที่ 4-36 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมแกล ลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน | 65 |
| รูปที่ 4-37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของ อัตราส่วนผสมแกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน | 66 |
| รูปที่ 4-38 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนผสม แกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน | 66 |
| รูปที่ 4-39 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสม แกลลวยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน | 67 |
| รูปที่ 4-40 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดทุกอัตราส่วนผสม | 68 |
| รูปที่ ก-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแกล ลวยที่ 0% บดอัดแบบ Modified Proctor | 76 |
| รูปที่ ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแกลลวย ที่ 0% บดอัดแบบ Standard Proctor..... | 76 |
| รูปที่ ก-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแกล ลวยที่ 0% บดอัดแบบ Reduced proctorก..... | 77 |
| รูปที่ ก-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแกล ลวยที่ 0% ระยะบ่มที่ 0 วัน บดอัดแบบ Modified Proctor | 77 |
| รูปที่ ก-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแกล ลวยที่ 20% ระยะบ่มที่ 0 วัน บดอัดแบบ Standard Proctor..... | 78 |
| รูปที่ ก-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแกล ลวยที่ 20% บ่มที่ 0 วัน บดอัดแบบ Reduced proctorก..... | 78 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ ก-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมเถ้า ลอยที่ 0% ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน บดอัดแบบ Modified Proctor | 79 |
| รูปที่ ก-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมเถ้า ลอยที่ 20% ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน บดอัดแบบ Standard Proctor..... | 79 |
| รูปที่ ก-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมเถ้า ลอยที่ 20% บ่มที่ 7 วัน บดอัดแบบ Reduced proctor | 80 |
| รูปที่ ก-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมเถ้า ลอยที่ 20% ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน บดอัดแบบ Modified Proctor | 80 |
| รูปที่ ก-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมเถ้า ลอยที่ 20% ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน บดอัดแบบ Standard Proctor..... | 81 |
| รูปที่ ก-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมเถ้า ลอยที่ 20% บ่มที่ 28 วัน บดอัดแบบ Reduced proctor..... | 81 |

สารบัญตาราง

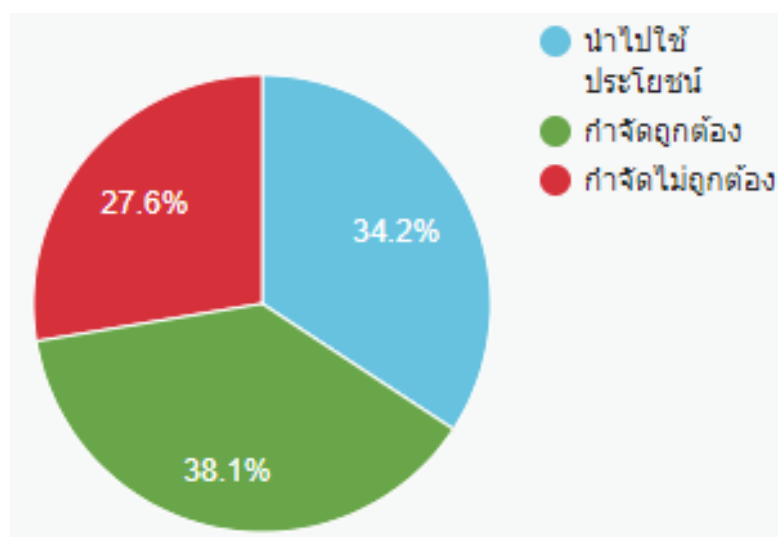
| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา (อาดีเบ็ง, 2551) | 23 |
| ตารางที่ 3-1 อัตราส่วนผสมระหว่างดินและเถ้าลอย | 29 |
| ตารางที่ 3-2 จำนวนตัวอย่างในการทดสอบ | 29 |
| ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวทำนางหอมและเถ้าลอยไม้ยางพารา | 35 |
| ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Modified proctor, Standard proctor และ | 37 |
| ตารางที่ 4-3 ค่าน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของการบดอัดด้วยวิธี Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor | 39 |
| ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ | 40 |
| ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว | 44 |
| ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร | 48 |
| ตารางที่ ก-1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% ($E_{(50)}$) | 75 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

กรมควบคุมมลพิษ (2552) ระบุว่าขยะมูลฝอยเป็นเศษวัสดุ เช่น เศษอาหาร เศษกระดาษ เศษพลาสติก เครื่องใช้ ชำรุด เศษวัสดุจากการเกษตร อุตสาหกรรม การก่อสร้าง ตลอดจนกิ่งไม้ใบหญ้า หรือซากสัตว์ กระดาษ พลาสติก เสื้อผ้าเก่า ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในชุมชนเมืองทั่วประเทศไทย ในปี 2565 พบว่า มีปริมาณ 25.70 ล้านตันต่อปี ดังภาพที่ 1-1 ในส่วนของขยะมูลฝอยของจังหวัดสงขลามีประมาณ 1,207 ตันต่อวัน ปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกกำจัดไม่ถูกต้องอยู่ที่ 157 ตันต่อวัน (ข้อมูลสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศ, 2565) ซึ่งการกำจัดขยะมูลฝอยยังใช้วิธีการที่ไม่ถูกสุขลักษณะซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนได้



รูปที่ 1-1 ข้อมูลสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศ ปี 2565

(ที่มา : ระบบสารสนเทศด้านการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน, 2565)

ตามมาตรฐานการกำจัดขยะของ US EPA (1998) ได้กล่าวว่าการลดและการกำจัดขยะมูลฝอยจากชุมชนอย่างถูกสุขลักษณะและหลักสุขาภิบาลสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้ 1.การลดปริมาณขยะ โดยการใช้น้ำและนำกลับมาใช้ประโยชน์ (Re-use and Recycle) 2.การเผาในเตาเผา (Incineration) และ 3.การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) โดยการฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลถือเป็นวิธีการกำจัดขยะที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมนสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธี

อื่น (Rowe et al., 1995, Qian et al., 2002 และ Dutta and Mishra, 2015) แต่มีเพียงประมาณ 20% ของปริมาณขยะทั้งหมดเท่านั้นที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ (Qian et al., 2002) นอกจากนั้น การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลนี้ถือเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการน้อยกว่าวิธีอื่น สามารถกำจัดขยะมูลฝอยได้ทุกประเภท ทุกขนาด จึงเป็นระบบกำจัดขั้นสุดท้ายคือไม่มีเศษเหลือตกค้างที่ต้องนำไปกำจัดอีก ในขณะที่ภายหลังการกำจัดขยะโดยการเผาในเตาเผายังคงเหลือเศษขี้เถ้าที่ต้องถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบด้วย (วรรณวรงค์, 2561)

บ่อฝังกลบ (Landfill) เป็นสถานที่สำหรับฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) ซึ่งเป็นวิธีกำจัดมูลฝอยอีกวิธีหนึ่งที่ยั่งยืนไม่ให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยนำขยะมูลฝอยมาเทกองไว้ในบ่อฝังกลบ จากนั้นใช้เครื่องจักรบดอัดให้แน่นและกลบดินทับเป็นชั้นๆ บ่อฝังกลบ ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ชั้นกันซึม (Liner) เป็นส่วนที่อยู่ล่างสุดของบ่อฝังกลบ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำชะมูลฝอยซึมผ่านไปปนเปื้อนกับน้ำใต้ดิน, ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (Leachate collection system) และระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final cover system) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำฝนซึมผ่านลงไปบ่อฝังกลบ จึงทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยได้น้อยลง ดังรูปที่ 1-2

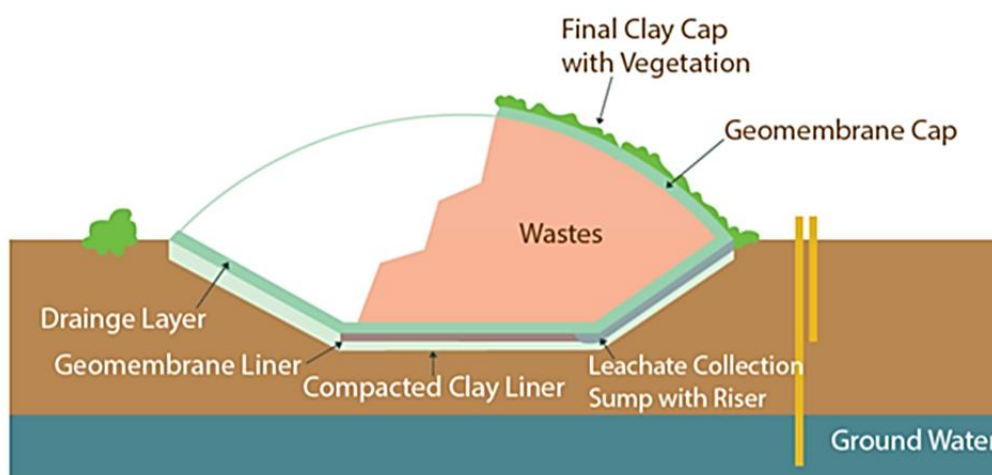
ดินเหนียวสามารถใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมได้อย่างดีถ้ามีการบดอัดที่เหมาะสม เนื่องจากดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ ในขั้นตอนการบดอัดมักนิยมบดอัดจนดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ในการก่อสร้างชั้นดินเหนียวกันซึมนี้จะนำดินเหนียวมาบดอัดเป็นชั้นๆ ซึ่งอาจจะมี ความหนา 60 เซนติเมตร แต่เนื่องด้วยเมื่อบดอัดดินเหนียวอาจจะเกิดรอยร้าวหรือรอยแตกถ้าบดอัดไม่ดี หรือเกิดรอยร้าวส่งผลให้สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่านไป

ปัจจุบันไม้ยางพาราถูกนำไปใช้เป็นวัสดุทำเฟอร์นิเจอร์เป็นผลทำให้เหลือเศษไม้ยางพาราเป็นจำนวนมากและถูกเก็บมาทำเป็นเชื้อเพลิงของการอบไม้ยางพารา โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ที่มีอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราเป็นจำนวนมาก หากนำเถ้าลอยที่ได้จากการอบไม้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ย่อมส่งผลดีต่ออุตสาหกรรมและสภาพแวดล้อมในภาคใต้ (อาปีเต็ง, 2551)

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของชั้นกันซึมแบบดินเหนียวบดอัดที่ใช้ดินเหนียวท้องถิ่นจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 0 และ 20% เพื่อประเมินความเหมาะสมสำหรับทำชั้นวัสดุกันซึมใต้บ่อฝังกลบ (Liner) ตามข้อกำหนดของระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลและสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำชะขยะ (Leachates) ที่สำคัญที่สุดสำหรับระบบฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาลที่มีประสิทธิภาพคือ จะต้องสามารถรับปริมาณขยะฝังกลบเพื่อกำจัดตามทีออกแบบไว้ และสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำชะขยะ ซึ่งเป็นพิษต่อ

สิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของชั้นดิน น้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติจากน้ำชะขยะที่รั่วซึมจากบ่อฝังกลบดังกล่าว ชั้นวัสดุกันซึมใต้บ่อฝังกลบจะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ทนน้ำสูง มาตรฐานการออกแบบหรือข้อกำหนดของระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล โดยชั้นกันซึมส่วนใหญ่ไม่น้อยกว่า 60 เซนติเมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

นอกจากนี้ดินในท้องถิ่น และถ้าลอยสามารถนำมาก่อสร้างเป็นชั้นกันซึมดินบดอัดได้ แต่ส่วนประกอบเหล่านี้ต้องผ่านการประเมินหาความเหมาะสมก่อน จึงสามารถนำมาใช้เป็นชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบมูลฝอย (ชนิด, 2550) ดินที่เหมาะสมกับชั้นกันซึมควรมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, มีค่ากำลังอัดแกนเดียวและมีการหดตัว ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ Daniel and Benson (1990)



รูปที่ 1-2 ส่วนประกอบสำคัญของบ่อฝังกลบ
(ที่มา : โกวิทย์, 2544)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 2 ข้อ ประกอบด้วย

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เหมาะสม เพื่อใช้สำหรับเป็นชั้นกันซึมของหลุมฝังกลบ
- 2) เพื่อศึกษาความเหมาะสมของดินเหนียวในพื้นที่จังหวัดสงขลาผสมถ้ำลอยไม้ยางพาราสำหรับทำชั้นกันซึมของหลุมฝังกลบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1) ใช้วิธี Daniel and Benson (1990) ในการประเมินความเหมาะสมของดินที่ใช้ทำชั้นกันซึม คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร และค่ากำลังอัดแกนเดียว

2) ศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวในพื้นที่บ้านท่านางหอม ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างดินเหนียวในพื้นที่จังหวัดสงขลาต่อเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ 80:20 โดยน้ำหนัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวท้องถิ่นในพื้นที่จังหวัดสงขลา

2) ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้ดินเหนียวท้องถิ่นจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราเพื่อเป็นชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบ

3) ทราบถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างดินเหนียวท้องถิ่นจังหวัดสงขลาและเถ้าลอยไม้ยางพารา ในการนำไปใช้ทำชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบ

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

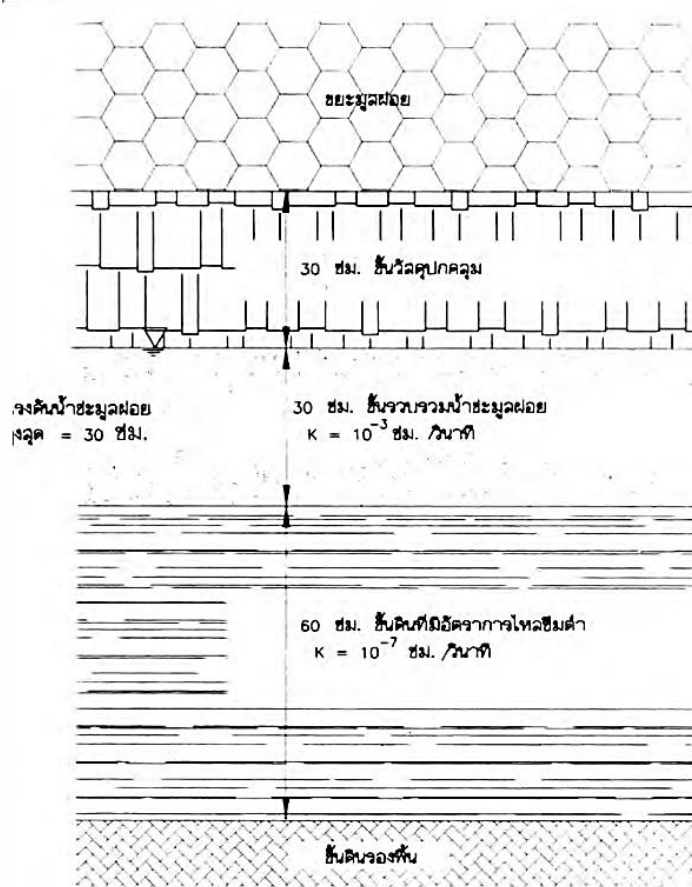
2.1 บ่อฝังกลบมูลฝอย

กรมควบคุมมลพิษ (2560) กล่าวว่า การกำจัดขยะมูลฝอย โดยนำไปฝังกลบในพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการรองรับของเสีย โดยมีการวางมาตรการป้องกันผลกระทบในด้านต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับที่ต่ำกว่าระดับดินเดิม โดยทำการขุดดินลงไปให้ได้ระดับตามที่กำหนดแล้วจึงเริ่มบดอัดมูลฝอยให้เป็นชั้นบางๆ ทับกันหนาขึ้นเรื่อยๆ จนได้ระดับตามที่กำหนดของขยะมูลฝอยบดอัดแต่ละชั้นและชั้นปิดทับ โดยทั่วไปความลึกของการขุดร่องจะถูกกำหนดด้วยระดับน้ำใต้ดิน อย่างน้อยระดับกันร่องหรือพื้นล่างควรจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 1 เมตร โดยยึดระดับน้ำในฤดูฝนเป็นเกณฑ์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนต่อน้ำใต้ดิน

2.2 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบ

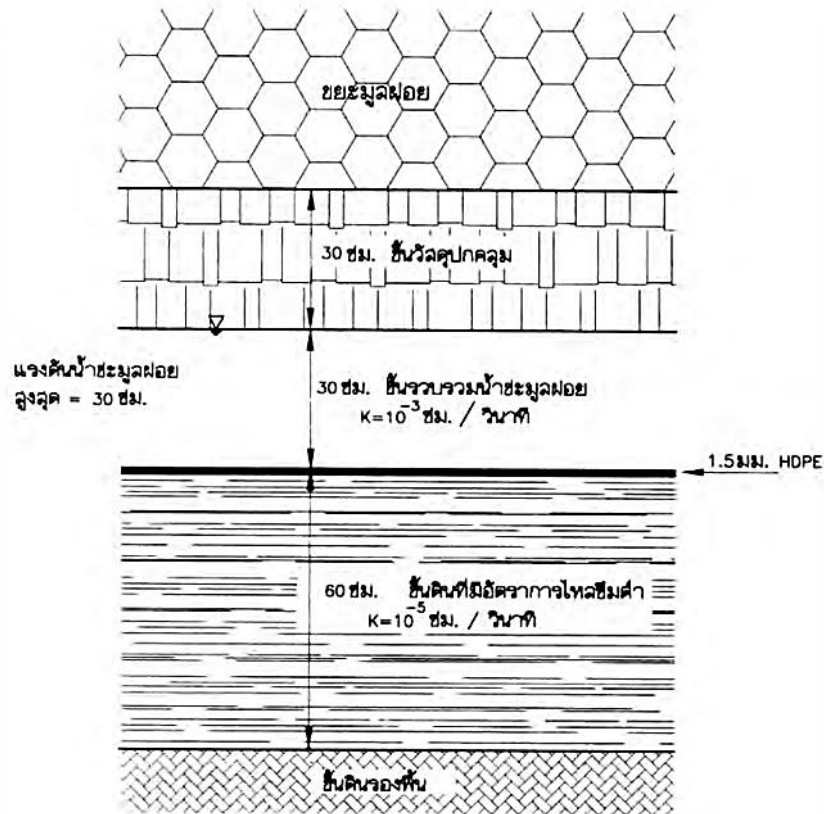
2.2.1 ชั้นกันซึม

-การใช้ดินที่มีอัตราการไหลซึมผ่านน้ำต่ำ (Low Permeable Soil Liner) ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัดหนา 60 เซนติเมตร และมีค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำไม่เกิน 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอยอยู่ด้านบน โดยแรงดันของน้ำชะขยะมูลฝอย (Hydraulic Head) ต้องไม่เกิน 30 เซนติเมตร และมีชั้นดินปกคลุมเหนือชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย ความหนาอย่างน้อย 30 เซนติเมตร ก่อนที่จะมีการฝังขยะมูลฝอยลงไป แสดงดังรูปที่ 2-1 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)



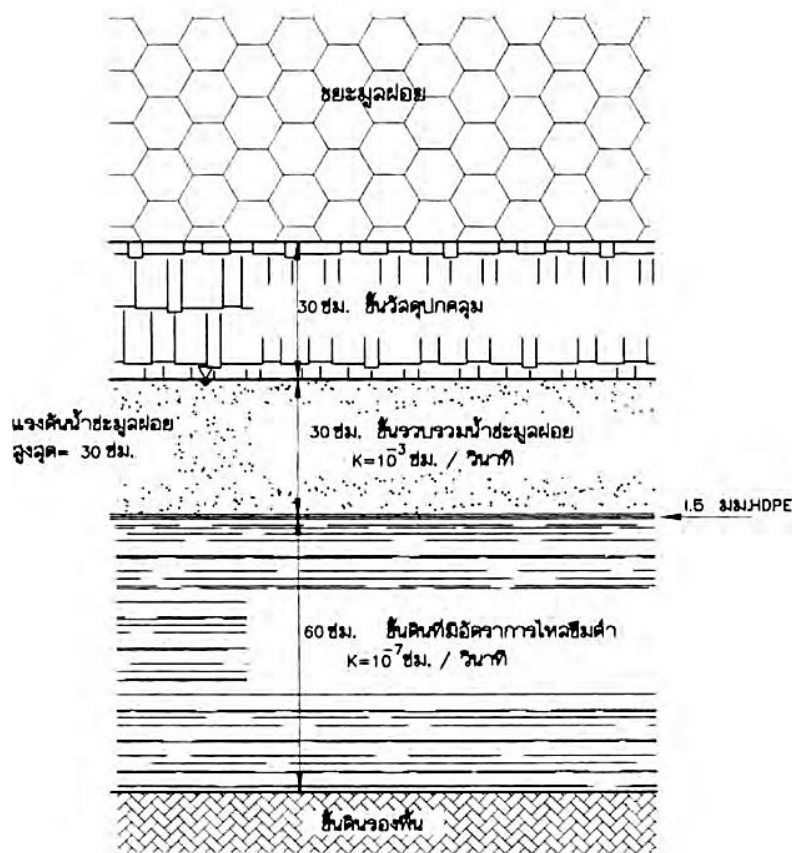
รูปที่ 2-1 วัสดุกันซึมแบบดินที่มีอัตราการไหลซึมต่ำ
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

-การใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียวกับดินที่มีอัตราการไหลซึมผ่านน้ำ 1×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที ประกอบด้วยชั้นแผ่นวัสดุสังเคราะห์ ประเภท HDPE ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ขึ้นไป ด้านบนของแผ่นวัสดุสังเคราะห์มีชั้นรวบรวม และสูบน้ำชะขยะมูลฝอย และแรงดันน้ำชะขยะมูลฝอยเหนือวัสดุกันซึมไม่เกิน 30 เซนติเมตร ส่วนชั้นล่างของวัสดุสังเคราะห์เป็นดินบดอัดหนา 60 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2-2 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)



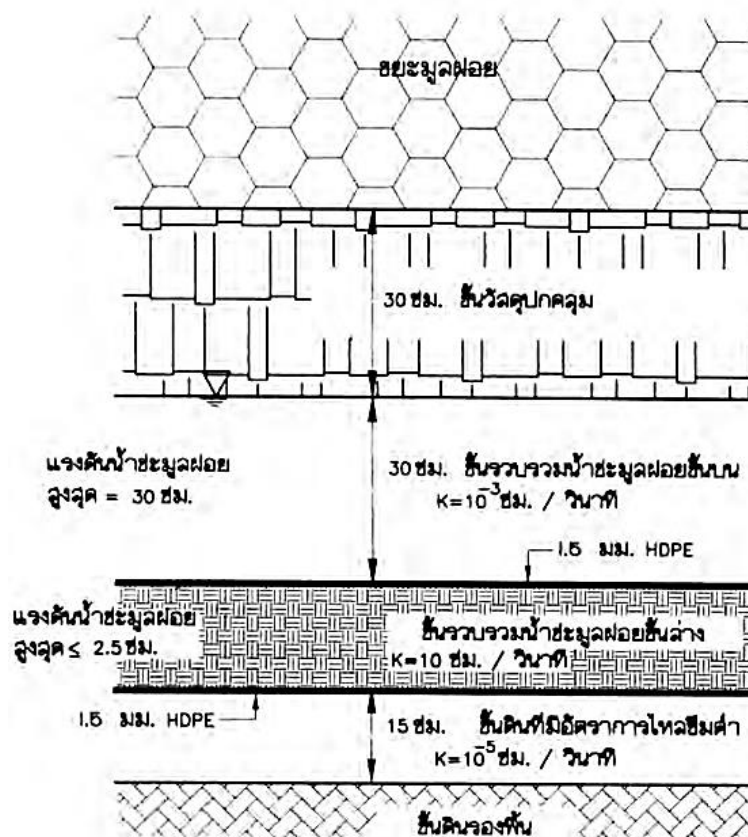
รูปที่ 2-2 วัสดุกันซึมแบบแผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

- การใช้วัสดุกันซึมผสม (Composite Liner) มีลักษณะเช่นเดียวกับวัสดุกันซึมประเภทแผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียว เว้นแต่ค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำของดินที่อยู่ชั้นล่างแผ่นวัสดุสังเคราะห์ ไม่เกิน 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 2-3 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)



รูปที่ 2-3 วัสดุกันซึมผสม
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

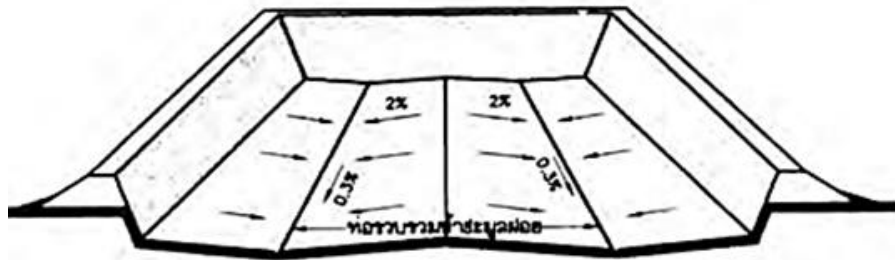
-การใช้วัสดุกันซึมสองชั้น (Double Liner) ประกอบด้วยแผ่นวัสดุสังเคราะห์ HDPE 5 ชั้น ความหนา 1.5 มิลลิเมตรขึ้นไป ด้านบนของแผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นบนเป็นชั้นรวบรวมน้ำชะขยะมูลฝอยและแรงดันน้ำชะขยะมูลฝอยเหนือแผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นบนไม่เกิน 30 เซนติเมตร ค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำไม่น้อยกว่า 1×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที ระหว่างแผ่นวัสดุสังเคราะห์ทั้งสองชั้นมีชั้นรวบรวมน้ำชะขยะมูลฝอยเพื่อตรวจสอบรอยรั่วของแผ่นวัสดุสังเคราะห์ ชั้นบนซึ่งมีค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำต่ำสุด และแรงดันของน้ำจะขยะมูลฝอยไม่เกิน 2.5 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2-4 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)



รูปที่ 2-4 สดกั้นซึมสองชั้น
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

2.2.2 วางระบบรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย

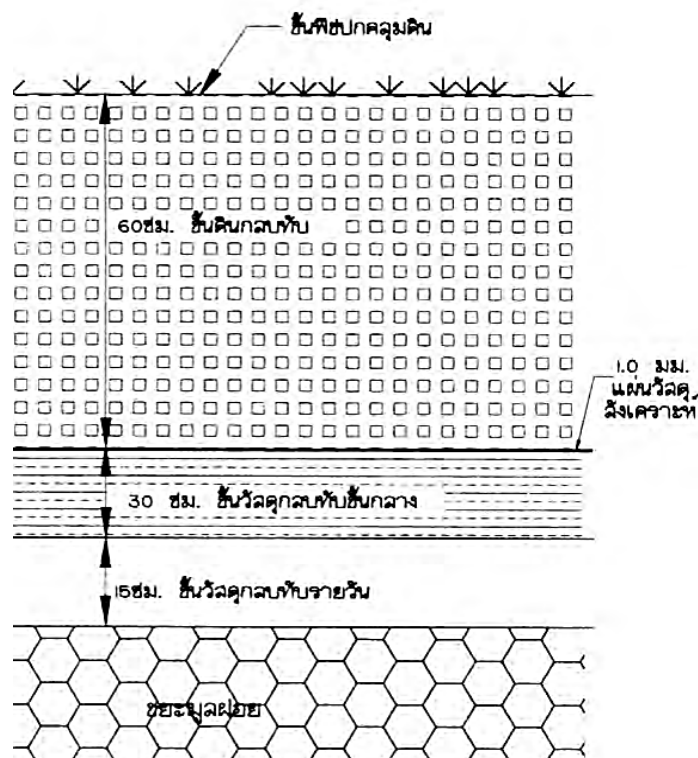
โดยต้องเป็นวัสดุที่มีความทนทานทางเคมีจากน้ำชะขยะมูลฝอย และมีความแข็งแรงพอที่จะป้องกันความเสียหายภายใต้แรงดันที่เกิดจากการกองทับของขยะมูลฝอย วัสดุเคลือบ และการปฏิบัติงานของเครื่องจักรกลระหว่างการดำเนินงานฝังกลบขยะมูลฝอย ระบบรวบรวมมาชะขยะมูลฝอยต้องอยู่เหนือชั้นวัสดุกันซึม โดยอาจใช้เป็นท่อพีวีซี (PVC) หรือท่อโพลีเอทิลีน หรือท่อโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว เจาะรู ทุ่มด้วยแผ่นกรองใยสังเคราะห์ และวางในชั้นกรวดหรือทรายมนที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic Conductivity) ไม่น้อยกว่า 1×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที และชั้นที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร ระยะห่างและความลาดเอียงของท่อรวบรวมน้ำชะขยะมูลฝอยต้องมีความสอดคล้องกับค่าแรงดันน้ำ ชะขยะมูลฝอยที่ยอมให้เกิดขึ้น แต่ต้องไม่เกิน 30 เซนติเมตร และการออกแบบท่อแสดงดังรูปที่ 2-5 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)



รูปที่ 2-5 ท่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอย
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

2.2.3 การปิดชั้นฝังกลบขั้นสุดท้าย (Final Cover)

เป็นการปิดชั้นฝังกลบเมื่อทำการฝังกลบขยะมูลฝอยจนได้ระดับที่ออกแบบไว้แล้ว เพื่อป้องกันการซึมของน้ำฝนเข้าสู่ชั้นฝังกลบและการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบ โดยการปิดขั้นสุดท้ายนั้นต้องมีการปลูกพืชปกคลุมทับอีกครั้งตามเกณฑ์มาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 2-6 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)



รูปที่ 2-6 การปิดทับสุดท้ายสำหรับการใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ปิดคลุมด้านบน
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

2.3 โครงสร้างดินเหนียว

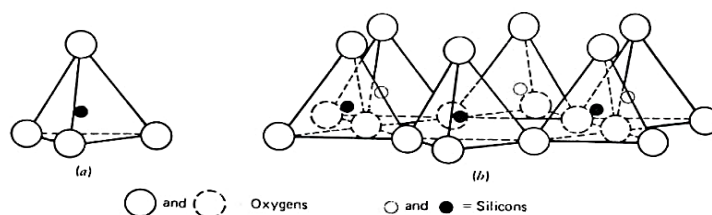
ดินเหนียวมีความเป็นพลาสติกสูง สามารถดูดน้ำมาเคลือบผิวและมีขนาดเล็กมาก เนื่องจากด้วยดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำจึงเป็นดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมใช้ทำชั้นกันซึม

ดินเหนียว ประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เรียกว่าแร่ดินเหนียว เช่น เกาลินไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) และ มอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite) ดินเหนียว ที่ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวต่างชนิดกัน จะมีคุณสมบัติด้านความสามารถดูดน้ำมาเคลือบที่ผิว (Water adsorption) ต่างกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้ดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน เหมาะที่จะใช้ในชั้นกันซึม

2.3.1 โครงสร้างดินเหนียว

โครงสร้างการจัดเรียงตัวของผลึกในแร่ดินเหนียวทั้งหมดประกอบด้วยโครงสร้างหลักเพียงแค่ 2 ชนิดคือ แผ่นซิลิกาหรือแผ่นเตตระฮีดรอล (Silica or tetrahedral sheet) และ แผ่นอลูมินาหรือแผ่นออกตะฮีดรอล (Alumina or octahedral sheet) วิธีการเรียงตัวซ้อนกันของแผ่นเหล่านี้ และวิธีการยึดเหนี่ยว (Bonding) รวมไปถึงชนิดของไอออนของโลหะในผลึกก่อให้เกิดแร่ดินเหนียวต่างชนิดกัน (ธนิต, 2550)

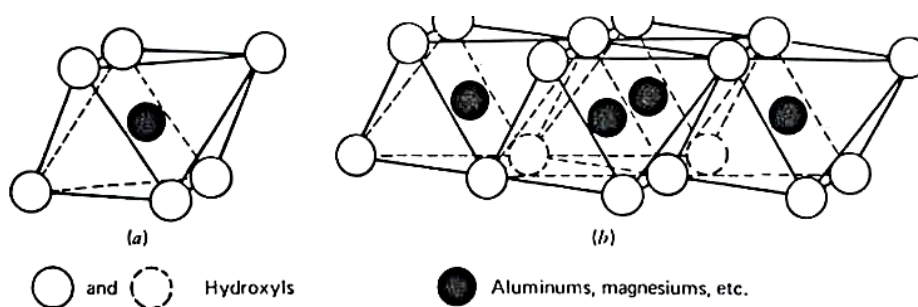
a) แผ่นซิลิกาเกิดจากการรวมตัวกันของหน่วยซิลิกาเตตระฮีดรอลซึ่งประกอบไปด้วยซิลิกา(ประจุบวก) จำนวนหนึ่งอะตอมล้อมรอบด้วยออกซิเจน (ประจุลบ) จำนวน 4 โมเลกุลที่มุมทั้ง 4 ของเตตระฮีดรอลดังแสดงในรูปที่ 2-7 แสดงการรวมตัวของหน่วยซิลิกาเตตระฮีดรอลหลายๆ หน่วยโดยจะใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกันบนระนาบที่ฐานของหน่วยประกอบเป็นแผ่นซิลิกา สัญลักษณ์ของแผ่นซิลิกาได้แสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 รายละเอียดแผ่นซิลิกา

(ที่มา: Grim, 1968)

b) แผ่นอลูมินา เกิดจากการรวมตัวของหน่วยอลูมินัม (หรือแมกนีเซียม) ออกตะซีดรอล หลายๆ หน่วย แต่ละหน่วยของอลูมินัมออกตะซีดรอล ประกอบด้วย อะตอมของอะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม (ประจุบวก) ที่ถูกล้อมรอบไปด้วยโมเลกุลของออกซิเจนหรือไฮดรอกซิล (ประจุลบ) จำนวน 6 โมเลกุล หน่วยอลูมินัมออกตะซีดรอล และหน่วยอลูมินัมออกตะซีดรอลหลายๆ หน่วยที่รวมตัวกันเป็นแผ่นอลูมินาได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-8



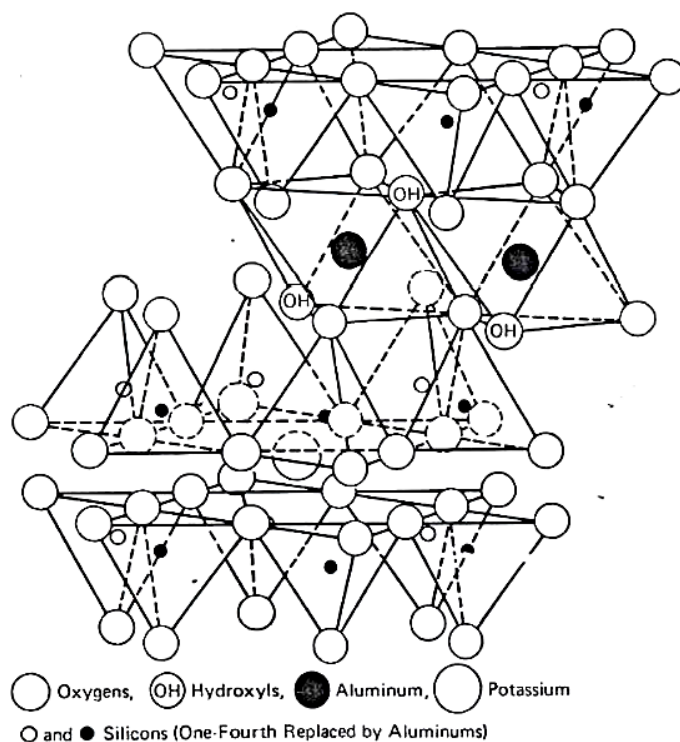
รูปที่ 2-8 รายละเอียดแผ่นอลูมินา
(ที่มา: Grim, 1968)

2.3.2 แร่ดินเหนียวที่สำคัญ

ดินเหนียว ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในดินเหนียวที่ใช้ในงานวิศวกรรมมีหลายชนิด ดังต่อไปนี้

1. เกาลีไนท์ (Kaolinites) เกิดจากการจับตัวกันเป็นชั้นของแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินา ในอัตราส่วน 1:1 เรียกว่า โครงสร้าง 1:1 การจับตัวกันเป็นชั้นของแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินา เกิดจากการที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นซิลิกายึดตัวกับปลายด้านหนึ่งของแผ่นอลูมินา โดยปลายของแผ่นทั้งสองดังกล่าวจะใช้ ออกซิเจนร่วมกันในลักษณะของพันธะโควาเลนต์ (Cavalent bonds) ก่อให้เกิดขึ้นของโครงสร้าง 1:1 โดยแต่ละชั้นจะมีความหนาประมาณ 0.72 นาโนเมตร แล้วโครงสร้าง 1:1 หลายๆ ชั้นมาเรียงตัวกันในแนวตั้งดังก่อให้เกิดเกาลีไนท์ในรูปของผลึกดังแสดงในรูปที่ 2-9 การเรียงตัวซ้อนกันในแนวตั้ง ของโครงสร้าง 1:1 ในแต่ละชั้นถูกยึดติดไว้ด้วยกันโดยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) ระหว่างไฮดรอกซิลของแผ่นอลูมินากับออกซิเจนของแผ่นซิลิกา เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนมีความแข็งแรงจึงทำให้เกิดการเรียงตัวซ้อนเป็นชั้นๆ ประมาณ 70 ถึง 100 ชั้น ดังนั้นผลึกของเกาลีไนท์จึงมีขนาดใหญ่ เกาลีไนท์ เป็นส่วนประกอบสำคัญของดินขาวที่ใช้ทำเครื่องปั้นดินเผา

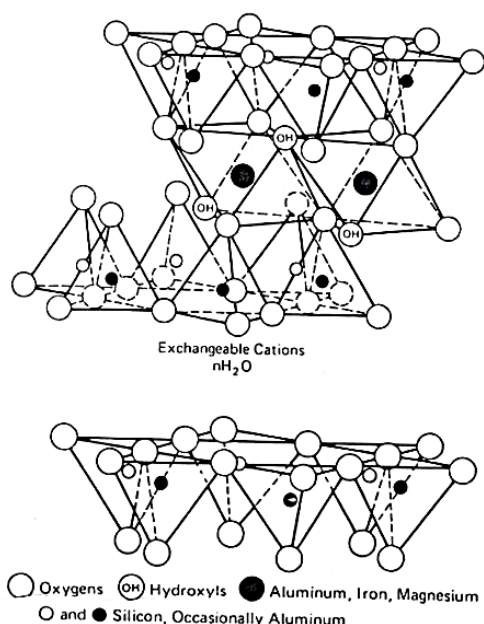
2. ฮอลลอยไซต์ (Hollloysite) เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างแบบ 1:1 เหมือนกาลิไนต์ แต่แตกต่างกันในกระบวนการเกิด โดยจะมีน้ำเข้ามาแทรกระหว่างชั้นทำให้เกิดการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบของผลึก คุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของแร่ดินเหนียวแบบฮอลลอยไซต์ คือน้ำที่แทรกอยู่ในระหว่างชั้นจะไม่สามารถกลับมารวมตัวกับแร่ดินเหนียวได้อีกถ้ามีการทำแร่ดินเหนียวนี้ให้แห้ง ดินที่มีแร่ ดินเหนียวแบบฮอลลอยไซต์เป็นส่วนประกอบหลักไม่ค่อยพบบ่อยนัก แต่บางครั้งก็อาจทำให้เกิดปัญหาได้เช่น ในกรณีที่ทดสอบการบดอัดของดินมีแร่ดินเหนียวฮอลลอยไซต์ที่ถูกทำให้แห้งในห้องปฏิบัติการ จะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกับดินที่มีความชื้นตามธรรมชาติ



รูปที่ 2-9 โครงสร้างแร่ดินเหนียวกาลิไนต์
(ที่มา: Grim, 1968)

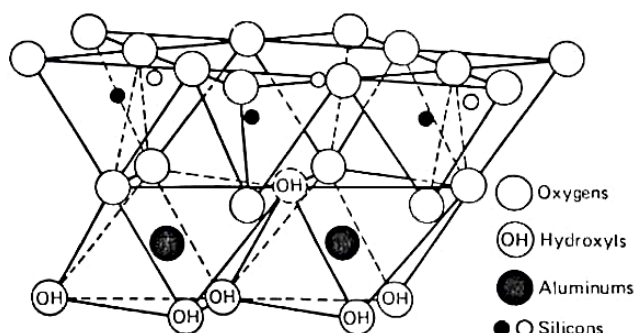
3. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) หรือมีอีกชื่อหนึ่งว่า สแมกไคต์ (Smectite) ประกอบไป ด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่นวางอยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นอลูมินา แสดงดังรูปที่ 2-10 จึงเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า โครงสร้าง 2:1 การวางตัวเรียงกันเพื่อก่อให้เกิดโครงสร้าง 2:1 จำนวนหนึ่งชั้นนั้น เกิดจากการใช้ออกซิเจนร่วมกันแบบพันธะโควาเลนต์ของแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินา

แต่ละชั้นของโครงสร้างแบบ 2:1 มีความหนาประมาณ 0.96 nm ผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์เกิดจากโครงสร้าง 2:1 หลายชั้นมาเรียงตัวกัน โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกาชั้นบนและแผ่นซิลิกาชั้นล่าง คือ แรงแวนเดอวาลส์ ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมากน้ำและไอออนสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้น ของโครงสร้าง 2:1 และแบ่งให้ขาดออกจากกันทำให้ผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดบางกว่าเกล็ดไนด์มากแต่ในขณะที่เดียวกันมอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดึงดูสูงมาก ดังนั้นแร่ดินเหนียวชนิดนี้จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการพองตัว (Swelling) เมื่อเจอกับน้ำ นอกจากนั้นดินเหนียวแบบมอนต์มอริลโลไนต์มีสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ



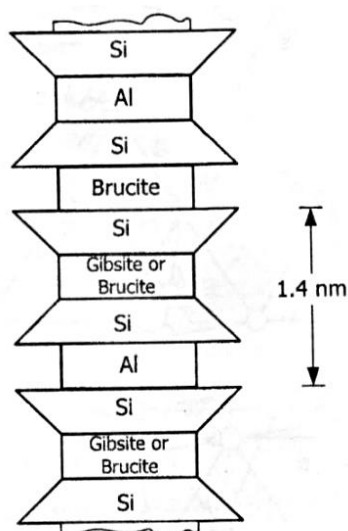
รูปที่ 2-10 โครงสร้างแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์
(ที่มา: Grim, 1968)

4. แร้อิลไลต์ (Illite) เป็นหนึ่งในส่วนประกอบหลักของดินเหนียว อิลไลต์มีโครงสร้างแบบ 2:1 เหมือน มอนต์มอริลโลไนต์ แต่ในแต่ละชั้นจะถูกยึดไว้ด้วยกันด้วยอะตอมของโปแตสเซียม ดังแสดงในรูป 2-11 ในแต่ละชั้นของโครงสร้างแบบ 2:1 ของอิลไลต์ มีความหนาประมาณ 0.96 นาโนเมตร ในบางส่วนของอิลไลต์มีการแทนที่แบบไอโซมอร์ฟิซึมของอลูมิเนียมต่อซิลิกอนในแผ่นซิลิกา



รูปที่ 2-11 โครงสร้างแร่ดินเหนียวอิลไลต์
(ที่มา: Grim, 1968)

5. แร่คลอไรต์ (Chlorite) ก็เป็นส่วนประกอบที่พบในดินเหนียว มีโครงสร้างแบบ 2:1:1 โดยในแต่ละชั้นจะมีการเรียงตัวจากบนลงล่างเริ่มด้วยแผ่นซิลิกา แผ่นบรูไซต์หรือแผ่นกิบไซต์ ต่อด้วยแผ่นซิลิกาและ แผ่นบรูไซต์ แสดงดังรูปที่ 2-12 โดยที่แผ่นบรูไซต์หรือแผ่นกิบไซต์เกิดจากการแทนที่แบบไฮโซมอร์ฟิซของ แมกนีเซียมต่ออลูมิเนียมในแผ่นอลูมินา โดยทั่วไปในคลอไรต์ อาจมีการขาดหายไปของแผ่น บรูไซต์ใน กระบวนการเกิดจึงทำให้น้ำเข้ามาแทนที่ ดังนั้นดินเหนียวที่แร่ดินเหนียวบรูไซต์เป็นส่วนประกอบจะพองตัวเมื่อเจอน้ำ อย่างไรก็ตามการพองตัวของบรูไซต์ยังน้อยกว่ามอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 2-12 โครงสร้างแร่ดินเหนียวคลอไรต์
(ที่มา: ธนิต, 2550)

2.4 การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึม

ในงานวิจัยในครั้งนี้ ใช้วิธีประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมด้วยวิธีของ Daniel and Benson (1990) ดังนี้

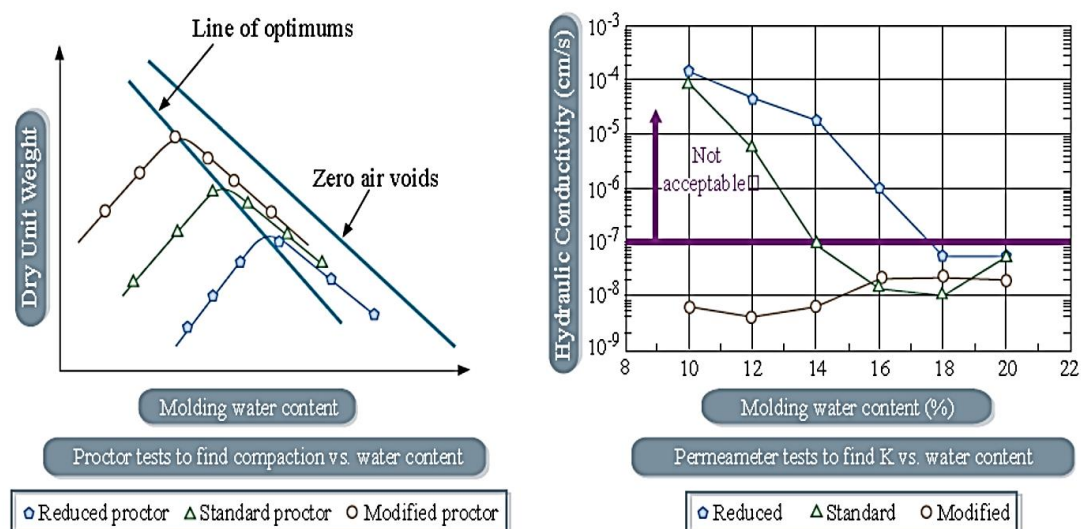
2.4.1 ทฤษฎี Daniel and Benson (1990)

การบดอัดชั้นดินกันซึมแบบดั้งเดิม พัฒนาขึ้นมาจากวิธีการบดอัดถนน ที่ต้องการความแข็งแรงของดินมากและยุบตัวน้อย โดยกำหนดช่วงที่ยอมรับได้ของหน่วยน้ำหนักแห้งไม่น้อยกว่า 90% ของการบดอัดสูงกว่ามาตรฐาน หรือ 95% ของการบดอัดแบบมาตรฐาน และปริมาณน้ำอยู่ ระหว่าง 0-4% ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งการใช้ช่วงที่ยอมรับได้ดังกล่าว ไม่ได้หมายความว่า จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s

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

2.4.1.1. ช่วงที่ยอมรับได้ของประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

นำดินตัวอย่างที่จะใช้ประเมินความเหมาะสม บดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor, Reduced Proctor แต่ละวิธีใช้ดินตัวอย่างประมาณ 5-6 ตัวอย่าง หากำหนดหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น เขียนกราฟการบดอัด ตามรูปที่ 2-13 (a) นำดินตัวอย่างบดอัดด้วยวิธีและปริมาณความชื้นนำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน โดยใช้ค่าความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ตามตารางที่ 2-5 เขียนกราฟสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านกับปริมาณความชื้น ตามรูปที่ 2-13 (b) หมายเหตุ วิธี Reduced Proctor ใช้พลังงานในการบดอัดเท่ากับ 50% เมื่อเทียบกับวิธี Standard Proctor



(a)

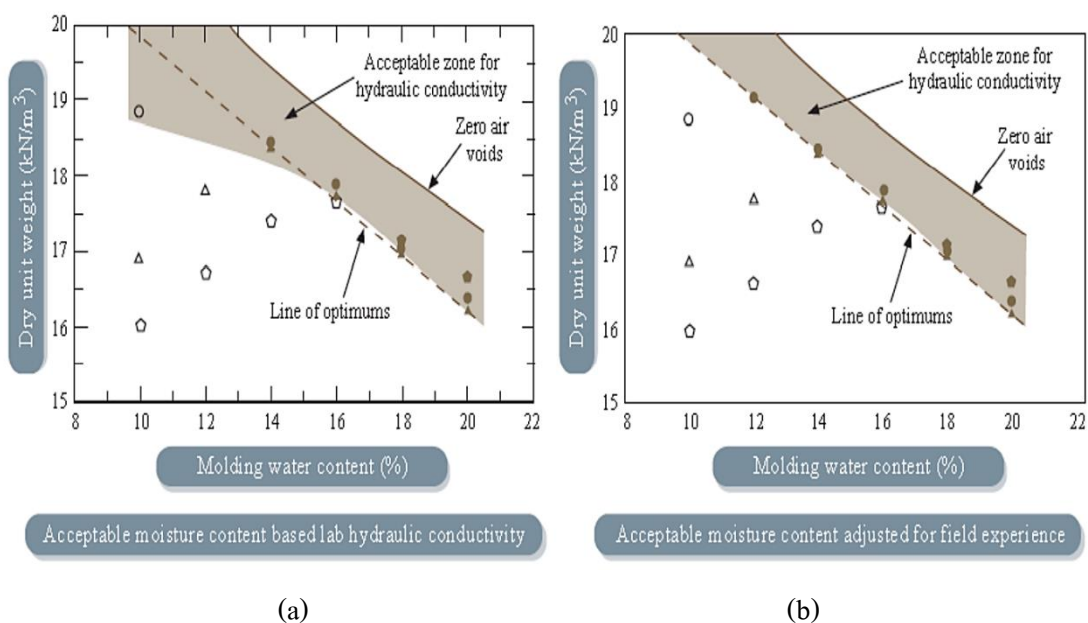
(b)

รูปที่ 2-13 กราฟการบดอัดและสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

a) กราฟการบดอัดทั้งสามวิธี b) ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

(ที่มา: Daniel and Benson, 1990)

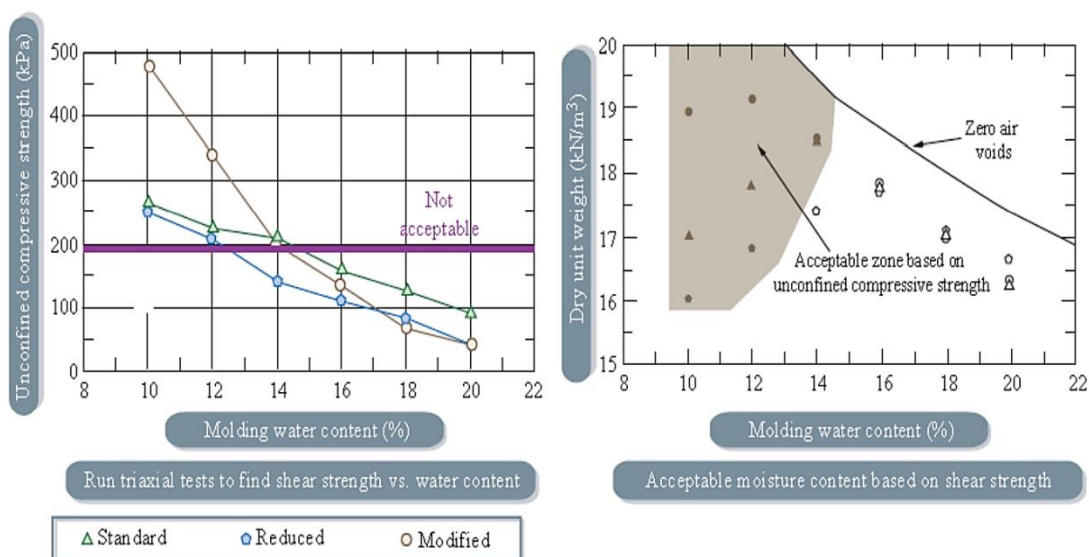
- เขียนกราฟการบดอัดและใช้สัญลักษณ์แบบที่บให้ครอบคลุมตัวอย่าง ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านไม่เกิน 1×10^{-7} cm/s ใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่าง ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมากกว่า 1×10^{-7} cm/s (Benson et al., 1999) แนะนำว่าควรใช้ปริมาณความชื้นบดอัดให้สูงกว่าเส้น Line of optimums (Wet Side) จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินบดอัดในสนาม เมื่อใช้ค่าปริมาณความชื้นบดอัดต่ำกว่าเส้น Line of optimums จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านมากกว่า 1×10^{-7} cm/s และเมื่อใช้ปริมาณความชื้น สูงกว่าเส้น Line of optimums ทำให้สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน น้อยกว่า 1×10^{-7} cm/s ดังนั้นจึงปรับปรุงกราฟจากรูปที่ 2-14 (a) โดยตัดสัญลักษณ์แบบทึบที่อยู่ใต้เส้น Line of optimums ออกตามรูปที่ 2-14 (b)



รูปที่ 2-14 การปรับปรุงช่วงขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน
 a) ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน b) ปรับปรุงช่วงที่ยอมรับได้
 (ที่มา: Benson et al., 1999)

2.4.1.2. ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

- ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของดินตัวอย่างกำหนดน้ำหนักดินแห้งต่อปริมาตรแบบหล่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.25 cm สูง 23.8.5 cm นำดินแห้งผสมกับปริมาณความชื้นที่ได้ บ่มในถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่น บ่มไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายเข้าไปในเนื้อดินอย่างทั่วถึงกัน จากนั้นบดอัดดินในถุงทั้งหมดให้เต็มแบบหล่อพอดี
- ดินตัวอย่าง ไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) โดยวิธีการทดสอบแรงเฉือนแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) เขียนกราฟกำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้นแสดงดังรูปที่ 2-15
- เขียนกราฟการบดอัดและใช้สัญลักษณ์แบบทิม ให้ครอบคลุมตัวอย่าง ที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa ใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวน้อยกว่า 200 kPa



(a)

(b)

รูปที่ 2-15 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว a) ค่ากำลังอัดแกนเดียว

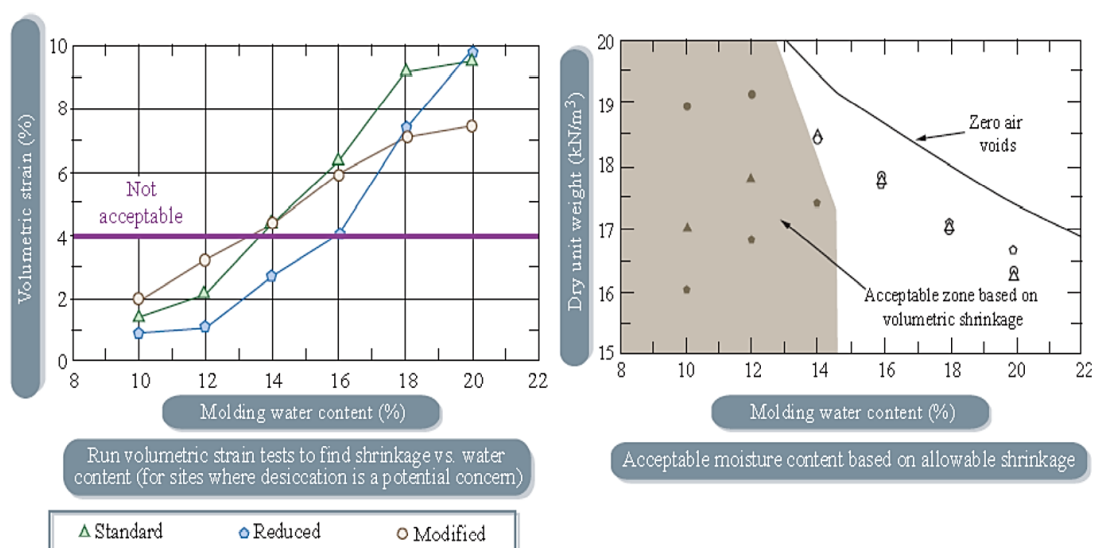
b) ช่วงที่ยอมรับได้ของกำลังอัดแกนเดียว

(ที่มา: Daniel and Benson, 1990)

2.4.1.3. ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric strain)

- นำดินที่จะใช้ประเมินความเหมาะสม บดอัดด้วยวิธีและปริมาณความชื้น
- ค้นตัวอย่างดินที่บดอัด ออกจากแบบหล่อ ตั้งไว้ในห้อง ที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 27 องศาเซลเซียส เพื่อให้ดินสูญเสียความชื้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของดินตัวอย่างทั้งหมดทุกๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งในตัวอย่าง มีน้ำหนักคงที่ (Daniel and Wu, 1993) โดยใช้เวลาทดสอบทั้งหมดประมาณ 1 เดือน เขียนกราฟระหว่าง ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรกับปริมาณความชื้น แสดงดังรูปที่ 2-16(a)

- เขียนกราฟการบดอัดและใช้สัญลักษณ์แบบที่บให้ครอบคลุม ตัวอย่างที่มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตร ไม่เกิน 4% และใช้สัญลักษณ์แบบโปรงสำหรับค่าการหดตัวเชิง ปริมาตรที่มากกว่า 4% ตามรูปที่ 2-16 (b)

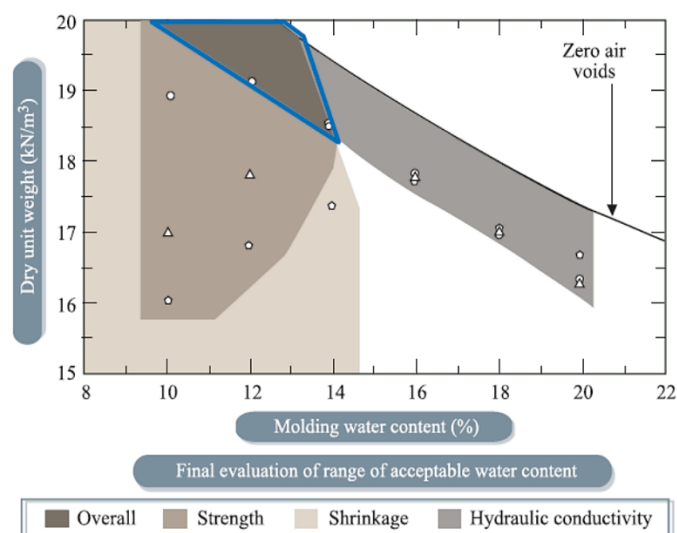


(a)

(b)

รูปที่ 2-16 การหาช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร a) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร
 b) ช่วงที่ยอมรับได้ของการหดตัวเชิงปริมาตร
 (ที่มา: Daniel and Benson, 1990)

2.4.1.4. การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด หลังจากหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน กำลังอัดแกนเดียว การหดตัวเชิงปริมาตรได้ของดิน ตามรูปที่ 2-13 (b), รูปที่ 2-15 (b) และ รูปที่ 2-16 (b) ได้แล้ว นำช่วงที่ยอมรับได้ทั้งสามมาซ้อนทับกัน บริเวณพื้นที่ของช่วงที่ยอมรับได้ทั้งสามซ้อนทับกันเรียกว่าช่วงที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) ที่ครอบคลุม ถึงการซึมผ่านได้กำลังอัดแกนเดียวและการหดตัวเชิงปริมาตรของดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Acceptable Zone)

(ที่มา: Daniel and Benson, 1990)

2.5 ไม้ยางพาราและเล้าไม้ยางพารา

2.5.1 ความสำคัญของอุตสาหกรรมไม้ยางพารา

ความสำคัญของอุตสาหกรรมไม้ยางพาราคือการพัฒนาเศรษฐกิจในภาคใต้ ยางพารานับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคใต้ การใช้ประโยชน์จากยางพาราซึ่งเป็นอุตสาหกรรมหลักจากต้นยางพารา ในส่วนของต้นยางพารามีกี่เพียงการนำไปใช้เพื่อผลิต เฟอร์นิเจอร์ เฟอร์นิเจอร์ที่ทำขึ้นไม่สามารถที่จะนำไปผลิต เป็นสิ่งอื่นได้ เนื่องจากไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีแข็งมากง่ายต่อการทำลายของแมลงต่าง ๆ และสภาพของป่าไม้ชนิดอื่นยังมีพอต่อความต้องการบริโภคของประชาชนจึงมีการศึกษาเพื่อนำไม้ยางพาราซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในภาคใต้ เพื่อนำไปใช้ทดแทนไม้เนื้อแข็งชนิดต่าง ๆ และก็ได้เกิดผลที่น่าพอใจอย่างมาก และจากนั้นมาไม้ยางพาราก็เป็นความหวังของประเทศที่ช่วยลด ปัญหาการขาดแคลนไม้จากป่าธรรมชาติ ลดการนำเข้าไม้จากต่างประเทศ และมีแนวโน้มการส่งออกที่ดีมาก ได้มีการนำไม้ยางพารามาทำการแปรรูป อัดน้ำยา และอบไม้ยางพารา ทำให้ ไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวนี้ มีความแข็งแรงทนทานสามารถนำไปใช้ทดแทนไม้เนื้อแข็งได้เป็นอย่างดี อุตสาหกรรมด้าน ไม้ยางพาราสามารถเพิ่มมูลค่าของไม้ยางพาราได้มากขึ้น

2.5.2 เถ้าไม้ยางพารา

เถ้าลอยไม้ยางพาราเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเผาเศษไม้ และขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือทิ้งจากโรงเลื่อย โรงงานเฟอร์นิเจอร์ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าจากการเผาที่เกิดขึ้นเรียกว่า “เถ้าลอย (Fly ash)” ซึ่งเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 80-85 ของเถ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมด มีองค์ประกอบหลักทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ คือซิลิกอนออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ หากนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดคุณสมบัติในการช่วยเพิ่มการเชื่อมประสาน

2.5.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา

อาดีเบ็ง (2551) ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา และเถ้าแกลบ โดย HE X-Ray Fluorescent ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 2-1 พบว่ามีองค์ประกอบของ SiO_2 ร้อยละ 2.57 Al_2O_3 ร้อยละ 0.53 Fe_2O_3 ร้อยละ 0.5 CaO ร้อยละ 41.19 เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับปูนซีเมนต์ เถ้าลอยไม้ยางพารามีองค์ประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 3.66 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าไม่สามารถจัดเป็นสารปอซโซลาน แต่มีปริมาณของ CaO ร้อยละ 41.19 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของ CaO ในปูนซีเมนต์จึงมีความสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยาไฮเดรชัน Cement Hydration ได้

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา (อาดี้เบ็ง, 2551)

| ออกไซด์ | เถ้าลอยไม้ยางพารา |
|--|-------------------|
| CaO | 41.91 |
| SiO ₂ | 2.57 |
| Al ₂ O ₃ | 0.53 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.56 |
| MgO | 4.52 |
| K ₂ O | 16.11 |
| Na ₂ O | - |
| TiO ₂ | - |
| P ₂ O ₅ | 3.06 |
| SO ₃ | 5.54 |
| Cl | 0.82 |
| MnO ₂ | 1.36 |
| ZnO | 0.12 |
| Rb | 0.18 |
| SrO | 0.16 |
| ZrO ₂ | - |
| น้ำหนักสูญหายหลังการเผา | - |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ ม. ² /กรัม | 9.23 |
| ความพรุน ม. ² /กรัม | 17.72 |

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Daniel and Benson (1990) ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณความชื้น โดยทำการบดอัดดินในสนามเพื่อกำหนดช่วงของปริมาณความชื้นในการบดอัดและคำนวณน้ำหนักขึ้นต่ำของชั้นกันซึม เพื่อให้ได้คุณสมบัติของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ เพราะเป็นส่วนสำคัญในการปฏิบัติงาน และได้แนะนำวิธีการสำหรับการกำหนดเกณฑ์ของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นเพื่อสร้างขอบเขตของพื้นที่ที่ยอมรับได้

Daniel and Wu (1993) ได้ศึกษา การหาปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน โดยทำการทดสอบบดอัดดินเหนียวตัวอย่างด้วยพลังงาน 3 ระดับ กับปริมาณความชื้นแตกต่างกัน

เพื่อหาค่า 1) สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s 2) การหาค่าตัวเชิงปริมาตร 4% 3) ค่ากำลังแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 KPa จากนั้นนำผลการทดลองเขียนกราฟและสร้างขอบเขตพื้นที่ยอมรับได้ บริเวณที่ซ้อนทับกันคือบริเวณเขตที่ยอมรับได้ ที่เหมาะสำหรับสร้างชั้นกันซึมบดอัด ทำให้ชั้นกันซึมมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ความสามารถที่จะหดรัดน้อยและกำลังอัดแกนเดียวอย่างเพียงพอ

Yucel et al. (2008) ได้ศึกษา Sepiolite วัสดุทางเลือกสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝัง กลบมูลฝอยชุมชน ดำเนินการนำดินเหนียว Sepiolite ดินเหนียว Kaolinite ผสมกัน ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบการรับกำลังของดิน ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านและความสามารถในการหดรัดของดินเหนียว Sepiolite มีค่อนข้างสูง จำเป็นต้องเพิ่มดินเหนียว Kaolinite ก่อนเริ่มต้นใช้เป็นวัสดุฝังกลบ การทดสอบดินเหนียวกับสารละลายเกลือ ทำให้ดินเหนียวพองตัวและมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ดินเหนียว Kaolinite มีความสามารถในการดูดซึมอินทรีสารปนเปื้อนของดินเหนียวได้น้อยและสามารถปรับปรุงโดยเพิ่มดินเหนียว sepiolite ดังนั้น ดินเหนียวผสมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดี ทางด้านการรับกำลัง ค่าการซึมผ่าน และการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งอาจปรับใช้ศักยภาพนี้เป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอยได้

วรรณวรงค์ (2560) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็น ชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ โดยแปรผันอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยโดยน้ำหนักแห้งต่างๆ ได้แก่ 100:0 และ 80:20 และแปรผันระยะเวลาการบ่ม 0, 7, และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่าดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ โดยอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดคือ 80:20 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

ชัยเจริญ (2553) ได้ศึกษาดินในท้องถิ่นจังหวัดสงขลา ได้แก่ ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ดินลูกรัง และทรายผสมเบนโทไนต์ 5% เพื่อประเมินหาความเหมาะสมของการนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ ตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson (1990) จากการประเมินจากขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดพบว่า ดินที่มีความเหมาะสมในการทำไปใช้เป็นชั้นกันซึมมากที่สุด โดยเรียงจากความเหมาะสมมากไปน้อย ได้แก่ ดินเหนียวทะเล ดินเหนียวนา ดินลูกรัง และทรายผสมเบนโทไนต์ 5%

Osinubi and Nwaiwu (2006) ได้ศึกษาการออกแบบดินลูกรังบดอัดเป็นชั้นกันซึม โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการบดอัดดินลูกรัง ของชั้นกันซึมโดยมีดินตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างกัน โดยสร้างขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมและขอบเขตที่ยอมรับได้แบบใหม่บนพื้นฐานของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน

ความสามารถที่จะหดตัวและกำลังรับแรงเฉือนของดิน เปรียบเทียบได้ดังนี้ แบบดั้งเดิมเมื่อพิจารณาการบดอัดโดยใช้ปริมาณน้ำ 0 - 4 % ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านไม่เกิน 1×10^{-9} cm/s ซึ่งเป็นการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ให้น้ำซึมผ่านอย่างเดียว ส่วน Daniel and Benso (1990) พิจารณาตัวแปร 3 ตัว คือ 1) สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน $< 1 \times 10^{-9}$ cm/s) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร $< 4\%$ 3) กำลังรับแรงเฉือนของดิน > 200 kPa ทำให้สามารถนำไปใช้งานและควบคุมการก่อสร้างได้

Yahia E.-A.Mohamedzein (2005) ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้หินดินดานที่บดแล้วเป็นวัสดุปูพื้นสำหรับฝังกลบ หินดินดานสองประเภทได้รับการศึกษาโดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังต่อไปนี้ การซึมผ่านของน้ำ การบดอัด การบวม การรวมกัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ทางเคมี สำหรับหินบดอัดทั้งสองแบบ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ที่ 1×10^{-7} ซม./วินาทีหรือน้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุปูพื้นฝังกลบ เมื่อหินดินดานบดอัดแน่นสัมผัสกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ การอัดตัวของดินเหนียวอัดแน่นอยู่ในระดับต่ำ และคาดว่าจะไม่มีการทรุดตัวหลังการก่อสร้างที่ร้ายแรง แรงเฉือนของหินดินดานอัดแน่นอยู่ในขอบเขตที่คาดหวังตามปกติสำหรับวัสดุกันดิน ดังนั้นจึงไม่น่าจะมีปัญหาใด ๆ เกี่ยวกับแรงเฉือน

Noureddine Hamdi (2013) ได้ศึกษาดินเหนียวธรรมชาติสามชนิดจากคูนิเซียเพื่อประเมินความเหมาะสมของดินสำหรับใช้เป็นวัสดุรองพื้นสำหรับสถานที่กำจัดของเสียที่เป็นกรด การตรวจสอบผลกระทบขององค์ประกอบแร่และการบดอัดทางกลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและการกำจัดฟลูออไรด์และฟอสเฟตของดินสามชนิดที่แตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินธรรมชาติทั้งสามนี้คือ 8.5×10^{-10} , 2.08×10^{-9} , 6.8×10^{-9} cm/s ตัวอย่างดินถูกบดอัดภายใต้การบดอัดต่างๆ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะลดลงตามความหนาแน่นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นสำหรับดินทั้งหมด ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในระยะยาวแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงตามเวลา

P.Harish Kumar and Reddy V.Ramya (2021) กล่าวว่าจัดการและการกำจัดขยะมูลฝอยในเขตเทศบาล (MSW) ในหลายประเทศได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก เพื่อเอาชนะความเลวร้ายต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ หลุมฝังกลบได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อทิ้งขยะลงดินและปกคลุมด้วยดิน พืชพรรณเพื่อปกป้องสิ่งแวดล้อม หลุมฝังกลบทางวิศวกรรมมีระบบต่างๆ ชั้นกันซึมที่ใช้ในหลุมฝังกลบทำหน้าที่เป็นอุปสรรคต่อน้ำ น้ำชะขยะ และของเหลวอื่นๆ ชั้นกันซึม ยังปกป้องพื้นจากความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ในการศึกษาที่ใช้ดินเหนียวอัดแน่นที่มีความหนาแน่นต่างกัน ทำการทดสอบบนดิน เช่น การทดสอบบดอัด Proctor มาตรฐานและการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ด้วยความหนาแน่นของดินที่เพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการขนส่งสารปนเปื้อนไป

ถึงบ่อเจาะจะเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ยังแสดงอัตราความแปรปรวนของความเข้มข้นของน้ำชะขยะในแต่ละบ่อในช่วงเวลาหนึ่ง

Emmanuel (2020) ดินเหนียวทะเลของมาเลเซียทั่วไปได้รับการประเมินว่ามีความเหมาะสมเป็นวัสดุรองพื้นด้านล่างเพื่อลดการไหลของน้ำชะขยะในหลุมฝังกลบที่ได้รับการออกแบบทางวิศวกรรม การทดสอบการกระจายตัว ลักษณะความเป็นพลาสติก กำลังอัดแกนเดียว ความเครียดจากการหดตัวเชิงปริมาตร การซึมผ่าน ธรณีเคมี แร่วิทยา และการทดสอบโครงสร้างจุลภาคได้ดำเนินการเพื่อจำแนกลักษณะของดินเหนียวและเพื่อประเมินศักยภาพของดินในฐานะวัสดุรองพื้นด้านล่างที่มีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยพบว่าดินเหนียวมีศักยภาพการหดตัวน้อยที่สุดและมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรงดันดินที่เกิดจากของเสีย การซึมผ่านของดินเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อมีการซึมผ่านด้วยน้ำชะขยะแต่ยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดที่ 1×10^{-8} cm/s การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบแร่วิทยาของดินไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากการซึมผ่านด้วยน้ำชะขยะ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ดินทะเลที่ศึกษาสามารถใช้เป็นวัสดุรองพื้นในหลุมฝังกลบแบบวิศวกรรมได้ ดังนั้นจึงเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้างไปใช้งานที่มีมูลค่าเพิ่ม

Ankit et al. (2020) ถ้ำลอยและเบนโทไนต์ได้รับการคัดเลือกเพื่อประเมินการใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับใช้ในถังขยะฝังกลบ ถ้ำลอยถูกเก็บรวบรวมโดยตรงจากเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตของโรงไฟฟ้าที่เมืองฟาร์กกา ประเทศอินเดีย และซื้อเบนโทไนต์จากผู้ขายในท้องถิ่น การแสดงคุณลักษณะของวัสดุทั้งสองดำเนินการตามรหัสมาตรฐานที่เกี่ยวข้องตามมาตรฐาน ASTM ถ้ำลอยจัดอยู่ในประเภท F และเบนโทไนต์จัดเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง ค่ากำลังอัดแกนเดียวและค่าการซึมผ่านของน้ำได้รับการประเมินและหาปริมาณส่วนผสมร้อยละที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เกณฑ์การออกแบบและประมาณการคือความหนาที่สอดคล้องกันสำหรับชั้นในหลุมฝังกลบ จากการศึกษาพบว่าถ้ำลอย 70% และเบนโทไนต์ 30% สามารถใช้เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการฝังกลบขยะซึ่งมีค่ากำลังอัดแกนเดียว > 200 kPa และการซึมผ่าน 1×10^{-7} cm/s เกณฑ์การศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขแนะนำความหนา 126 ถึง 154 ซม. ถ้ำลอย-เบนโทไนต์ที่มีศักยภาพในการใช้งานได้ดี วัสดุผสมไม่เพียงแต่แก้ปัญหาการป้องกันการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินและถ้ำลอยยังสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างยั่งยืนอีกด้วย

Elmira et al. (2021) ได้มีการประเมินว่าถ้ำลอยผสมดินเหนียวสามารถลดเซกการขาดแคลนดินเหนียวที่เหมาะสมในท้องถิ่นได้ ในการศึกษาผสมที่มีถ้ำลอย 60% เป็นไปตามเกณฑ์การหดตัวเชิงปริมาตร $< 4\%$ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s กำลังอัดแกนเดียว > 200 kPa และ ดัชนีความเป็นพลาสติก $< 7-10$ ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่วัดสำหรับดินเหนียวที่และดินเหนียวผสมถ้ำลอย เท่ากับ 8.7% และ 2.4% ตามลำดับ เป็นที่ชัดเจนว่า ดินเหนียวผสมถ้ำลอย

สามารถตอบสนองขีดจำกัดเกณฑ์การหดตัวเชิงปริมาตรที่ 4% ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดการหดตัวของปริมาตร

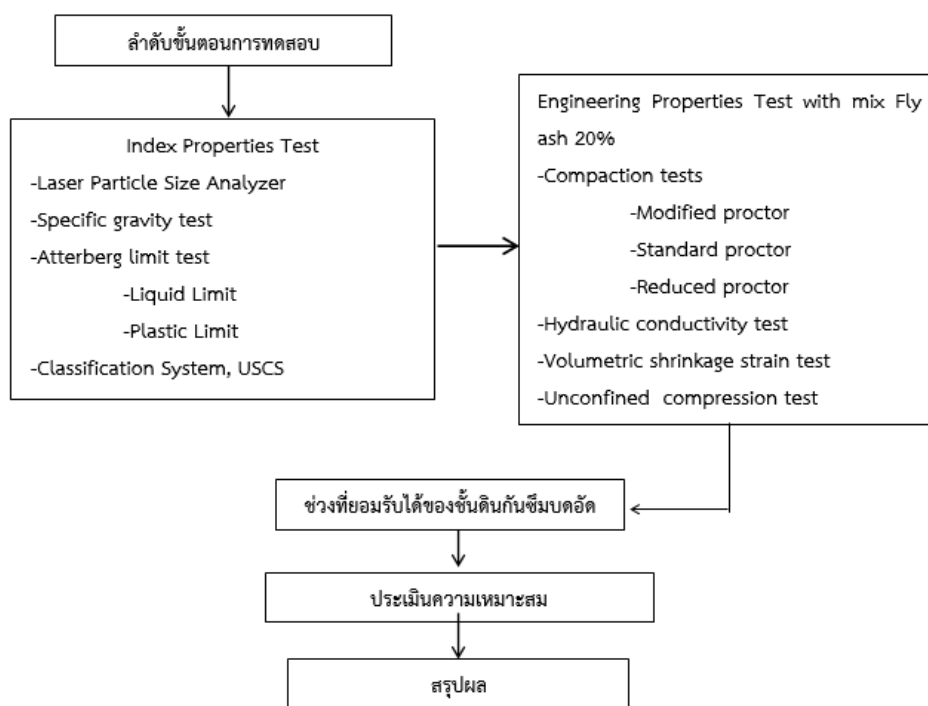
Vipul and Katoch (2016) กล่าวว่าเถ้าลอยเป็นของเสียที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าถ่านหินและหาได้ง่ายและจำเป็นต้องกำจัดอย่างปลอดภัย คุณสมบัติปอซโซลานิกและการแข็งตัวของเถ้าลอยได้ตามธรรมชาติ และได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุสำหรับบ่อฝังกลบ เถ้าลอยมีสองชั้น คือ F และ C เถ้าลอยชั้น C มีคุณสมบัติในการเกาะตัวกันในขณะที่เถ้าลอยชั้น F ไม่มีคุณสมบัติในการยึดเกาะในตัวเอง การศึกษาพบว่าด้วยการบดอัดที่เหมาะสมที่ความชื้นที่เหมาะสม เถ้าลอยสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ 1×10^{-7} cm/s เถ้าลอยสามารถออกแบบทางวิศวกรรมด้วยการเติมปูนขาวเพื่อให้ได้ความแข็งแรงที่ดีและเป็นที่ยอมรับได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 กรอบการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาการประเมินความเหมาะสมของดินท้องถิ่นในจังหวัดสงขลา สำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมดินบดอัดสำหรับสถานที่ฝังกลบ ได้จำแนกขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังรูปที่ 3-1 คือ ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติดัชนี (Index Properties Test) และคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering Properties Test) สำหรับการทดสอบคุณสมบัติดัชนี ประกอบด้วย ค่าความถ่วงจำเพาะ ปริมาณความชื้น ชีดจำกัดเหลว ชีดจำกัดพลาสติก ดัชนีพลาสติก ขนาดของเม็ดดินและจำแนกชนิดของดิน และการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดิน ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้เขียนกราฟหาช่วงที่ยอมรับได้โดยใช้วิธีของ Danial and Benson (1990) ในการวิเคราะห์ผล คือการนำช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร และเขียนขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด เพื่อประเมินดินที่เหมาะสมกับการสร้างชั้นกันซึมดินบดอัดสำหรับสถานที่ฝังกลบต่อไป



รูปที่ 3-1 กรอบการดำเนินงานวิจัย

3.2 อัตราส่วนของดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา

Sukiman et al. (2016) ได้ทำการศึกษาดินเหนียวผสมเถ้าลอยและเส้นใยของต้นปาล์มเพื่อใช้ทำชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ โดยใช้อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยที่ 10% ผลการทดสอบพบว่า ชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบผ่านตามเกณฑ์กำหนดมาตรฐาน จากงานวิจัยนี้เห็นได้ว่าการเริ่มอัตราส่วนของเถ้าลอยที่ 10% เพียงพอสำหรับทำชั้นกันซึม จึงเป็นที่มาของการคัดเลือกอัตราส่วนผสมระหว่างดินเหนียวและเถ้าลอย โดยเลือกใช้อัตราส่วนผสมของดินเหนียวและเถ้าลอยไม้ยางพารา ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ 2 อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3-1 โดยอัตราส่วนแรกใช้ดินเหนียวอย่างเดียว (เถ้าลอยไม้ยางพารา 0%) และ อัตราส่วนผสมของดินเหนียว 80% และเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ซึ่งให้ค่าคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ดีเป็นไปตามผลการศึกษาของ วรรณวรงค์ (2561) สำหรับอัตราส่วนผสม 80:20 ได้ศึกษาผลของเวลาบ่มที่ 0, 7, และ 28 วัน

โดยได้มีการคำนวณจำนวนตัวอย่างในการทดสอบทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-1 อัตราส่วนผสมระหว่างดินและเถ้าลอย

| อัตราส่วนผสม | ดินเหนียว (%) | เถ้าลอย (%) |
|--------------|---------------|-------------|
| 1 | 100 | 0 |
| 2 | 80 | 20 |

ตารางที่ 3-2 จำนวนตัวอย่างในการทดสอบ

| การทดสอบ | จำนวนตัวอย่าง | | | |
|------------------------------------|---------------|-------|----|----|
| | 100:0 | 80:20 | | |
| อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก | 100:0 | 80:20 | | |
| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | 0 | 0 | 7 | 28 |
| 1.Compaction test | | | | |
| -Modified proctor | 5 | 5 | | |
| -Standard proctor | 5 | 5 | | |
| - Reduced proctor | 5 | 5 | | |
| 2.Hydraulic conductivity test | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 3.Volumetric shrinkage strain test | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 4.Unconfiend compression test | 15 | 15 | 15 | 15 |
| รวม | 60 | 150 | | |
| รวมทั้งหมด | 210 | | | |

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การประเมินความเหมาะสมของการใช้ดินเหนียวจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา สำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย ผู้วิจัยเลือกใช้ดินเหนียวทำนางหอม ในพื้นที่ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เถ้าลอยไม้ยางพารานำมาจากบริษัท พาเนล พลาสติก จำกัด ตัวอย่างวัสดุที่นำมาทดสอบแสดงดังรูปที่ 3-2



(a)ดินเหนียวทำนางหอม



(b)เถ้าลอยไม้ยางพารา

รูปที่ 3-2 วัสดุในการทดสอบ

3.4 ทดสอบคุณสมบัติดัชนี (Index Properties Test)

- วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของสสาร ด้วยเทคนิคเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer)
- การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test) มาตรฐานการทดสอบ ASTM D854-14
- การทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลว (Atterberg limit test)
 - Liquid limit มาตรฐานการทดสอบ ASTM D4318-17
 - Plastic limit มาตรฐานการทดสอบ ASTM D4318-17
- การจำแนกดิน Classification System, USCS มาตรฐานการทดสอบ ASTM D2488-00

3.5 ทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรม Engineering Properties Tests

3.5.1 Compaction test

ประกอบด้วย การบดอัดดินตัวอย่าง 3 ชนิด ด้วยวิธี Standard Proctor ตามมาตรฐาน ASTM D698 วิธี Modified Proctor ตามมาตรฐาน ASTM D 1557 และวิธี Reduced Proctor ตามวิธี Daniel and Benson (1990)

- Modified proctor : การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จะทำการบดอัดดินตัวอย่างในกระบอกบดอัดมาตรฐาน ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว โดยใช้ก้อนมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ ระยะยก 18 นิ้ว บดอัดจำนวน 5 ชั้นเท่าๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น
- Standard proctor : การบดอัดแบบมาตรฐาน จะทำการบดอัดดินตัวอย่างในกระบอกบดอัดมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว โดยใช้ก้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ ระยะยก 12 นิ้ว บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น
- Reduced proctor : การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน จะทำการบดอัดดินตัวอย่างในกระบอกบดอัดมาตรฐาน ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว โดยใช้ก้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ ระยะยก 12 นิ้ว บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน แต่บดอัดดิน 15 ครั้งต่อชั้น

3.5.2 Hydraulic conductivity

การทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ แบบ Falling head เป็นการทดสอบมาตรฐาน ASTM D 2434-68 นำตัวอย่างผสมน้ำตามปริมาณความชื้นที่ได้จากการบดอัด วิธี Modified Proctor, Standard Proctor และ Reduced Proctor จากนั้นนำไปบรรจุใส่ถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่น ปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3-3 เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่ว จากนั้นนำไปบดอัดด้วยวิธี Modified Proctor, Standard Proctor และ Reduced Proctor ดังรูปที่ 3-4 หลังจากนั้นนำมาใช้ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ อ่านค่าระดับความสูง และปริมาณน้ำที่ไหลออกบันทึกข้อมูลทุกวัน โดยทำการทดสอบจนกระทั่งผลต่างระหว่างปริมาณน้ำที่เดิมเข้าไปและปริมาณน้ำที่ไหลออก มีค่าประมาณ 0.9-1.1 และมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านคงที่



รูปที่ 3-3 บ่มดินในถุงพลาสติก



รูปที่ 3-4 การทดสอบ Hydraulic conductivity

3.5.3 Volumetric shrinkage strain test

เป็นการทดสอบโดยทดสอบตามวิธี Daniel and Wu (1993) สามารถทดสอบได้ โดยนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม แล้วนำไปบรรจุถุงพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นบดอัดตัวอย่างดินด้วยพลังงาน

บดอัดทั้ง 3 พลังงาน จากนั้นนำตัวอย่างดินออกจากกระบอกบดอัดแล้ววางทิ้งไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกและควบคุมอุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3-5 จากนั้นทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างดินทุกๆ 12 ชั่วโมง จนกระทั่งตัวอย่างมีปริมาตรคงที่ แล้วนำผลการทดสอบที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต่อไป



รูปที่ 3-5 การทดสอบ Volumetric shrinkage strain

3.5.4 Unconfined compression test

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2166-00 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ เป็นตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมาใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 cm สูง 15.3 cm โดยใช้ความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่ได้จากการบดอัด วิธี Modified Proctor, Standard Proctor และ Reduced Proctor ถูกใช้ในการหาน้ำหนักดินแห้งและน้ำที่ใช้ทดสอบ และบ่มดินที่ผสมกับน้ำไว้ในถุงพลาสติกมัดปากถุงให้แน่น ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายเข้าไปในเนื้อดินอย่างทั่วถึงกัน บดอัดดินที่บ่มไว้ในถุงพลาสติกทั้งหมดให้เต็มแบบหล่อพอดี โดยมีการคำนวณจำนวนครั้งในการบดอัดใหม่ตามขนาดของโมลใหม่ เพื่อให้ได้พลังงานการบดอัดเท่ากับการหาปริมาณความชื้น หลังจากนั้นแกะแบบนำเข้าเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3-6 เพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียวต่อไปก่อนการทดสอบวัดขนาดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างให้ละเอียดถึง 0.01 mm. โดยใช้ Vernier Caliper สำหรับการทดสอบให้นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ โดยกดด้วยอัตราเร็ว 1 เปอร์เซนต์ของความสูงตัวอย่างต่อนาที ในระหว่างทดสอบ

ให้บันทึกขนาดน้ำหนักรีดและความสูงที่เปลี่ยนแปลง เพื่อที่จะนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว



รูปที่ 3-6 การทดสอบ Unconfined compression

3.6 ช่วงที่ยอมรับได้ (Acceptable Zone) และขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall Acceptable Zone)

ขั้นตอนการหาช่วงที่ยอมรับได้ตามสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน การหาคัดตัวเชิงปริมาตร และกำลังอัดแกนเดียวของดินตัวอย่าง และช่วงที่ยอมรับได้ทั้งหมดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.1 ทฤษฎี Daniel and Benson (1990)

3.7 การประเมินความเหมาะสมของอัตราส่วนผสมแกลบไ้มียงพารา 0% และ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน

การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดหลังจากหาช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน กำลังอัดแกนเดียว และการหาคัดตัว นำช่วงที่ยอมรับได้ทั้งสามมาซ้อนทับกัน บริเวณพื้นที่ของช่วงที่ยอมรับได้ทั้งสามซ้อนทับกันคือช่วงที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone)

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ผลการศึกษาการประเมินความเหมาะสมของการใช้ดินเหนียวจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย แบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้

4.1. ผลการศึกษาคุณสมบัติดัชนี (Index Properties)

4.2. ผลการศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรม (Engineering Properties)

4.3. ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone) ของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดและวัสดุผสมดินเหนียวกับเถ้าลอยไม้ยางพารา

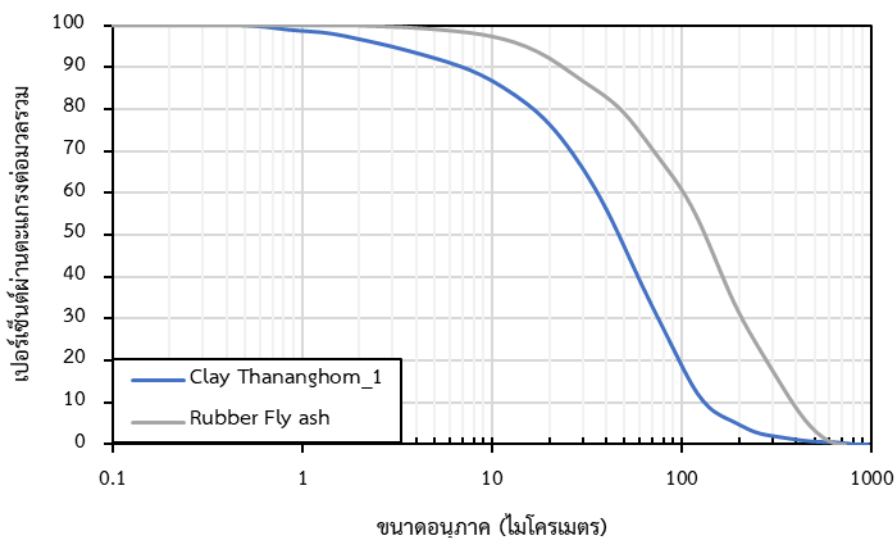
4.4. ประเมินความเหมาะสมของดินเหนียวทำนงหุ้มผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติดัชนี (Index Properties) ของดินเหนียวทำนงหุ้มและเถ้าลอยไม้ยางพารา

การศึกษาคูสมบัติดัชนีของดินเหนียวทำนงหุ้มและเถ้าลอยไม้ยางพารา ประกอบไปด้วยผลการทดสอบการหาขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL), ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit, PL), การจำแนกชนิดของดิน (Soil classification) และความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, Gs) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-1 พบว่าคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวทำนงหุ้มมีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 57.90% ค่าขีดจำกัดพลาสติก เท่ากับ 25.60% และค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 32.30% นอกจากนั้นสามารถจำแนกชนิดของดินเหนียวได้เป็นดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 และเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวทำนงหุ้มและเถ้าลอยไม้ยางพารา

| คุณสมบัติ | ดินเหนียว | เถ้าลอย | ดินเหนียวผสมเถ้าลอย |
|----------------------|-----------|---------|---------------------|
| Liquid limit (%) | 57.90 | - | 49.5 |
| Plastic limit (%) | 25.60 | - | 32.4 |
| Plasticity index (%) | 32.30 | - | 17.1 |
| Specific gravity | 2.62 | 2.58 | 2.65 |
| Classification | CH | - | - |



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงการตัวของขนาดละเอียดของดินเหนียวทำนางหอมและเถ้าลอยไม้ยางพารา

จากกราฟการกระจายตัวของขนาดละเอียด (Grain size distribution) ของดินเหนียวทำนางหอมและเถ้าลอยไม้ยางพาราแสดงดังรูปที่ 4-1 พบว่าดินเหนียวทำนางหอมมีขนาดที่ 10 ไมโครเมตร ประมาณ 86% ที่ 100 ไมโครเมตร ประมาณ 20% และเถ้าลอยไม้ยางพารามีขนาดที่ 10 ไมโครเมตร ประมาณ 98% ที่ 100 ไมโครเมตร ประมาณ 60% ซึ่งเห็นได้ว่าดินเหนียวทำนางหอมมีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยไม้ยางพารา

Danial and Wu (1993) ได้แนะนำไว้ว่าค่าขีดจำกัดเหลวของดินที่ใช้เป็นวัสดุกันซึมควรมีค่าไม่น้อยกว่า 20% เพราะยิ่งดินมีค่าจำกัดเหลวสูงยิ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของดินต่ำ จากการทดสอบพบว่าดินเหนียวทำนางหอมมีค่าเท่ากับ 57.90% จึงมีความเป็นไปได้ว่าดินเหนียวทำนางหอมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำซึ่งเหมาะสมในการใช้เป็นชั้นกันซึมได้

Danial and Benson (1990) ได้แนะนำไว้ว่าค่าดัชนีพลาสติกของดินที่ใช้เป็นวัสดุกันซึมควรมีค่าไม่น้อยกว่า 7-10% และไม่มากกว่า 30-40% เพราะดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกยิ่งสูงมากนั้น เมื่อดินแห้งจะจับตัวเป็นก้อนและเมื่อดินเปียกจะเหนียวมาก ส่งผลทำให้การบดอัดในสนามทำได้ยาก จากการทดสอบพบว่าดินเหนียวทำนางหอมมีค่าเท่ากับ 32.30% จึงมีความเป็นไปได้ว่าดินเหนียวทำนางหอมมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้วัสดุทำชั้นกันซึม

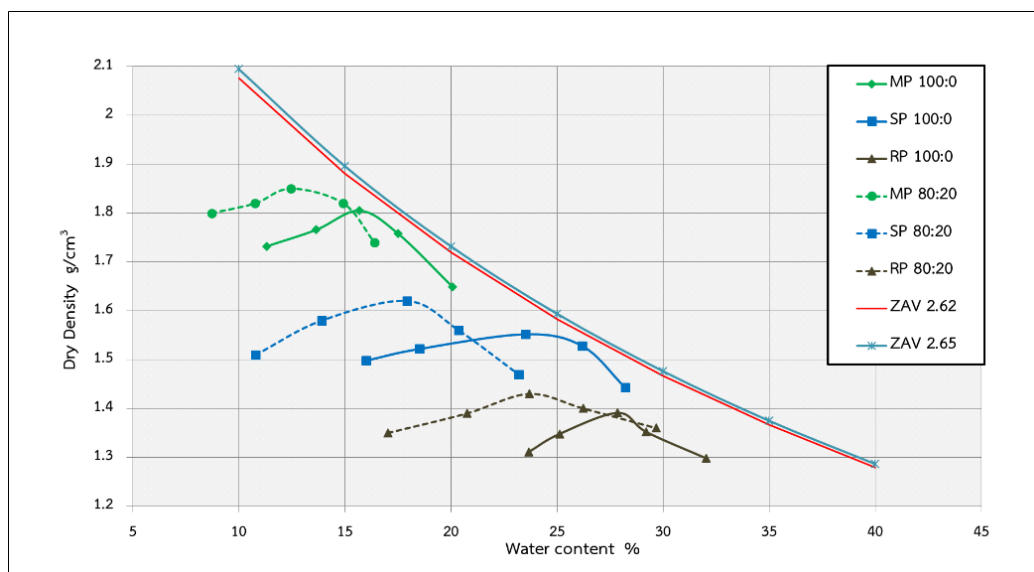
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรม (Engineering Properties)

4.2.1 ผลการทดสอบการบดอัด

ผลการทดสอบการบดอัดดินด้วยพลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงานคือแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor, MP), แบบมาตรฐาน (Standard proctor, SP) และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced proctor, RP) ซึ่งใช้พลังงานบดอัดต่อปริมาตรเท่ากับ 50% ของ SP ของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 พบว่าเมื่อพลังงานการบดอัดต่ำลง ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะลดลงและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนผสม และดินเหนียวที่มีการผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจะทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลง แสดงดังตารางที่ 4-2 ซึ่งในกราฟบดอัดแต่ละเส้นมีค่าไม่เกิน Zero Air Voids (ZAV, Gs 2.62) เป็นเส้นที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักดินแห้งของดินบดอัดในกรณีที่ดินอิมตัว แสดงดังรูปที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor

| พลังงานการบดอัด | ดินเหนียว : เถ้าลอย 100 : 0 | | ดินเหนียว : เถ้าลอย 80 : 20 | |
|-----------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--|
| | ปริมาณความชื้น w (%) | ความหนาแน่นแห้ง γ_{dry} (g/m ³) | ปริมาณความชื้น w (%) | ความหนาแน่นแห้ง γ_{dry} (g/m ³) |
| MP | 11.31 | 1.73 | 8.72 | 1.80 |
| | 13.66 | 1.76 | 10.77 | 1.82 |
| | 15.68 | 1.80 | 12.45 | 1.85 |
| | 17.51 | 1.75 | 14.92 | 1.82 |
| | 20.08 | 1.64 | 16.39 | 1.74 |
| SP | 16.00 | 1.49 | 10.8 | 1.50 |
| | 18.52 | 1.52 | 13.92 | 1.58 |
| | 23.51 | 1.55 | 17.94 | 1.62 |
| | 26.19 | 1.52 | 20.37 | 1.56 |
| | 28.21 | 1.44 | 23.20 | 1.47 |
| RP | 23.66 | 1.31 | 17.03 | 1.35 |
| | 25.12 | 1.34 | 20.75 | 1.39 |
| | 27.86 | 1.39 | 23.69 | 1.43 |
| | 29.21 | 1.35 | 26.25 | 1.40 |
| | 32.03 | 1.29 | 29.68 | 1.36 |



รูปที่ 4-2 กราฟการบดอัดในอัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอยไม้ยางพารา 100:0 และ 80:20

ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Modified proctor ของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 จากตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นถึงค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_{drymax}) ที่ 1.8 g/m^3 และ 1.85 g/m^3 ตามลำดับ และปริมาณความชื้นสูงสุด (W_{opt}) ที่ 15.68% และ 12.45% ตามลำดับ

ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Standard proctor ของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 จากตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นถึงค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_{drymax}) ที่ 1.55 g/m^3 และ 1.62 g/m^3 ตามลำดับ และปริมาณความชื้นสูงสุด (W_{opt}) ที่ 23.51% และ 17.94% ตามลำดับ

ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Standard proctor ของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 จากตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นถึงค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_{drymax}) ที่ 1.39 g/m^3 และ 1.43 g/m^3 ตามลำดับ และปริมาณความชื้นสูงสุด (W_{opt}) ที่ 27.86% และ 23.69% ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 ค่าน้ำหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของการบดอัดด้วยวิธี Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor

| วิธีการบดอัด | อัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้า ไม้ยางพารา | W_{opt} (%) | γ_{dmax} (g/m ³) |
|--------------|---|---------------|-------------------------------------|
| MP | 100:0 | 15.68 | 1.80 |
| | 80:20 | 12.45 | 1.85 |
| SP | 100:0 | 23.51 | 1.55 |
| | 80:20 | 17.94 | 1.62 |
| RP | 100:0 | 27.86 | 1.39 |
| | 80:20 | 23.69 | 1.43 |

4.2.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่าที่อัตราส่วน 100:0 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s และเมื่อเพิ่มพลังงานบดอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำยิ่งลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าไม้ลอยยางพาราที่ผสมเข้าไปในสัดส่วน 20% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s เช่นกัน แต่ระยะเวลาการบ่มไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เพราะด้วยตัวดินเหนียวเองนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำอยู่แล้ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วรรณวรงค์ (2561) เนื่องจากเถ้าลอยไม้ยางพาราเข้าไปทำให้พื้นที่ช่องว่างภายในดินเหนียวลดลงเมื่อทำการบดอัดทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงทำให้ดินผสมเถ้าลอยไม้ยางพารามีความทึบน้ำมากขึ้น ทั้งนี้ในอัตราส่วน 0% และ 20% ที่การบดอัดทั้ง 3 พลังงานจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson (1990)

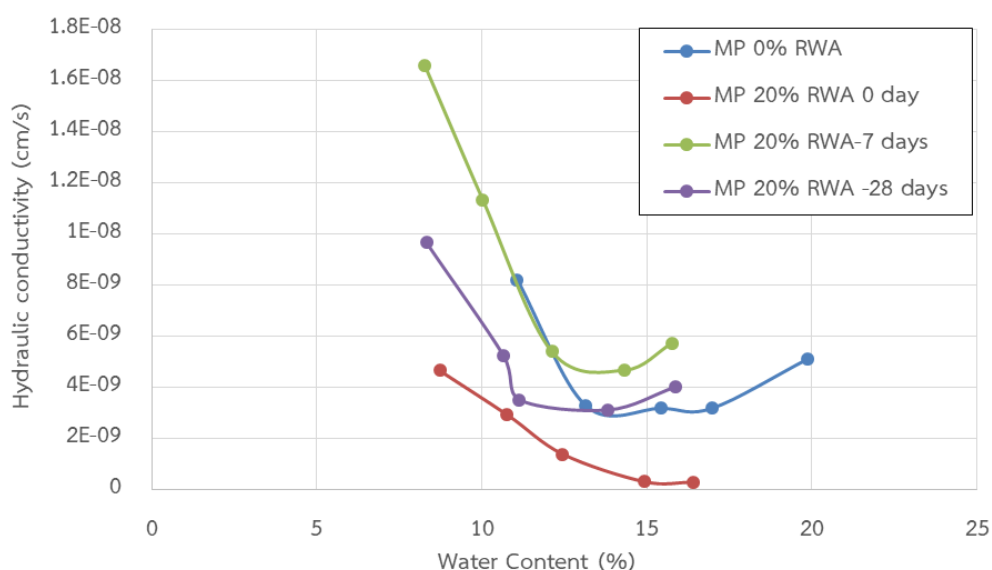
ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

| พลังงานการบดอัด | ดินเหนียว : etailoy 100 : 0 | | ดินเหนียว : etailoy 80 : 20 | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|
| | | | ระยะบ่ม 0 วัน | | ระยะบ่ม 7 วัน | | ระยะบ่ม 28 วัน | |
| | ปริมาณ ความ ชื้น w (%) | k (cm/s) | ปริมาณ ความ ชื้น w (%) | k (cm/s) | ปริมาณ ความ ชื้น w (%) | k (cm/s) | ปริมาณ ความ ชื้น w (%) | k (cm/s) |
| MP | 11.07 | 8.216×10^{-9} | 7.43 | 4.658×10^{-9} | 8.27 | 1.658×10^{-8} | 8.32 | 9.658×10^{-9} |
| | 13.15 | 3.287×10^{-9} | 10.11 | 2.932×10^{-9} | 10.03 | 1.132×10^{-8} | 10.65 | 5.246×10^{-9} |
| | 15.43 | 3.190×10^{-9} | 11.36 | 1.395×10^{-9} | 12.12 | 5.395×10^{-9} | 11.13 | 3.526×10^{-9} |
| | 16.98 | 3.190×10^{-9} | 13.36 | 3.190×10^{-10} | 14.33 | 4.680×10^{-9} | 13.82 | 3.122×10^{-9} |
| | 19.87 | 5.115×10^{-9} | 15.79 | 3.012×10^{-10} | 15.75 | 5.726×10^{-9} | 15.87 | 4.028×10^{-9} |
| SP | 15.86 | 1.425×10^{-8} | 10.13 | 1.658×10^{-8} | 10.08 | 2.658×10^{-8} | 10.33 | 2.558×10^{-8} |
| | 17.33 | 1.291×10^{-8} | 12.75 | 8.932×10^{-9} | 13.13 | 9.246×10^{-9} | 12.75 | 1.324×10^{-8} |
| | 22.76 | 1.091×10^{-8} | 16.47 | 7.395×10^{-9} | 17.54 | 4.266×10^{-9} | 16.21 | 5.526×10^{-9} |
| | 25.76 | 5.826×10^{-9} | 19.65 | 2.012×10^{-9} | 20.07 | 6.068×10^{-9} | 19.65 | 3.068×10^{-9} |
| | 27.33 | 7.298×10^{-9} | 22.33 | 3.190×10^{-9} | 22.76 | 7.287×10^{-9} | 22.45 | 3.872×10^{-9} |
| RP | 23.44 | 1.658×10^{-8} | 16.10 | 5.425×10^{-8} | 16.46 | 4.553×10^{-8} | 16.25 | 4.455×10^{-8} |
| | 25.01 | 8.932×10^{-9} | 19.32 | 3.425×10^{-8} | 20.22 | 2.455×10^{-8} | 19.32 | 3.253×10^{-8} |
| | 26.38 | 7.395×10^{-9} | 22.17 | 2.425×10^{-8} | 23.37 | 1.255×10^{-8} | 22.78 | 1.523×10^{-8} |
| | 29.11 | 8.190×10^{-9} | 25.03 | 2.165×10^{-8} | 25.78 | 1.654×10^{-8} | 25.33 | 1.365×10^{-8} |
| | 31.86 | 1.012×10^{-8} | 28.35 | 2.318×10^{-8} | 29.13 | 1.811×10^{-8} | 28.38 | 1.511×10^{-8} |

- ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำด้วยวิธีการบดอัดแบบ

Modified Proctor

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในอัตราส่วนดินเหนียวทำางหอมผสมetailoyไม่ียงพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับทำางกันซึมดินเหนียวบดอัด (1×10^{-7} cm/s) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวทำางหอมผสมetailoyไม่ียงพาราที่ต่ำที่สุดแต่ละอัตราส่วนมีดังนี้ ที่อัตราส่วนผสมetailoyไม่ียงพารา 0% 3.190×10^{-9} ที่อัตราส่วนผสมetailoyไม่ียงพารา 20% ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน คือ 3.012×10^{-10} , 4.680×10^{-9} และ 3.122×10^{-9} ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4-3

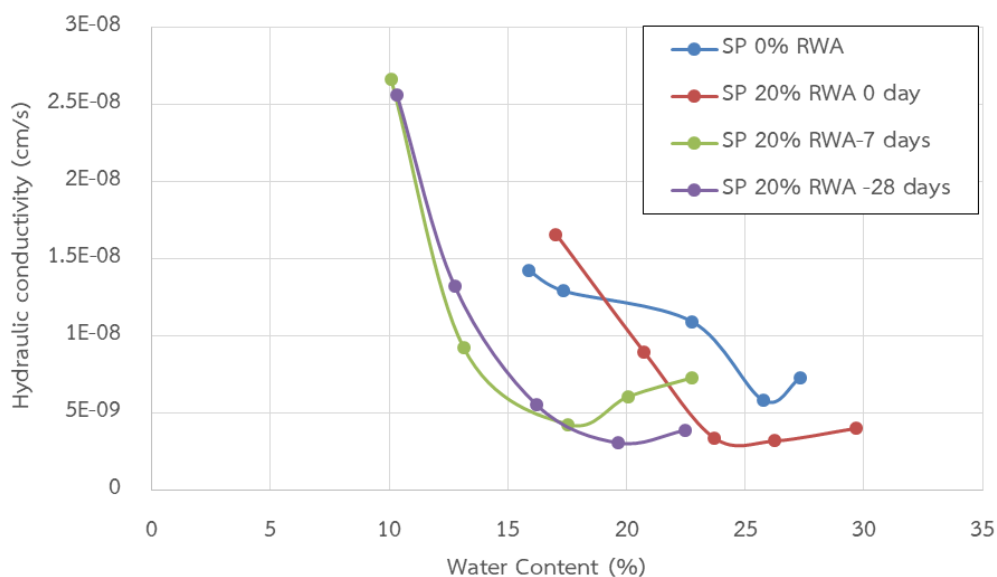


รูปที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content บดอัดแบบ Modified Proctor

- ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำด้วยวิธีการบดอัดแบบ

Standard Proctor

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม่ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับทำชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (1×10^{-7} cm/s) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม่ยางพาราแต่ละอัตราส่วนมีดังนี้ ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ยางพารา 0% 5.823×10^{-9} cm/s ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ยางพารา 20% ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน คือ 2.012×10^{-9} cm/s, 4.266×10^{-9} cm/s และ 3.068×10^{-9} cm/s ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4-4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะเวลาบ่มไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณของเถ้าลอยไม่ยางพาราส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนดินเหนียว 100%

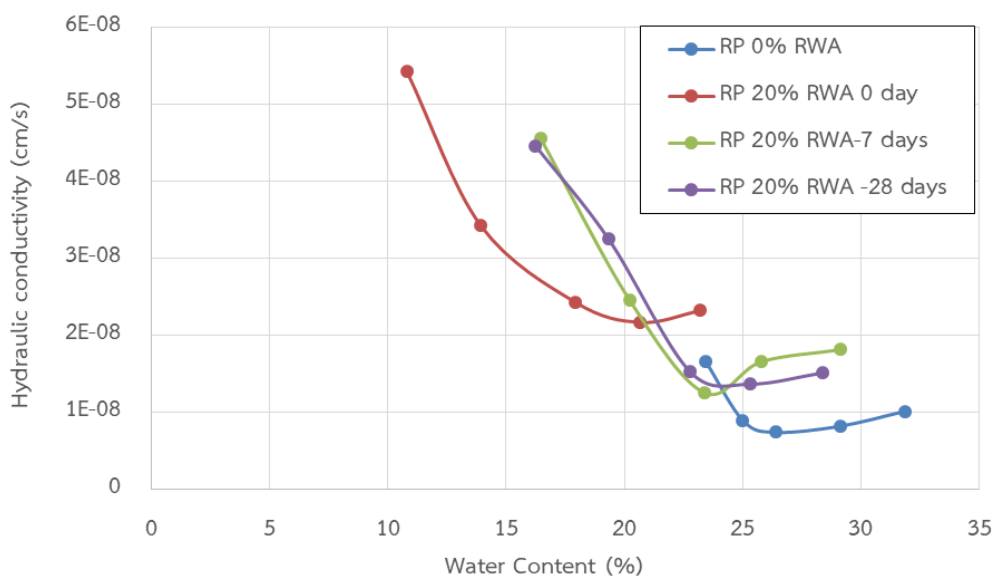


รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content บดอัดแบบ Standard Proctor

- ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำด้วยวิธีการบดอัดแบบ

Reduced proctor

จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับทำชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (1×10^{-7} cm/s) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราแต่ละอัตราส่วนมีดังนี้ ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% 7.395×10^{-9} ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน คือ 2.165×10^{-8} , 1.255×10^{-8} และ 1.365×10^{-8} ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content บดอัดแบบ Reduced proctor

4.2.3 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวทำางผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4-5 พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานในการบดอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาในกรณีเพิ่มเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดแกนเดียวสูงขึ้น เพราะเถ้าลอยไม้ยางพารา มีคุณสมบัติเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) คือมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูงจะเกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ SiO_2 และ Al_2O_3 เกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานให้เนื้อดินติดกันแน่น คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และแคลเซียมอะลูมินาตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ซึ่งทำให้ส่งผลต่อกำลังอัดแกนเดียวมีค่าที่สูงขึ้น และค่ากำลังอัดแกนเดียวจากการทดสอบส่วนใหญ่ในอัตราส่วนดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ 20% มีค่าที่มากกว่า 200 kPa ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson (1990)

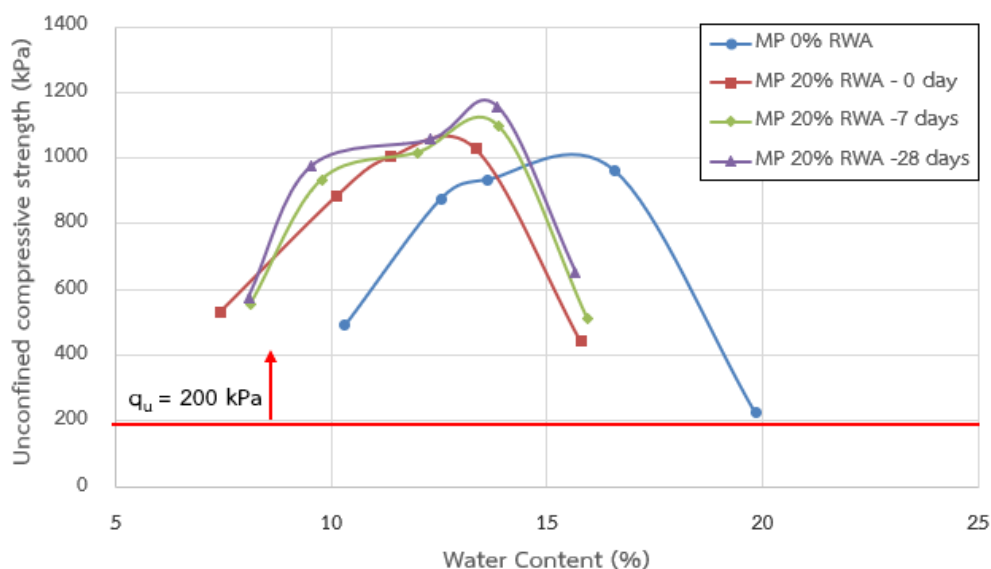
ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

| พลังงานการบดอัด | ดินเหนียว : etailoy 100 : 0 | | ดินเหนียว : etailoy 80 : 20 | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| | | | ระยะบ่ม 0 วัน | | ระยะบ่ม 7 วัน | | ระยะบ่ม 28 วัน | |
| | ปริมาณความชื้น w (%) | q _u (kPa) | ปริมาณความชื้น w (%) | q _u (kPa) | ปริมาณความชื้น w (%) | q _u (kPa) | ปริมาณความชื้น w (%) | q _u (kPa) |
| MP | 10.32 | 493.262 | 7.43 | 532.865 | 8.12 | 553.370 | 8.08 | 577.332 |
| | 12.54 | 875.633 | 10.11 | 883.032 | 9.78 | 934.753 | 9.53 | 974.972 |
| | 13.63 | 934.265 | 11.36 | 1003.442 | 12.01 | 1016.970 | 12.31 | 1056.609 |
| | 16.58 | 961.094 | 13.36 | 1028.756 | 13.88 | 1097.262 | 13.84 | 1157.235 |
| | 19.85 | 226.021 | 15.79 | 443.551 | 15.93 | 513.612 | 15.66 | 653.722 |
| SP | 15.33 | 113.450 | 10.13 | 201.191 | 9.71 | 210.864 | 10.01 | 209.804 |
| | 17.13 | 129.408 | 12.75 | 227.028 | 12.53 | 344.328 | 13.53 | 364.308 |
| | 23.05 | 188.612 | 16.47 | 338.106 | 16.11 | 526.215 | 16.21 | 924.255 |
| | 25.84 | 109.028 | 19.65 | 326.812 | 19.45 | 641.124 | 19.45 | 701.465 |
| | 28.14 | 89.008 | 22.33 | 208.4926 | 22.81 | 389.463 | 23.11 | 409.353 |
| RP | 23.06 | 95.704 | 16.10 | 108.565 | 16.75 | 114.311 | 16.13 | 214.311 |
| | 25.05 | 76.014 | 19.32 | 121.336 | 19.28 | 132.565 | 19.54 | 232.565 |
| | 26.51 | 36.955 | 22.17 | 181.332 | 22.45 | 205.475 | 22.81 | 305.475 |
| | 28.94 | 28.407 | 25.03 | 174.687 | 25.39 | 181.412 | 25.38 | 481.412 |
| | 31.31 | 23.725 | 28.35 | 132.558 | 28.75 | 154.155 | 28.22 | 454.155 |

- ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวด้วยวิธีการบดอัดแบบ Modified

Proctor

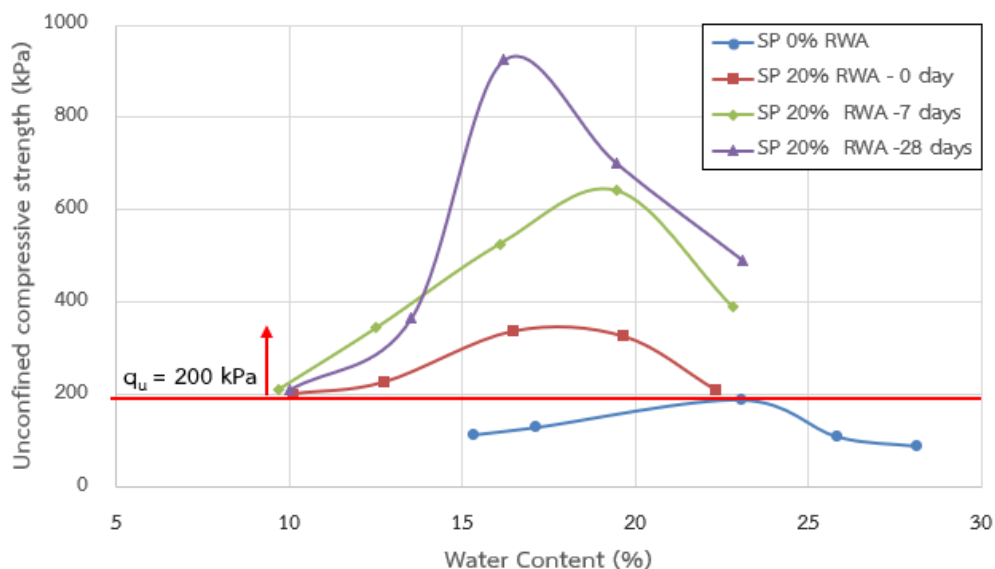
จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมetailoyไม่ียงพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-6 พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ 200 kPa ทุกช่วงปริมาณความชื้น ระยะเวลาการบ่มส่งผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวคือเมื่อระยะเวลาบ่มที่นานขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดคือ อัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมetailoyไม่ียงพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าอยู่ที่ 1157.235 kPa ที่ความชื้น 13.84%



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content บดอัดแบบ Modified Proctor

- ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวด้วยวิธีการบดอัดแบบ Standard Proctor

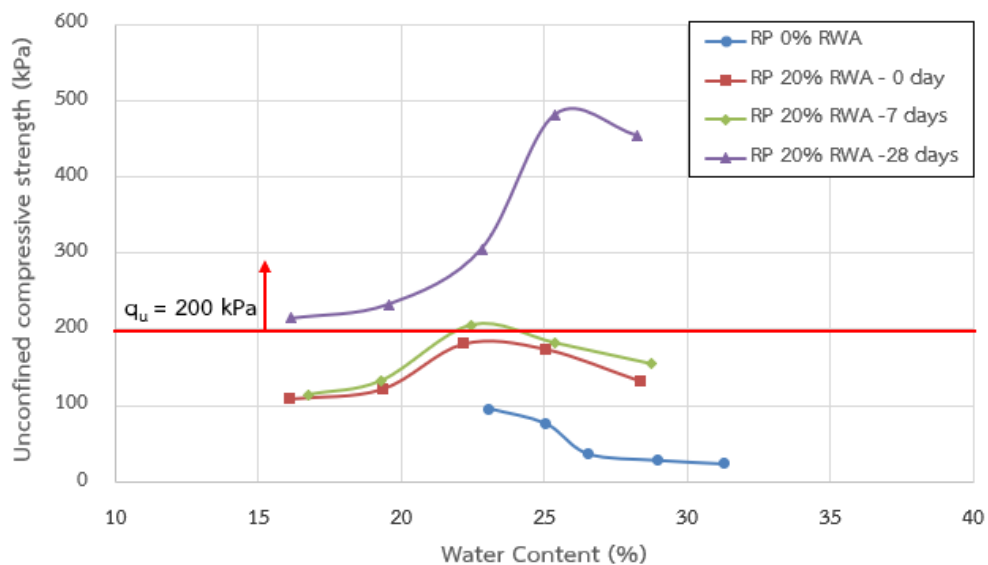
จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-7 พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% มีค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่ผ่านกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ 200 kPa ในทุกช่วงปริมาณความชื้น และพบอีกว่าในอัตราส่วนเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ 20% ทุกๆระยะเวลามีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ในทุกช่วงปริมาณความชื้น และระยะเวลาการบ่มมีผลต่อค่ากำลังอัด ยิ่งบ่มเป็นเวลานานทำให้ค่ากำลังอัดยิ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดคือ อัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าอยู่ที่ 924.255 kPa ที่ความชื้น 16.21%



รูปที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content บดอัดแบบ Standard Proctor

- ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวด้วยวิธีการบดอัดแบบ Reduced proctor

จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-8 พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% และ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน มีค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่ผ่านกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ 200 kPa ในทุกช่วงปริมาณความชื้น และในอัตราส่วนเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันมีค่ากำลังอัดผ่านกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ 200 kPa ในทุกช่วงปริมาณความชื้น และเห็นได้ว่าระยะเวลาบ่มมีผลต่อค่ากำลังอัด ซึ่งมีค่ากำลังอัดแกนเดียวสูงสุดอยู่ที่ 481.412 kPa ที่ความชื้น 25.38%



รูปที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content บดอัดแบบ Reduced proctor

4.2.4 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 100:0 พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะยิ่งเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการเพิ่มเถ้าลอยไม้ยางพาราลงไปผสมที่อัตราส่วน 80:20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะลดลงอย่างชัดเจน โดยส่วนใหญ่มีค่าการหดตัวน้อยกว่า 4% ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson (1990) ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

| พลังงานการบดอัด | ดินเหนียว : etailoy 100 : 0 | | ดินเหนียว : etailoy 80 : 20 | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| | | | ระยะบ่ม 0 วัน | | ระยะบ่ม 7 วัน | | ระยะบ่ม 28 วัน | |
| | ปริมาณความชื้น w (%) | ϵ_v (%) | ปริมาณความชื้น w (%) | ϵ_v (%) | ปริมาณความชื้น w (%) | ϵ_v (%) | ปริมาณความชื้น w (%) | ϵ_v (%) |
| MP | 10.22 | 6.642 | 8.65 | 1.89 | 8.53 | 2.38 | 7.50 | 2.18 |
| | 12.58 | 8.898 | 9.73 | 2.24 | 9.13 | 2.63 | 9.35 | 2.23 |
| | 13.7 | 9.046 | 11.23 | 2.84 | 11.08 | 3.32 | 11.01 | 3.02 |
| | 16.45 | 13.215 | 13.08 | 4.31 | 13.10 | 4.51 | 13.18 | 3.98 |
| | 19.23 | 17.383 | 15.22 | 5.68 | 15.17 | 5.26 | 15.27 | 5.11 |
| SP | 14.65 | 11.995 | 8.91 | 2.25 | 8.55 | 2.55 | 8.75 | 2.13 |
| | 17.13 | 12.893 | 12.32 | 2.63 | 12.43 | 3.42 | 12.43 | 3.22 |
| | 22.05 | 13.495 | 16.75 | 3.18 | 16.43 | 3.83 | 16.12 | 3.59 |
| | 25.84 | 16.030 | 19.87 | 3.68 | 19.53 | 4.67 | 19.42 | 3.75 |
| | 28.04 | 17.252 | 22.01 | 4.10 | 21.67 | 5.32 | 21.33 | 4.68 |
| RP | 22.06 | 13.846 | 16.54 | 2.42 | 16.43 | 2.91 | 16.12 | 2.31 |
| | 24.75 | 17.252 | 18.72 | 2.63 | 18.43 | 3.38 | 19.93 | 3.19 |
| | 26.51 | 22.145 | 22.35 | 3.58 | 22.12 | 3.62 | 22.02 | 3.35 |
| | 27.94 | 23.529 | 25.18 | 3.61 | 24.98 | 4.11 | 25.30 | 3.86 |
| | 31.11 | 25.111 | 28.75 | 4.55 | 28.45 | 5.88 | 28.55 | 5.32 |

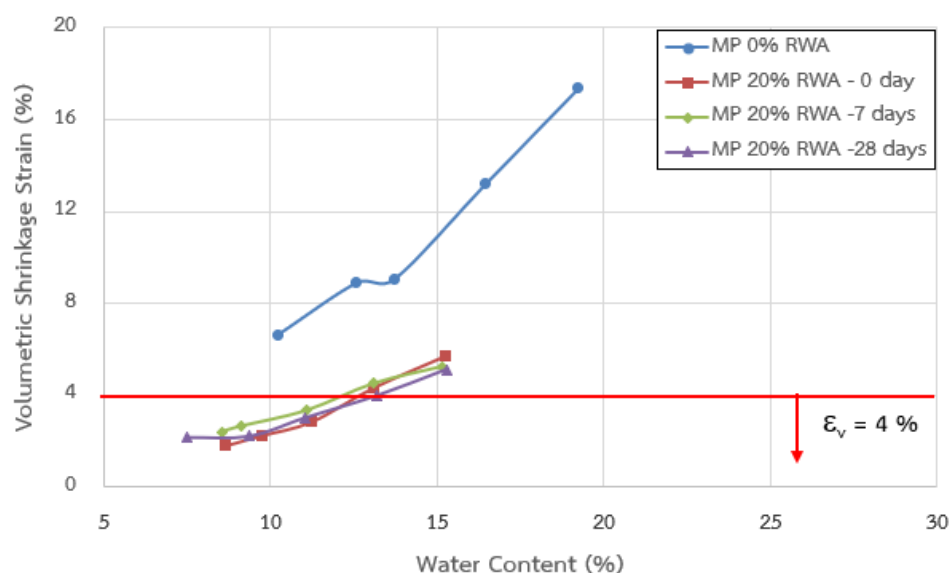
หมายเหตุ : ϵ_v = การหดตัวเชิงปริมาตร

- ผลการทดสอบค่าหดตัวเชิงปริมาตรด้วยวิธีการบดอัดแบบ Modified

Proctor

จากผลการทดสอบพบว่าค่าหดตัวเชิงปริมาตรในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมetailoyไม่ียงพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-9 พบว่าค่าหดตัวเชิงปริมาตรที่อัตราส่วนผสมetailoyไม่ียงพาราที่ 0% ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเพราะมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ 4% ที่อัตราส่วนผสมetailoyไม่ียงพารา 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรก็จะเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานการบดอัด และเมื่อเพิ่มปริมาณetailoyไม่ียงพาราและ

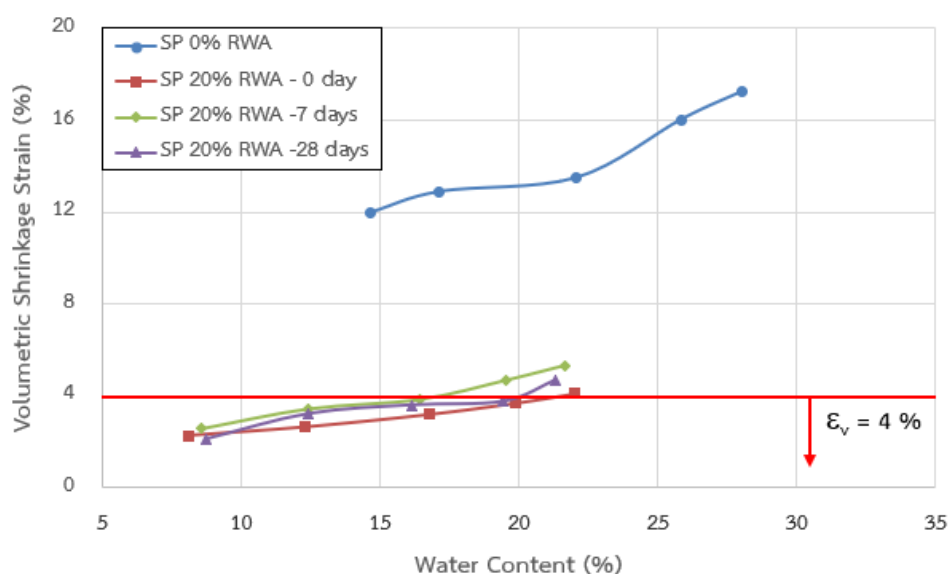
ระยะเวลาการบ่ม ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะลดลงเกือบครึ่งหนึ่งอย่างชัดเจนซึ่งค่าการหดตัวที่ช่วงปริมาณความชื้น 13.08% – 15.27% พบว่าค่าการหดตัวเชิงปริมาตร อยู่ในช่วง 4.31% – 5.68% ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนดไว้และที่ช่วงปริมาณความชื้น 7.50% - 11.23% พบว่าค่าการหดตัวเชิงปริมาตร อยู่ในช่วง 1.89% - 3.32% มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content บดอัดแบบ Modified Proctor

- ผลการทดสอบค่าหดตัวเชิงปริมาตรด้วยวิธีการบดอัดแบบ Standard Proctor

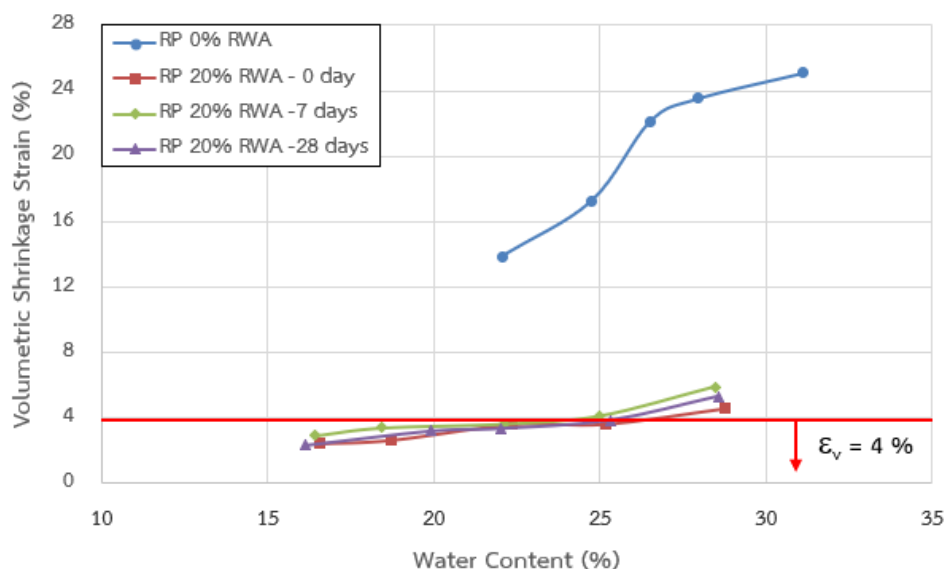
จากผลการทดสอบพบว่าค่าหดตัวเชิงปริมาตรในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-10 พบว่าค่าหดตัวเชิงปริมาตรที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ 0% ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเพราะมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ 4% ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรก็จะเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ขึ้นอยู่กับการบดอัด และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราและระยะเวลาการบ่ม ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะลดลง ซึ่งค่าการหดตัวที่ช่วงปริมาณความชื้น 19.53% – 22.01% พบว่าค่าการหดตัวเชิงปริมาตร อยู่ในช่วง 4.10% – 5.32% ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนดไว้ และที่ช่วงปริมาณความชื้น 8.55% - 19.87% พบว่าค่าการหดตัวเชิงปริมาตร อยู่ในช่วง 2.13% - 3.83% มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content บดอัดแบบ Standard Proctor

- ผลการทดสอบค่าหาคัดตัวเชิงปริมาตรด้วยวิธีการบดอัดแบบ Reduced proctor

จากผลการทดสอบพบว่าค่าหาคัดตัวเชิงปริมาตรในอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0,7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4-11 พบว่าค่าหาคัดตัวเชิงปริมาตรที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ 0% ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเพราะมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ 4% ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ที่ช่วงปริมาณความชื้น 24.98% – 28.75% พบว่าค่าการหาคัดตัวเชิงปริมาตร อยู่ในช่วง 4.11% – 5.88% ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนดไว้และที่ช่วงปริมาณความชื้น 16.12% - 25.30% พบว่าค่าการหาคัดตัวเชิงปริมาตร อยู่ในช่วง 2.31% - 3.86% มีค่าการหาคัดตัวเชิงปริมาตรที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ และสังเกตได้ว่ายิ่งเพิ่มปริมาณความชื้นค่าการหาคัดตัวเชิงปริมาตรยิ่งสูงกว่า 4%



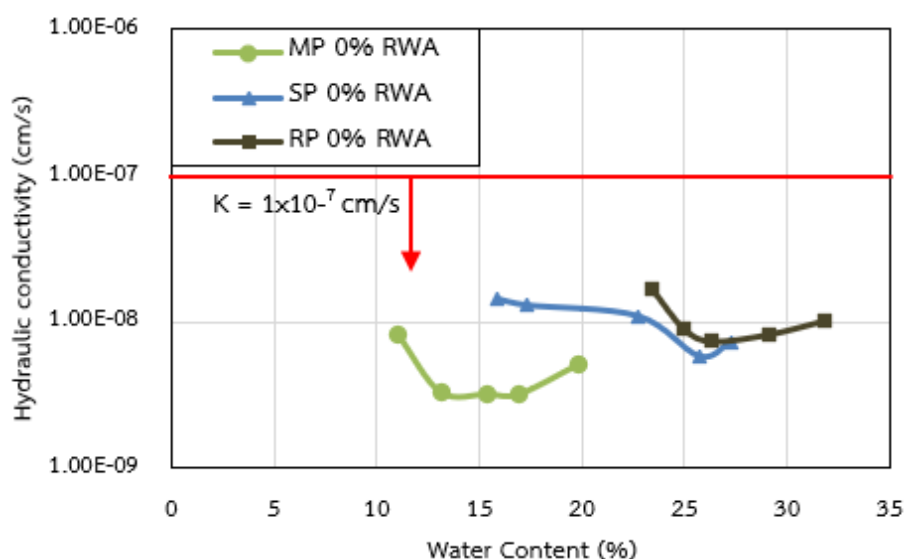
รูปที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content บดอัดแบบ Reduced proctor

4.3 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone)

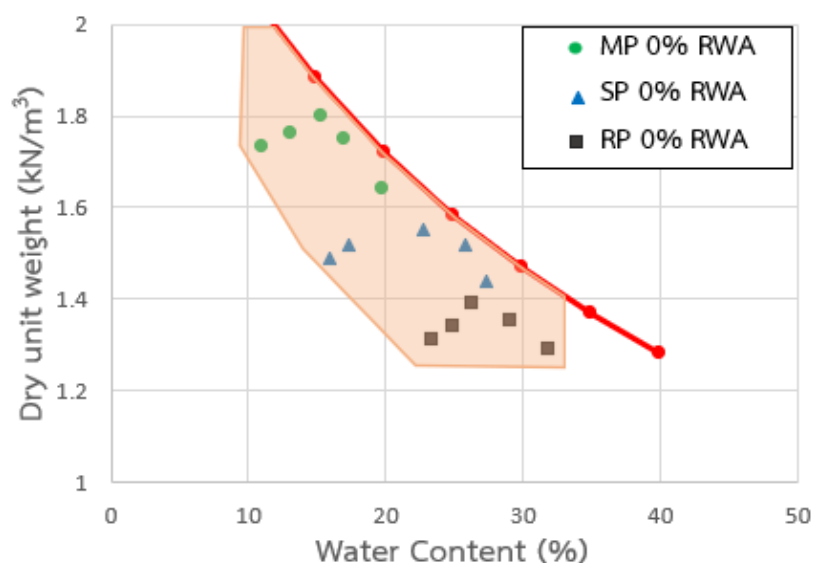
ตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson (1990) ได้กำหนดขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดไว้ 3 ข้อ คือ (1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน 1×10^{-7} cm/s (2) ค่ากำลังอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และ (3) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต้องมีค่าไม่เกิน 4% ในการพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะสมทำได้โดยการนำพื้นที่ผลการทดสอบต่างๆ ในส่วนที่ผ่านข้อกำหนดมาซ้อนทับกัน ทั้ง 3 ข้อกำหนด แสดงในรูปแบบของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone)

4.3.1 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม่ยางพาราที่ 100 : 0

- ผลช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน 1×10^{-7} cm/s ซึ่งพบว่าพลังงานในการบดอัดดินทั้งแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor ทุกๆช่วงปริมาณความชื้น มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4-12 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยแสดงสัญลักษณ์แบบทับกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-13



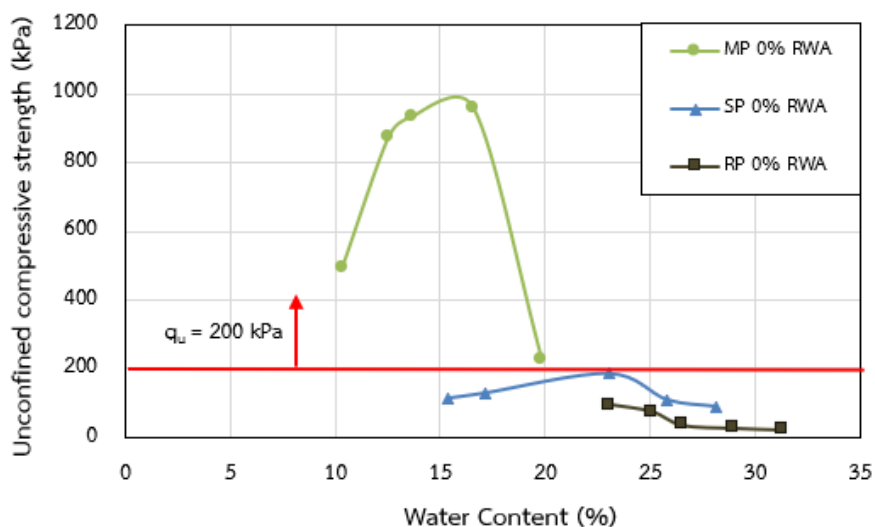
รูปที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน



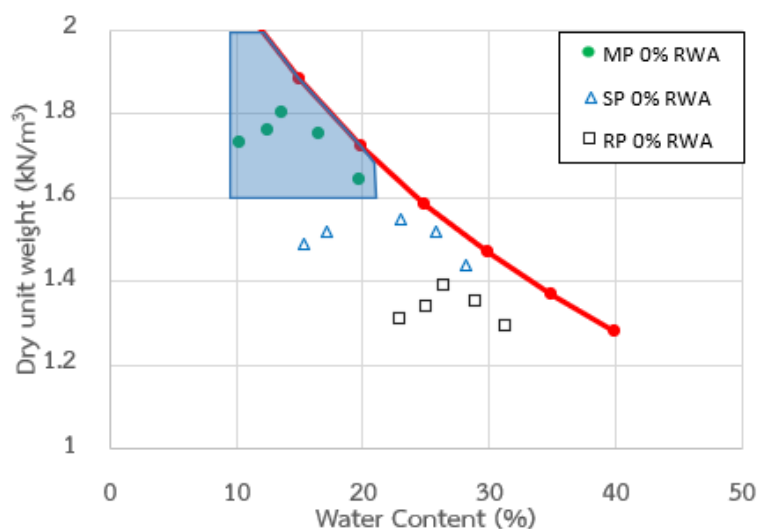
รูปที่ 4-13 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน

- ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินแบบ Modified proctor มีค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดทุกๆช่วงความชื้น อย่างไรก็ตามสำหรับพลังงานการบดอัดแบบ Standard proctor และ Reduced proctor ทุกๆช่วงปริมาณความชื้น มีค่ากำลังอัดแกนเดียวที่น้อยกว่า 200 kPa ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4-14 และกราฟที่แสดงช่วงที่

ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-15



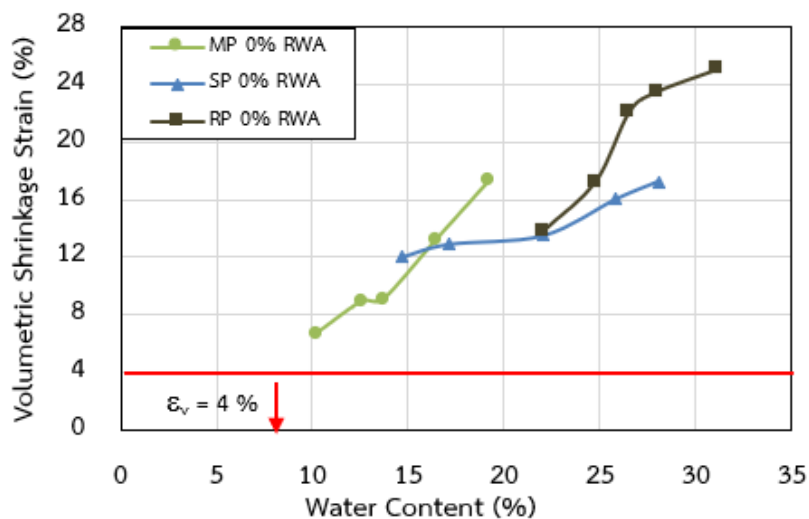
รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน



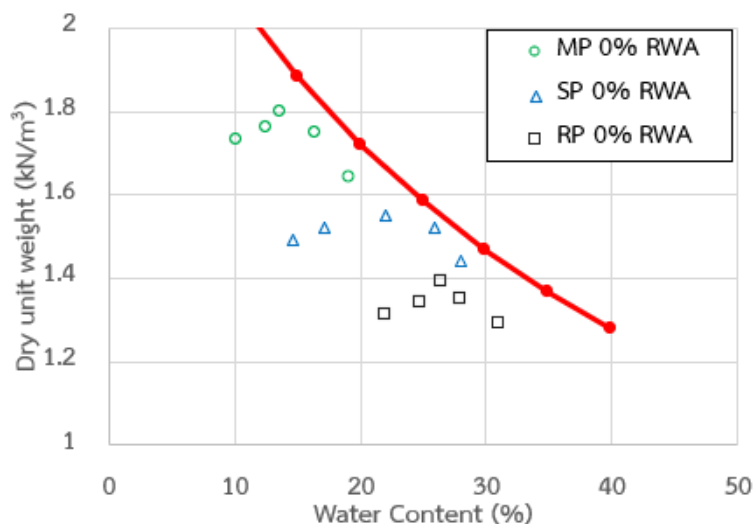
รูปที่ 4-15 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน

- ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้น้อยกว่า 4% ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินทั้งแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor ทุกๆช่วงปริมาณความชื้น มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4-16 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิง

ปริมาตร โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปรงกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-17



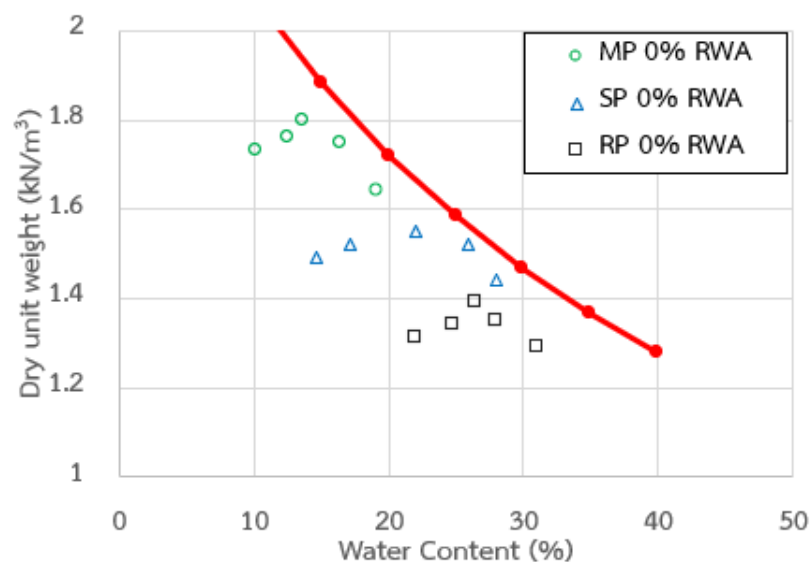
รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 4-17 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน

- ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) จากการนำกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวและช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกันทั้ง 3 พื้นที่จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้

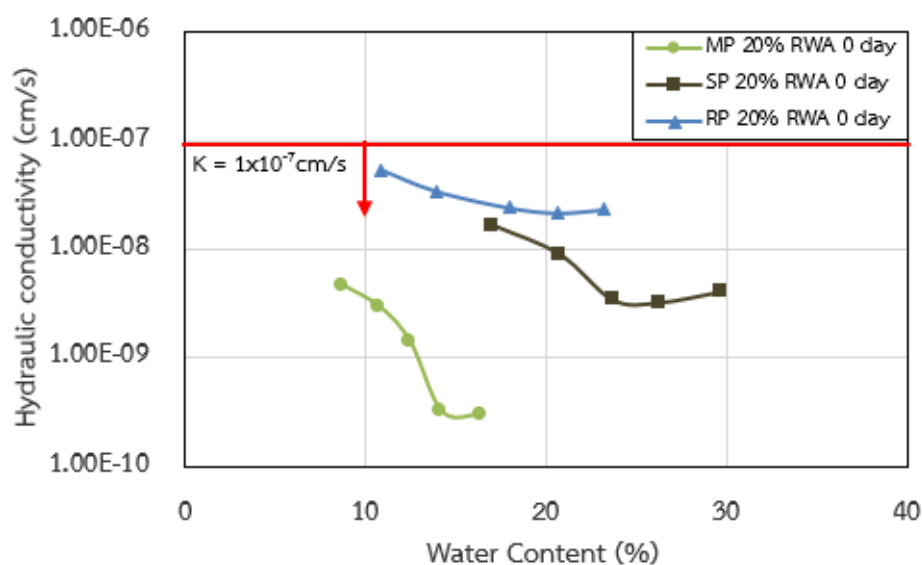
ทั้งหมด ซึ่งจากรูปที่ 4-18 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนดินเหนียวทำางหอมผสมเถ้าลอยไม่ยางพารา 100:0 ไม่มีพื้นที่ที่ยอมรับได้ทั้งหมด จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด เพราะจะมีปัญหาของการหดตัว ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญในการทำชั้นกันซึม



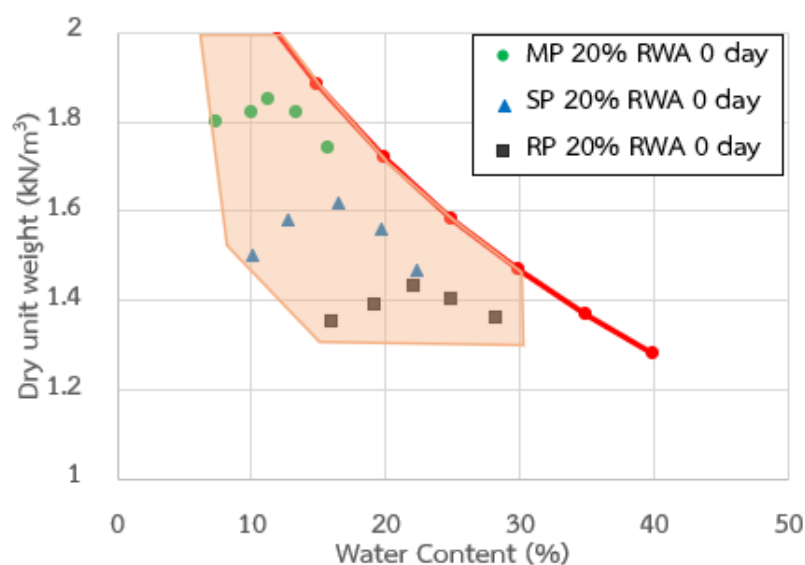
รูปที่ 4-18 กราฟแสดงว่าไม่มีพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน

4.3.2 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำางหอมผสมเถ้าลอยไม่ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน 1×10^{-7} cm/s ซึ่งพบว่าพลังงานในการบดอัดดินทั้งแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor ทุกๆช่วงปริมาณความชื้น มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4-19 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บัพกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-20



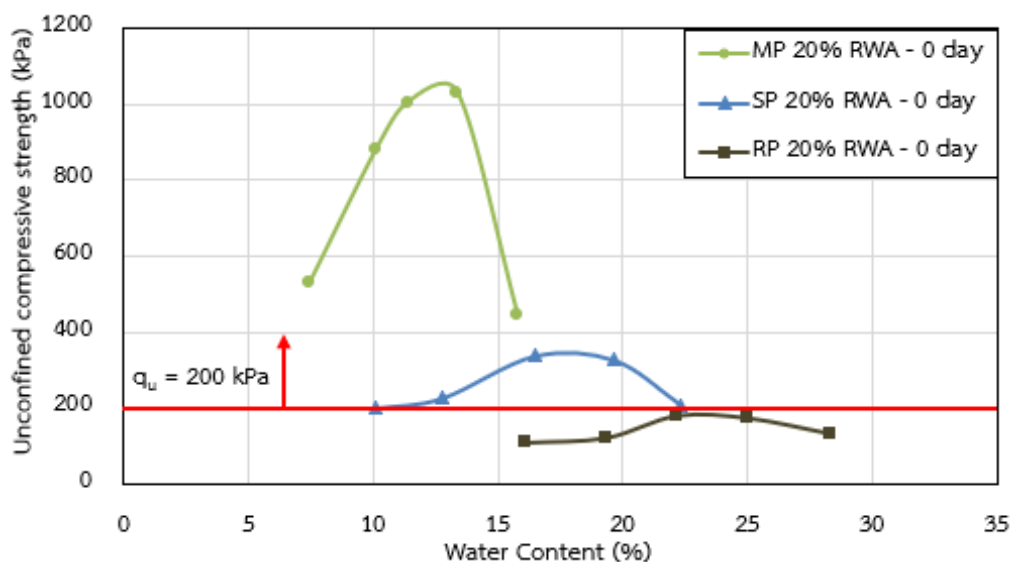
รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน



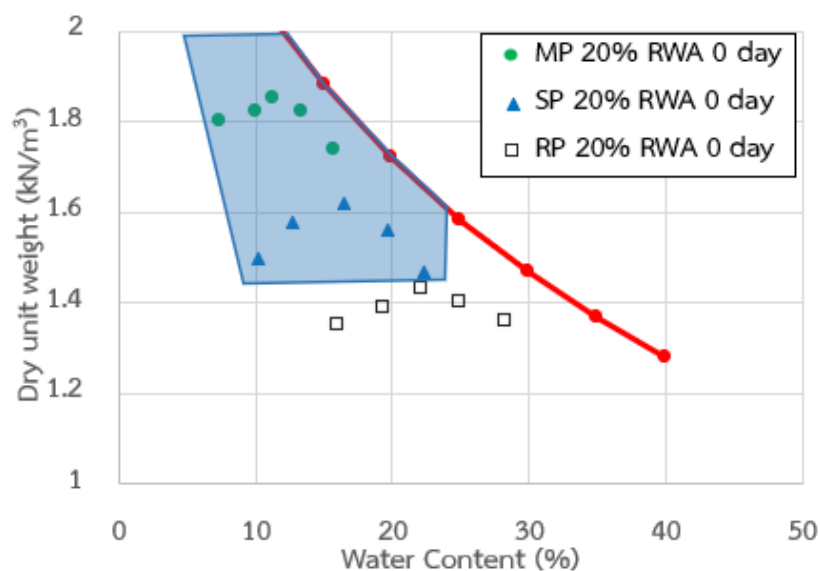
รูปที่ 4-20 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินแบบ Modified proctor และ Standard proctor มีค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดทุกๆ ช่วงความชื้น และพลังงานการบดอัดแบบ Reduced proctor ทุกๆ ช่วงปริมาณความชื้น มีค่ากำลังอัดแกนเดียวที่น้อยกว่า 200 kPa ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4-21 และกราฟที่แสดงช่วงที่

ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-22

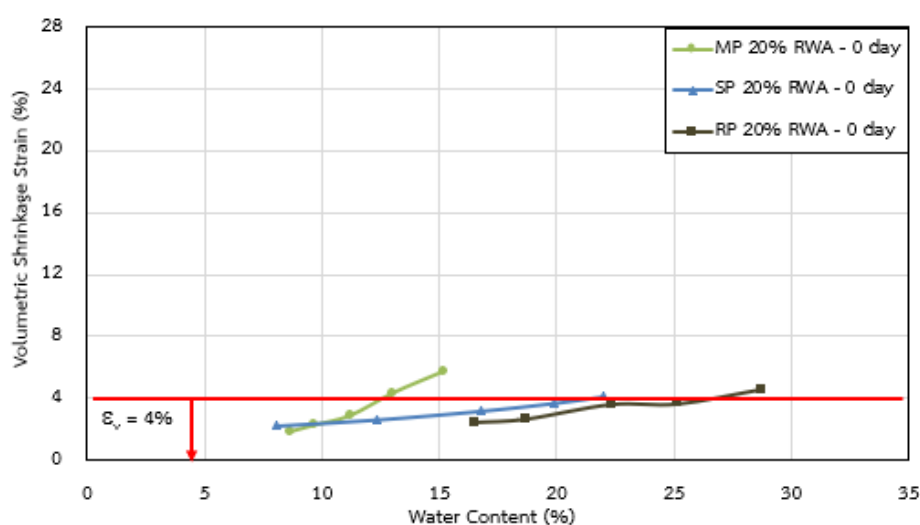


รูปที่ 4-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content ของอัตราส่วนผสมแฉ่ำลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน

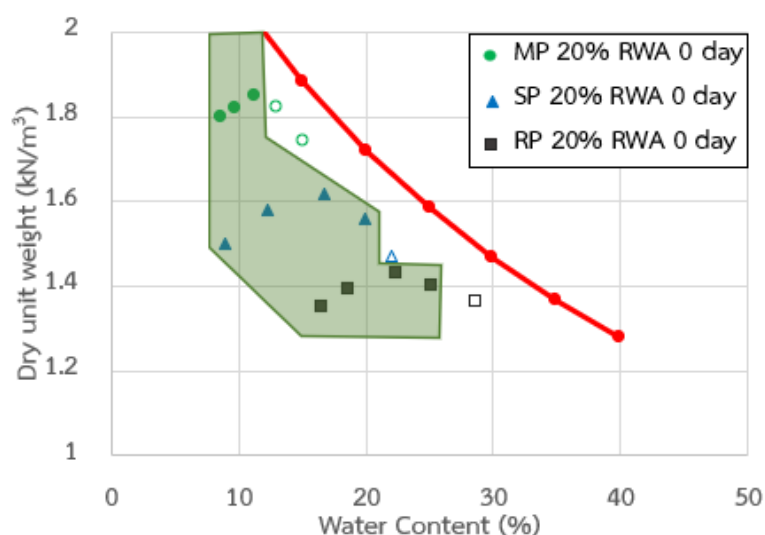


รูปที่ 4-22 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมแฉ่ำลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้ น้อยกว่า 4% ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินทั้งแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor ที่ปริมาณความชื้น 8.65% - 11.23%, 8.91% - 19.87 และ 16.54% - 25.18 ตามลำดับ มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4-23 และ กราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บกับค่าที่ ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-24

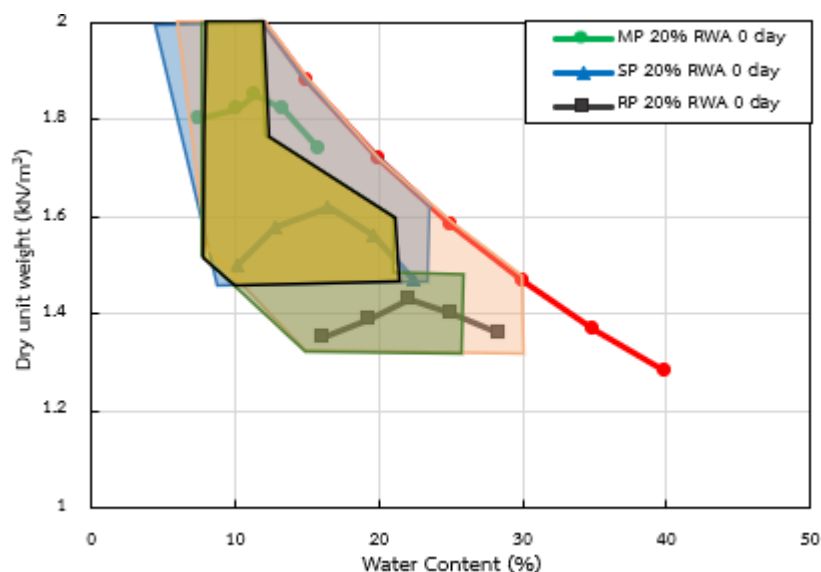


รูปที่ 4-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของ อัตรส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 4-24 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตรส่วนผสม เถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน

● ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) จากการนำกราฟ ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวและ ช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกันทั้ง 3 พื้นที่จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้ ทั้งหมด ซึ่งจากรูปที่ 4-25 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนดินเหนียวทำางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน มีพื้นที่ที่ยอมรับได้เท่ากับ $3.814 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$

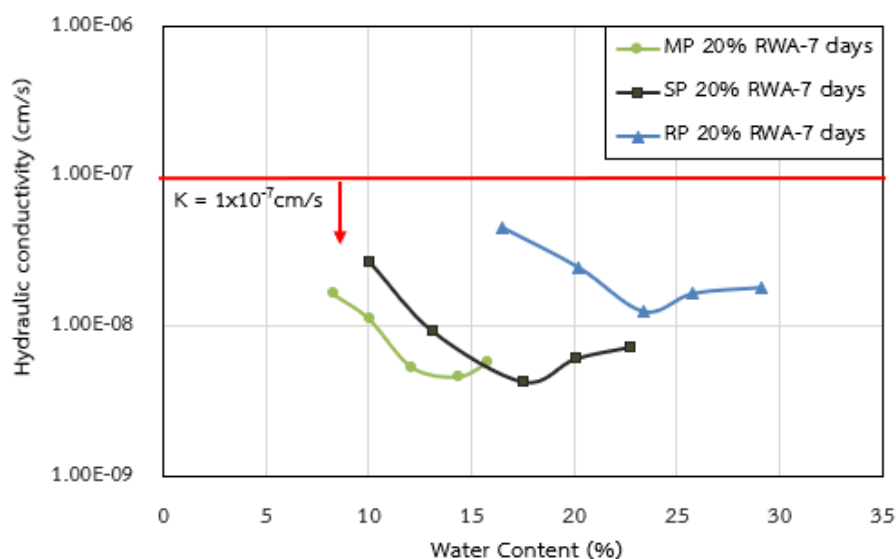


Overall Hydraulic conductivity Unconfined compressive shrinkage

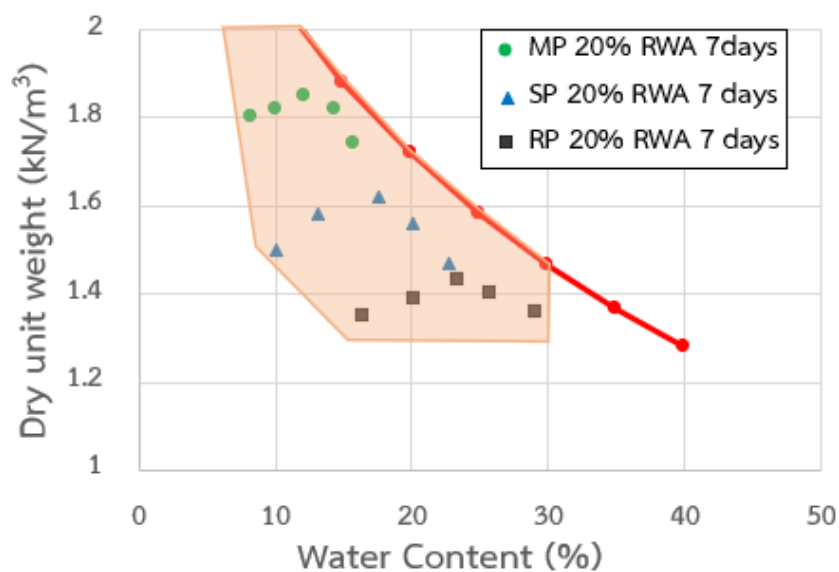
รูปที่ 4-25 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน

4.3.3 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ซึ่งพบว่าพลังงานในการบดอัดดินทั้งแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor ทุกๆช่วงปริมาณความชื้น มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4-26 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บัพกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-27



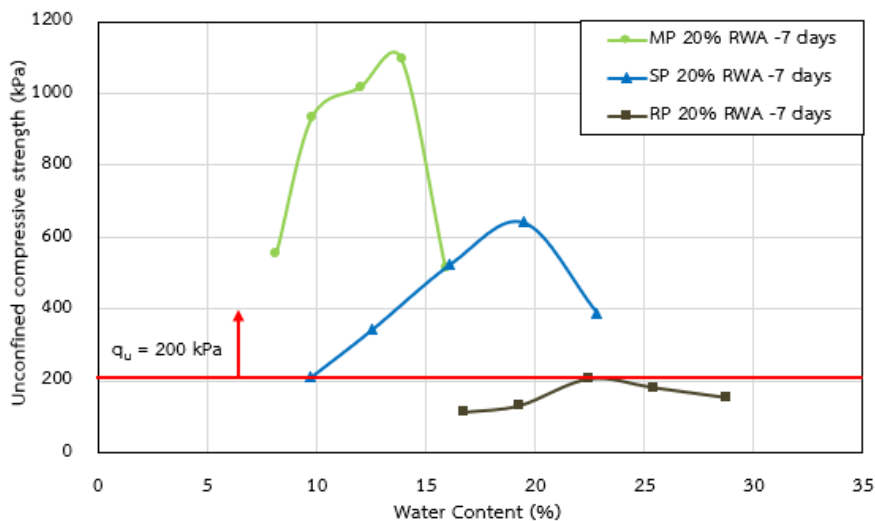
รูปที่ 4-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของอัตราส่วนผสมแฉะลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน



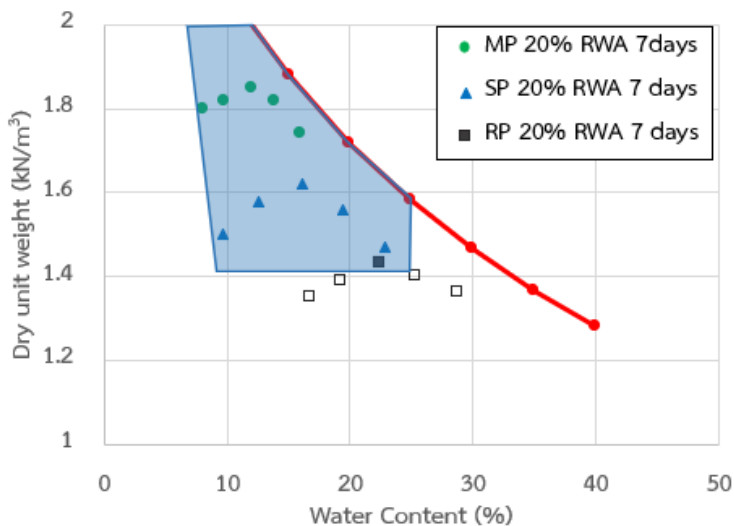
รูปที่ 4-27 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตราส่วนผสมแฉะลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินแบบ Modified proctor และ Standard proctor มีค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดทุกๆช่วงความชื้น และพลังงานการบดอัดแบบ Reduced proctor ในปริมาณความชื้นที่ 22.54 % มีค่ากำลังอัดแกนเดียวที่

205.475 kPa ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แต่ในความชื้นที่เหลือนั้นไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4-28 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-29



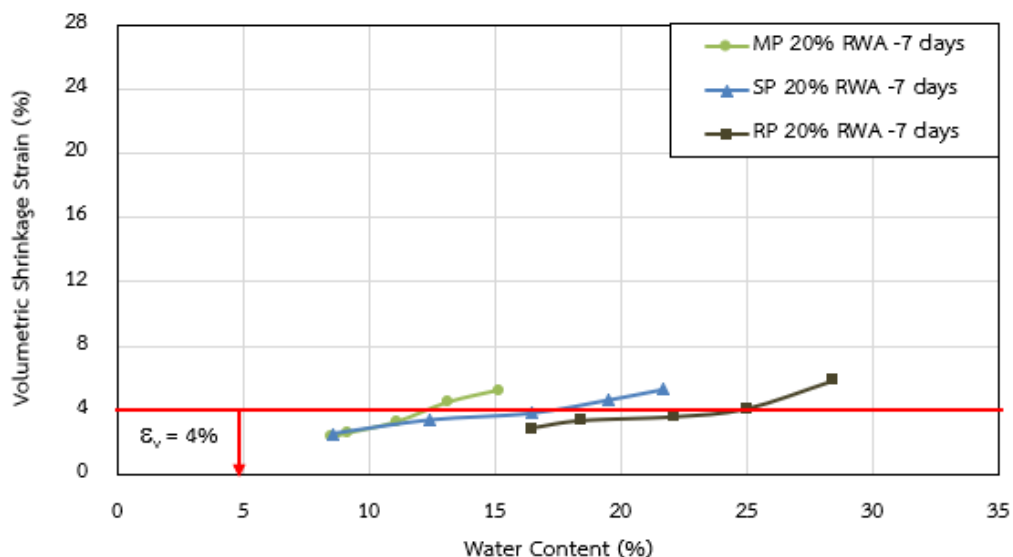
รูปที่ 4-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content ของอัตราส่วนผสมแฉะลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน



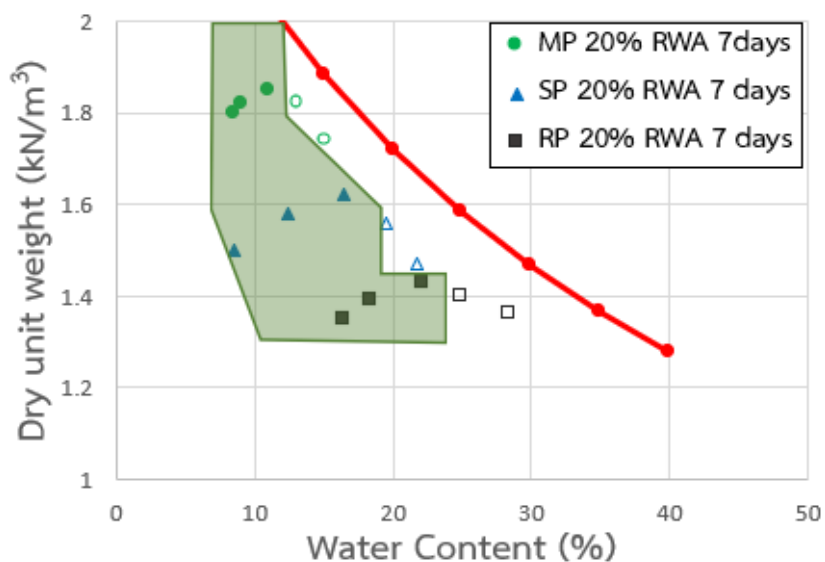
รูปที่ 4-29 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมแฉะลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้ น้อยกว่า 4% ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor ที่ปริมาณความชื้น 8.53% - 11.08%, 8.55% - 16.43% และ 16.43% - 22.12% ตามลำดับ มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4-30 และ

กราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บ่งชี้ค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-31



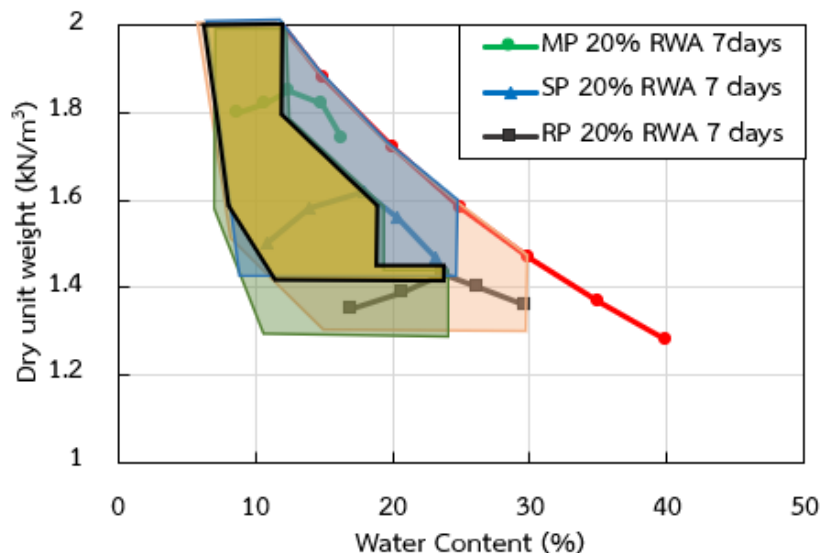
รูปที่ 4-30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4-31 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน

● ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) จากการนำกราฟช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวและช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกันทั้ง 3 พื้นที่จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้

ทั้งหมด ซึ่งจากรูปที่ 4-32 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 80:20 ที่ระยะการบ่ม 7 วัน มีพื้นที่ที่ยอมรับได้เท่ากับ $3.912 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$

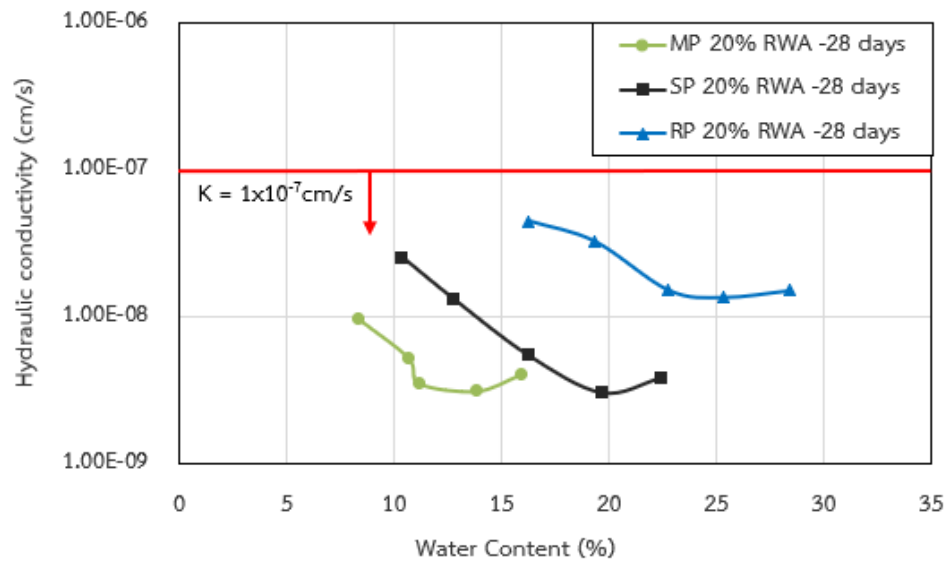


Overall Hydraulic conductivity Unconfined compressive shrinkage

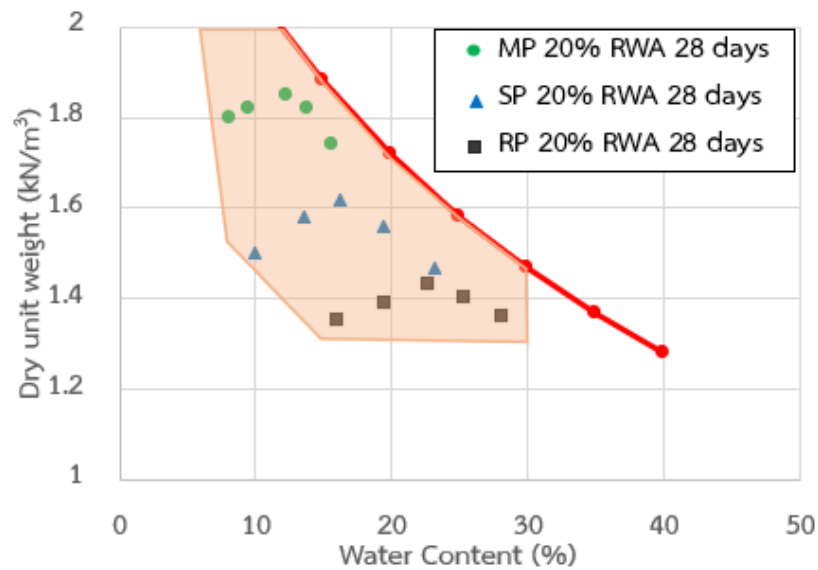
รูปที่ 4-32 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน

4.3.4 ผลของช่วงที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ซึ่งพบว่าพลังงานในการบดอัดดินทั้งแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor ทุกๆช่วงปริมาณความชื้น มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4-33 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่บัพกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-34

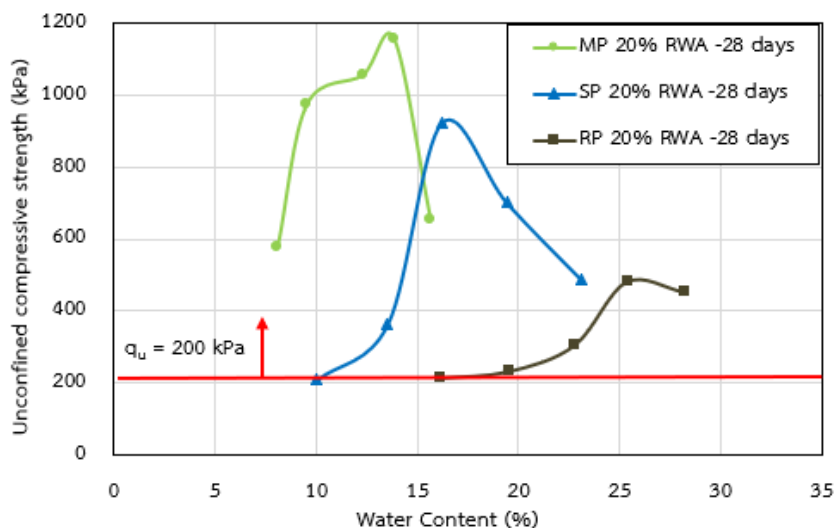


รูปที่ 4-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของ อัตราส่วนผสมถ้ำลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

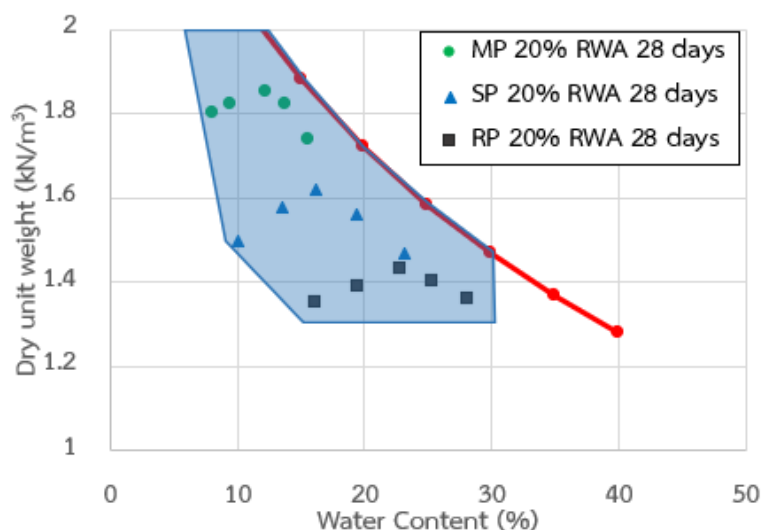


รูปที่ 4-34 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของอัตรา ส่วนผสมถ้ำลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้มากกว่า 200 kPa ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินแบบ Modified proctor, Standard proctor และ Reduced proctor มีค่ากำลังอัดแกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดทุกๆ ช่วงความชื้น แสดงดังรูปที่ 4-35 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว โดยแสดงสัญลักษณ์แบบที่ทับกับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบไปร้งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-36



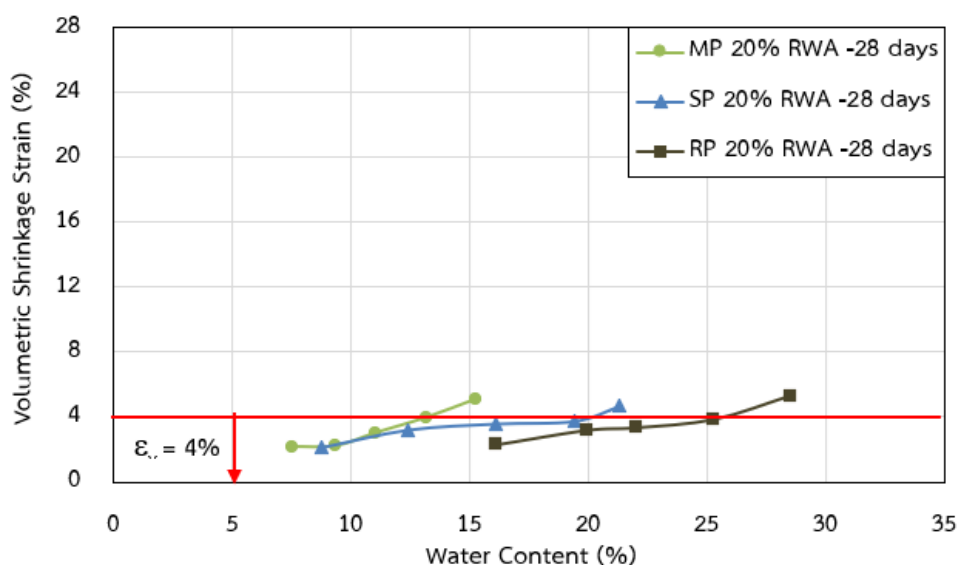
รูปที่ 4-35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive strength และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน



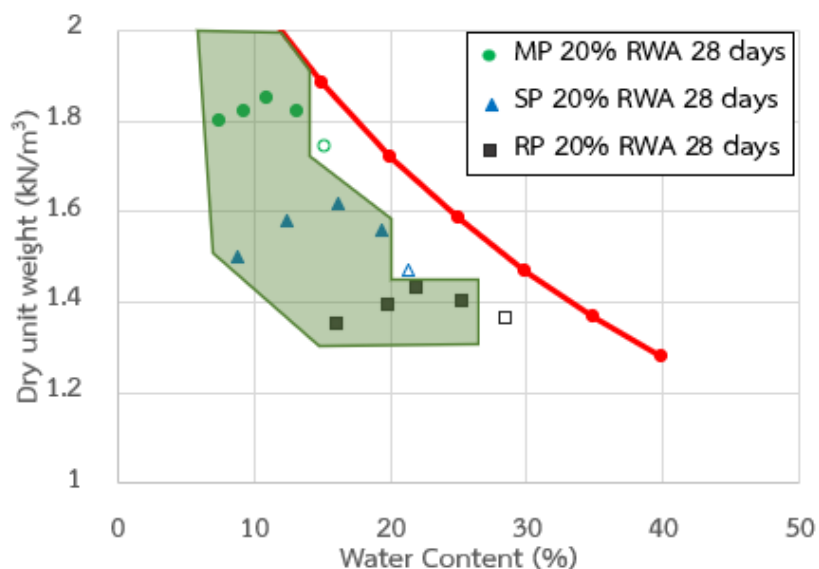
รูปที่ 4-36 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

● ผลช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้กำหนดให้น้อยกว่า 4% ผลการทดสอบพบว่าพลังงานในการบดอัดดินแบบ Modified proctor, Standard

proctor และ Reduced proctor ที่ปริมาณความชื้น 7.50 % - 13.18%, 8.75% - 19.42% และ 16.12% - 25.30% ตามลำดับ มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4-37 และกราฟที่แสดงช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร โดยแสดงสัญลักษณ์แบบทึบ กับค่าที่ผ่านเกณฑ์และแบบโปร่งกับค่าที่ผ่านเกณฑ์ ดังรูปที่ 4-38

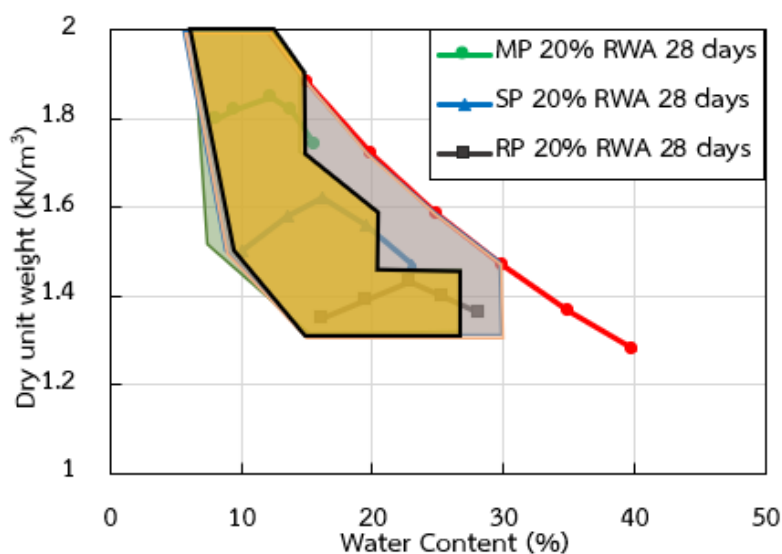


รูปที่ 4-37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4-38 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

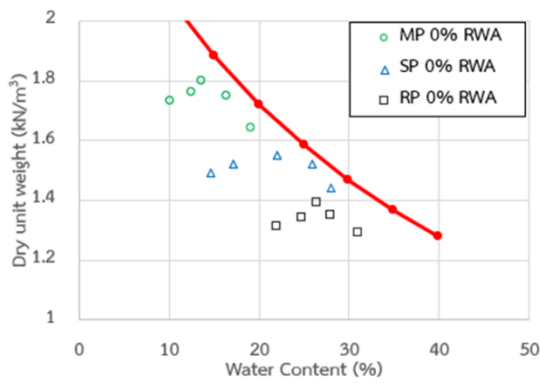
● ผลของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) จากการนำกราฟ ช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ช่วงที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียวและ ช่วงที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร วางซ้อนทับกันทั้ง 3 พื้นที่จะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ซึ่งจากรูปที่ 4-39 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนดินเหนียวทำางผสมเกล็ดลอยไม้ยางพารา 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีพื้นที่ที่ยอมรับได้เท่ากับ $5.353 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$



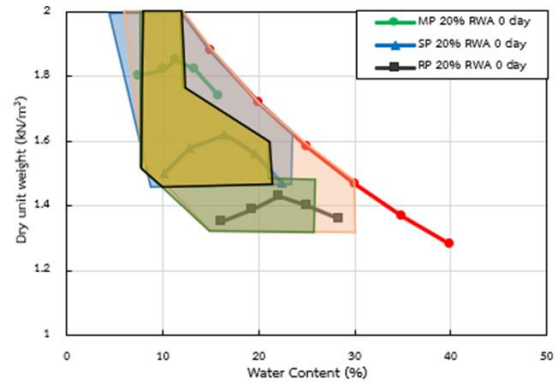
รูปที่ 4-39 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสม เกล็ดลอยไม้ยางพารา 20% ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

4.4 ประเมินความเหมาะสมของดินเหนียวทำางผสมเกล็ดลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่ม 0, 7 และ 28 วัน

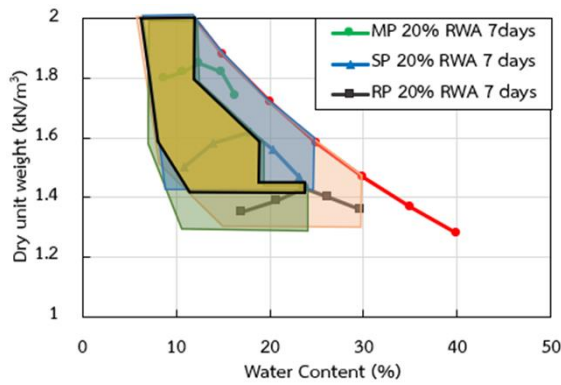
ในการพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะสมในการบดอัดชั้นกันซึมในรูปของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ถูกนำเสนอในรูปของพื้นที่ที่ได้กราฟของกราฟการบดอัดในขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด โดยการคำนวณจาก ผลคูณของ Dry unit weight และ Water content ซึ่งมีหน่วยพื้นที่เป็น $\text{kN/m}^3 \cdot \%$ พบว่าขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ผลการคำนวณของดินเหนียวทำางผสมเกล็ดลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 พบว่าไม่มีพื้นที่ที่ยอมรับได้ตามเงื่อนไข และเมื่อมีการผสมเกล็ดลอยไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 80:20 ในระยะเวลาบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน มีพื้นที่ที่ได้กราฟคือ $3.814 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$, $3.912 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$ และ $5.353 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-40 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้มีพื้นที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน พบว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้ที่ใหญ่ที่สุด โดยมีพื้นที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 26.929 เมื่อเทียบกับที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน



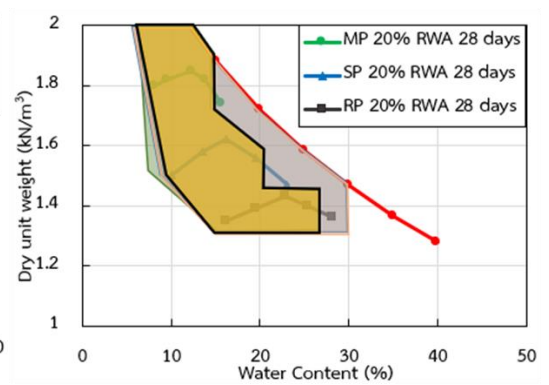
(a)



(b)



(b)



(d)



รูปที่ 4-40 กราฟแสดงพื้นที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดทุกอัตราส่วนผสม

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ประเมินความเหมาะสมของดินที่ใช้ทำชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย โดยศึกษาดินเหนียวทำนางหอม และดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 80:20 ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดินเหนียวทำนางหอม พบว่ามีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 57.90% ค่าขีดจำกัดพลาสติก เท่ากับ 25.60% และค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 32.30% นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกชนิดของดินเหนียวได้เป็นดินเหนียวที่ค่าความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 และเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58

2. ผลการทดสอบการบดอัด พบว่า ดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราทำให้กราฟการบดอัดเบี่ยงไปทางซ้ายซึ่งหมายถึงความชื้นลดลง และขยับขึ้นด้านบนหมายถึงความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลการบดอัดของดินเหนียวอย่างเดียว

3. ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวและดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ที่ทุกระยะเวลาบ่ม และทุกพลังงานที่ใช้บดอัด

4. ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวพบว่าสำหรับดินเหนียวอย่างเดียวมีค่ากำลังอัดแกนเดียวน้อยกว่า 200 kPa ทุกพลังงานการบดอัด ส่วนดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่บดอัดด้วยวิธี Modified proctor และ Standard proctor มีค่ากำลังอัดแกนเดียวมากกว่า 200 kPa ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

5. ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินเหนียวอย่างเดียว มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่มากกว่า 4% ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ที่ทุกพลังงานการบดอัด และดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา โดยเมื่อที่ปริมาณความชื้นน้อยค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะมีค่าต่ำกว่า 4% ทุกพลังงานการบดอัดซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

6. ผลการประเมินความเหมาะสมของดินที่ใช้ทำชั้นกันซึมพบว่าสำหรับดินเหนียวอย่างเดียวไม่มีพื้นที่ที่ยอมรับได้เนื่องจากค่ากำลังอัดแกนเดียวและการหดตัวตัวเชิงปริมาตรไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 80:20 ที่ระยะการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน มีพื้นที่ที่ยอมรับได้ทั้งหมดเท่ากับ $3.814 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$, $3.912 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$ และ $5.353 \text{ kN/m}^3 \cdot \%$ ตามลำดับ

7. เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ 20% ระยะบ่มที่ 0 วัน เทียบกับระยะบ่มที่ 7 และ 28 วัน พบว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.493 และ 26.929 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เป็นชั้นกันซึมมากที่สุดคืออัตราส่วนดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา 80:20 ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้การศึกษารอบคอบควรใช้ดินเหนียวในหลายๆพื้นที่ นอกเหนือจากดินเหนียวในพื้นที่ท่านางหอม จังหวัดสงขลา มาใช้เป็นหลัก และรวมไปถึงการนำเถ้าลอยประเภทอื่นนอกเหนือจากเถ้าลอยไม้ยางพารา เช่น เถ้าลอยจากต้นปาล์ม เถ้าแกลบ เป็นต้น

2. การวิจัยครั้งนี้มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินเหนียวต่อเถ้าลอยไม้ยางพารา 2 อัตราส่วน คือ 100:0 และ 80:20 เนื่องจากข้อจำกัดของเวลาและจำนวนตัวอย่างในการทดสอบจำนวนมาก แนะนำการศึกษาในอนาคตควรเพิ่มอัตราส่วนในการศึกษาอื่นๆเพื่อให้การศึกษารอบคอบมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2552, เกณฑ์มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอย พิมพ์ครั้งที่ 5
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2560, แนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่การออกแบบก่อสร้าง
และการจัดการสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ :
บริษัท ชนศิริ ปริ้นติ้ง จำกัด
- ชัยเจริญ มัจฉาสาระ, 2554, การประเมินความเหมาะสมของดินบดอัด สำหรับชั้นกันซึมของ
สถานที่ฝังกลบ., สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ชนิด เถลิมนานนท์, 2550, ธรณีเทคนิคของของเสีย, สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ปิติสานต์ กร้ามาต. 2553. คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน รายงานวิจัย
ฉบับสมบูรณ์ งบประมาณประจำปี 2553 ภายใต้โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทาง
วิชาการ. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ธัญบุรี.
- วัฒนพงศ์ ภูมิโคกรักษ์, 2555, กำลังอัดของดินเหนียวปนดินตะกอนปรับปรุงด้วยกาก
แคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย., นครราชสีมา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี
- วรรณวรงค์ รัตนานคม, 2561, การประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์
แหลมฉบังเพื่อเป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ., ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา
- Ankit Garg, Narala Gangadhara Reddy, He Huang, Poly Buragohain and Vinod Kushvaha.
“Modelling contaminant transport in fly ash–bentonite composite landfill liner:
mechanism of different types of ions”. Scientific Reports.,
- Danial, D. E. and Benson, C. H. 1990. "Water Content-Density Criteria for Compacted Soil
Liners". Journal of Geotechnical Engineering., ASCE, 116(12): 1811-1830.

- Danial, D. E. and Wu, Y. K. 1993. "Compacted Clay Liners and Cover for Arid Sites". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119(2): 223-237.
- Elmira Khaksar Najafi, Reza Jamshidi Chenari, Meghdad Payan & Mahyar Arabani. "A sustainable landfill liner material: clay-fly ash geopolymers". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80: 4111-4124
- Endene Emmanuela, Vivi Anggrainia, Mavinakere Eshwaraiah, Raghunandana and AfshinAsadib. "Utilization of marine clay as a bottom liner material in engineered landfills". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4): 104048
- Jun He, Yu Wang, Yong Li and Xiao-chen Ruan. "Effects of leachate infiltration and desiccation cracks on hydraulic conductivity of compacted clay". *Journal of Water Science and Engineering*, 8(2): 151-157
- Noureddine Hamdi and EzzeddineSrasra. "Hydraulic conductivity study of compacted clay soils used as landfill liners for an acidic waste". *Waste Management*, 33(1): 60-66
- Osinubi, K.J. and Nwaiwu, Charles. M.O. 2006. "Design of Compacted Lateritic Soil Liners and Covers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2)
- P.Harish Kumar, ReddyV.Ramya and KrishnaK.Srinivas. "Design of landfill liners for fine grained soils using CTRAN/W". *Materialstoday Proceedings*, 45(2): 3413-3418
- Sukiman Nurdin, Lawalenna Samang, Johannes Patanduk and Tri Harianto. "Performance of Soft Soil Stabilized by Fly Ash with Natural Fiber Reinforcement as Landfill Cover Layer". *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering* , 12(3)
- Vipul Chakradhar and S.S Katoch. "Study Of Fly Ash In Hydraulic Barriers In Landfills". *International Refereed Journal of Engineering and Science*, IRJES,5(4): 32-38
- Yong Wana, Qiang Xuea, Lei Liua and ShanYongWangb. "Relationship between the shrinkage crack characteristics and the water content gradient of compacted clay liner in a landfill final cover". *Soils and Foundations*, 58(6): 1435-1445

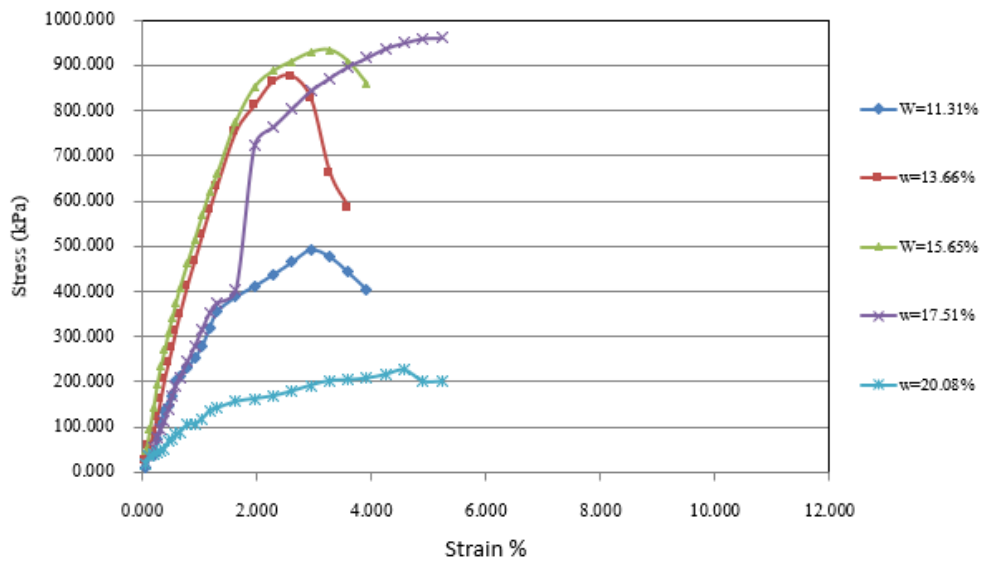
Yucel, Guney, Savas, Koparal. and Ahmet, H., Aydilek.2008. "Sepiolite as an Alternative Liner Material in Municipal Solid Waste Landfills". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., ASCE, 134(8):1166-1180

ภาคผนวก ก

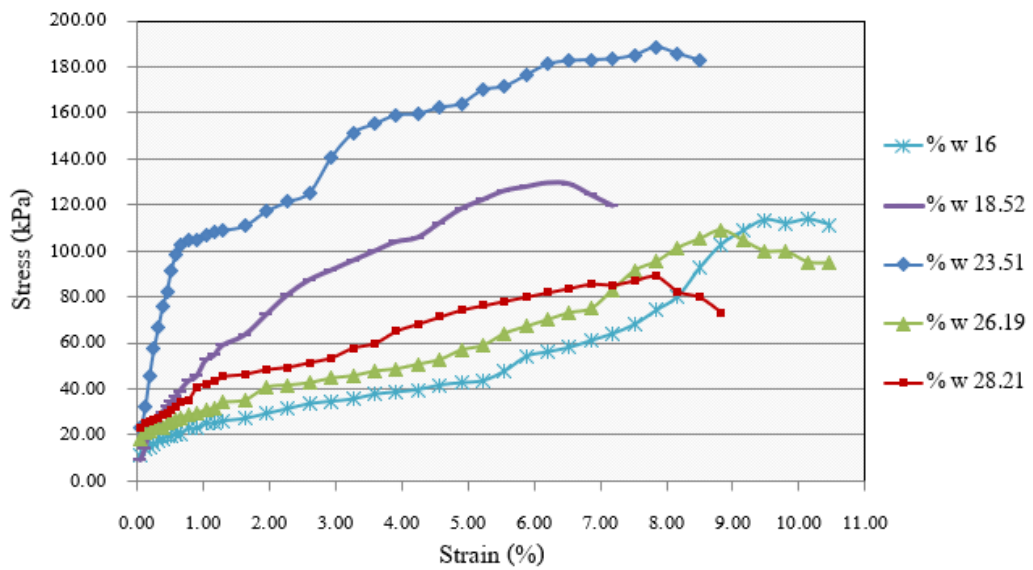
ตัวอย่าง $E_{(50)}$ ในอัตราส่วนผสมดินเหนียวต่อเถ้าลอยไม้ยางพารา
100:0 และ 80:20 ระยะบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน

ตารางที่ ก-1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50% (E_{50})

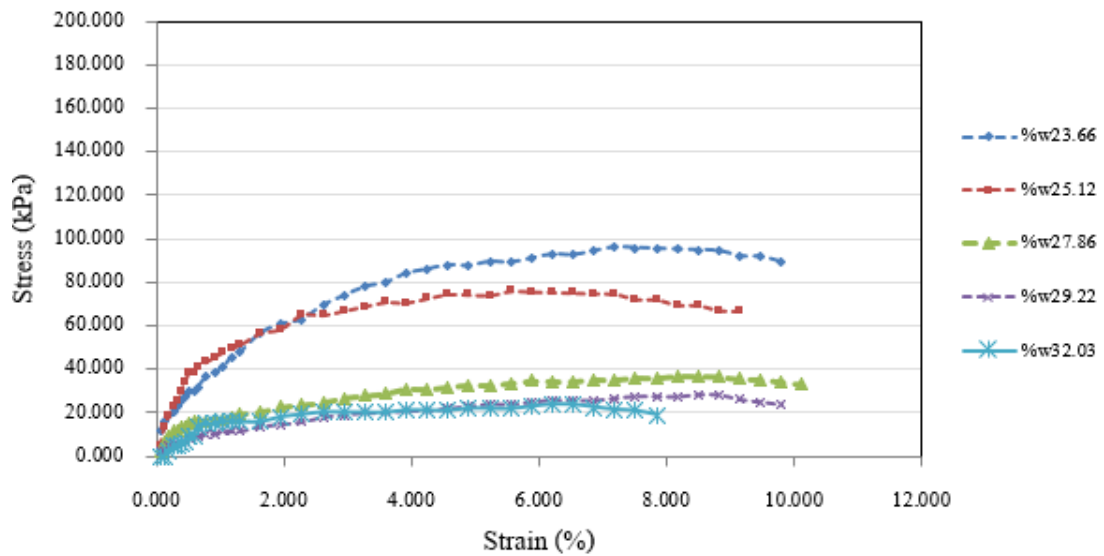
| พลังงาน การบด อัด | ดินเหนียว : etailoy 100 : 0 | | ดินเหนียว : etailoy 80 : 20 | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| | | | ระยะบ่ม 0 วัน | | ระยะบ่ม 7 วัน | | ระยะบ่ม 28 วัน | |
| | ปริมาณ ความชื้น w (%) | E_{50} (kPa) | ปริมาณ ความชื้น w (%) | E_{50} (kPa) | ปริมาณ ความชื้น w (%) | E_{50} (kPa) | ปริมาณ ความชื้น w (%) | E_{50} (kPa) |
| MP | 10.32 | 24,663 | 7.43 | 26,643 | 8.12 | 18,445 | 8.08 | 7,801 |
| | 12.54 | 48,574 | 10.11 | 10,512 | 9.78 | 12,631 | 9.53 | 23,213 |
| | 13.63 | 46,713 | 11.36 | 20,068 | 12.01 | 22,108 | 12.31 | 12,006 |
| | 16.58 | 40,045 | 13.36 | 12,859 | 13.88 | 10,757 | 13.84 | 11,809 |
| | 19.85 | 11,301 | 15.79 | 13,861 | 15.93 | 19,754 | 15.66 | 27,238 |
| SP | 15.33 | 1,319 | 10.13 | 14,370 | 9.71 | 17,572 | 10.01 | 17,483 |
| | 17.13 | 3,594 | 12.75 | 14,189 | 12.53 | 21,520 | 13.53 | 26,022 |
| | 23.05 | 2,357 | 16.47 | 42,263 | 16.11 | 43,851 | 16.21 | 57,766 |
| | 25.84 | 1,434 | 19.65 | 32,681 | 19.45 | 64,112 | 19.45 | 87,683 |
| | 28.14 | 3,423 | 22.33 | 11,583 | 22.81 | 24,341 | 23.11 | 25,584 |
| RP | 23.06 | 4,785 | 16.10 | 4,523 | 16.75 | 7,144 | 16.13 | 9,741 |
| | 25.05 | 12,669 | 19.32 | 4,666 | 19.28 | 8,285 | 19.54 | 10,571 |
| | 26.51 | 18,478 | 22.17 | 11,333 | 22.45 | 11,415 | 22.81 | 2,994 |
| | 28.94 | 7,102 | 25.03 | 14,557 | 25.39 | 7,558 | 25.38 | 4,814 |
| | 31.31 | 5,931 | 28.35 | 5,098 | 28.75 | 5,929 | 28.22 | 4,452 |



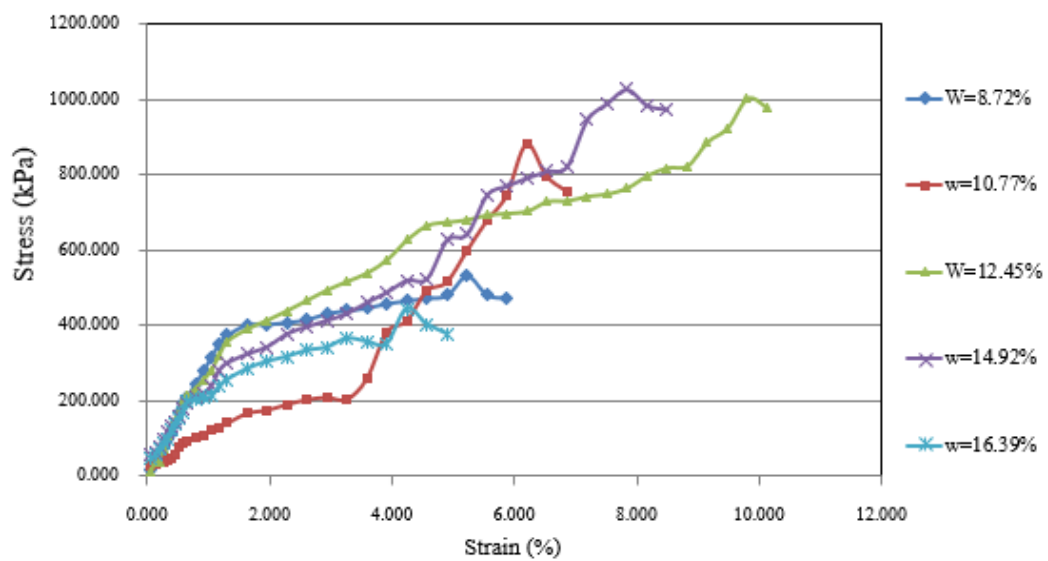
รูปที่ ก-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 0% บดอัดแบบ Modified Proctor



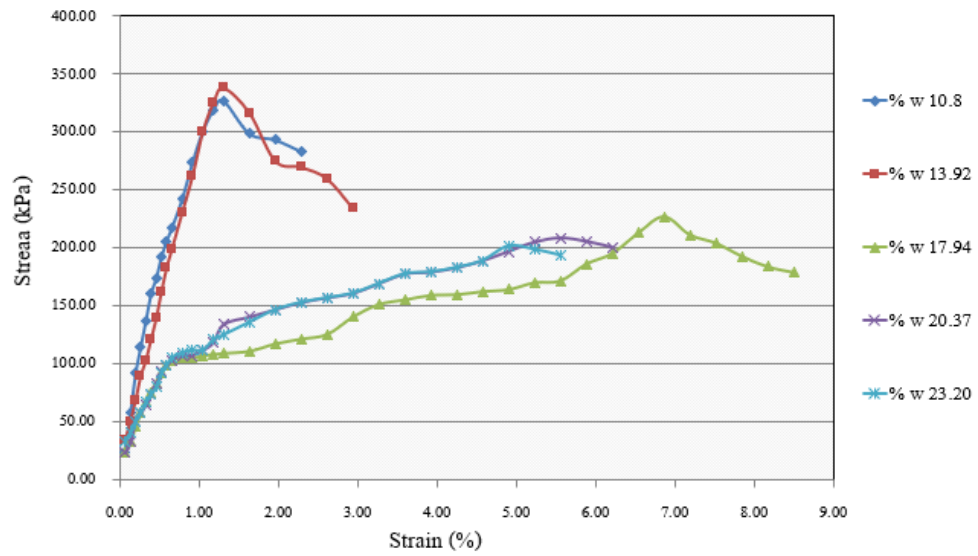
รูปที่ ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 0% บดอัดแบบ Standard Proctor



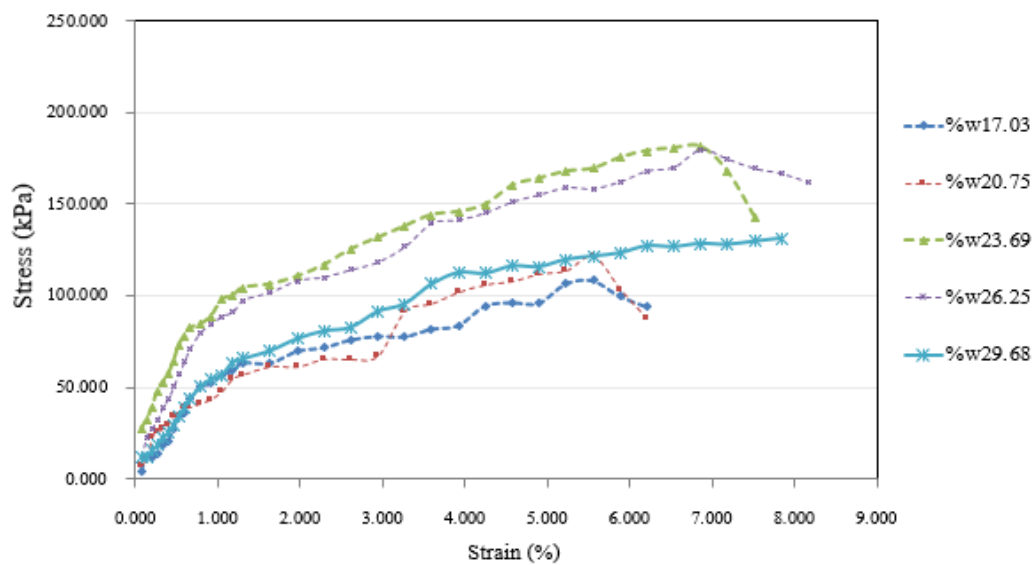
รูปที่ ก-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 0% บดอัดแบบ Reduced proctor



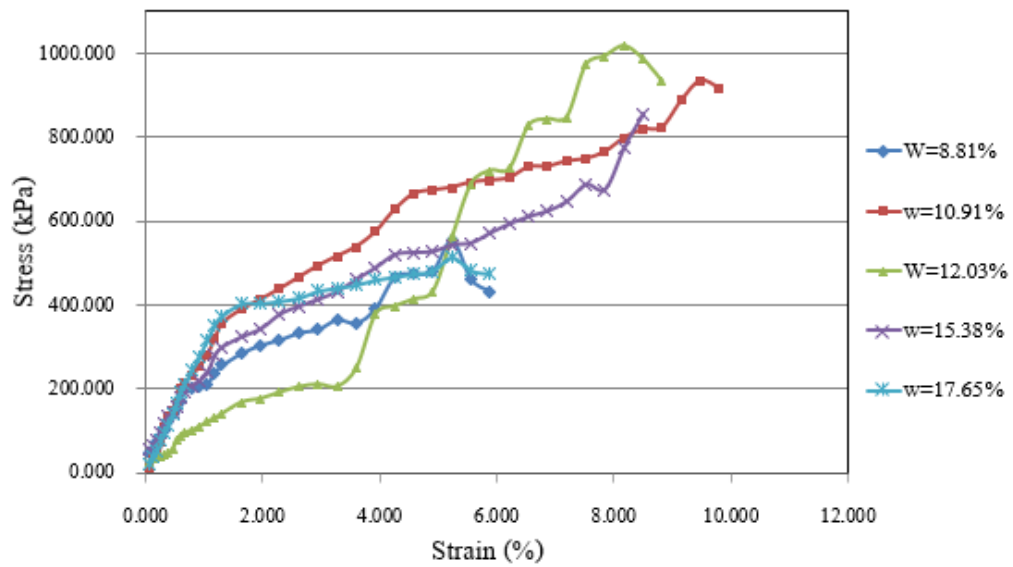
รูปที่ ก-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 20% ป่มที่ 0 วัน บดอัดแบบ Modified Proctor



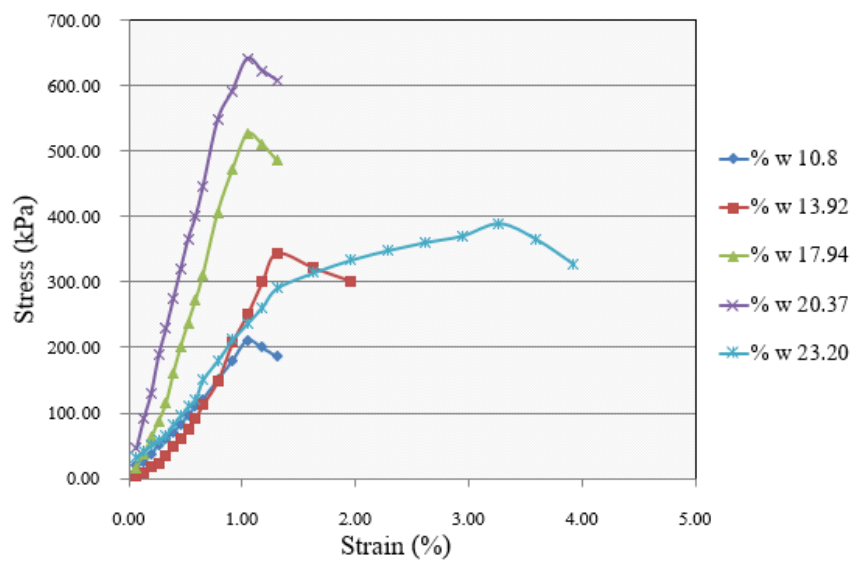
รูปที่ ก-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ล้อยที่ 20% ระยะเวลาบ่มที่ 0 วัน บดอัดแบบ Standard Proctor



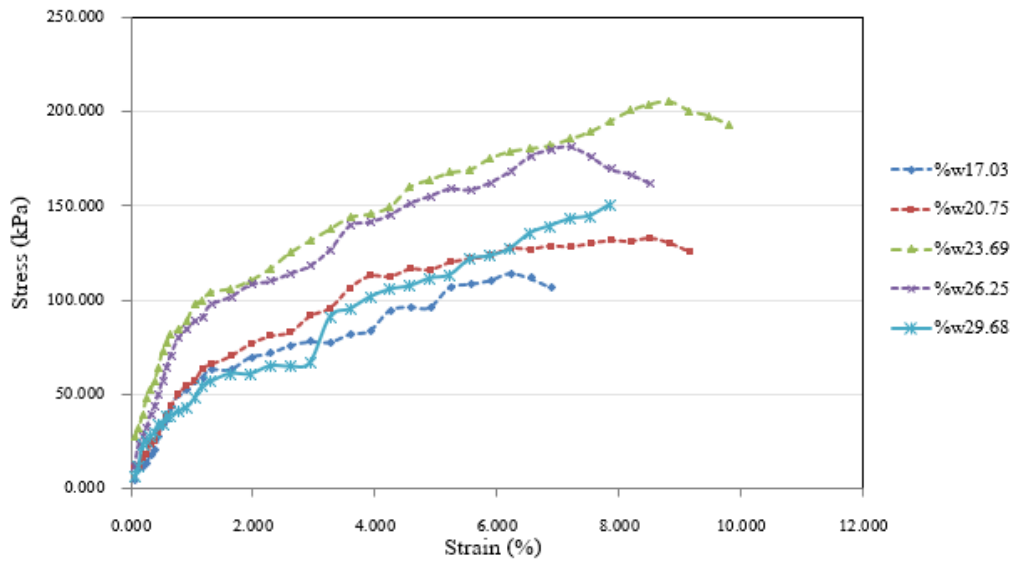
รูปที่ ก-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ล้อยที่ 20% บ่มที่ 0 วัน บดอัดแบบ Reduced proctor



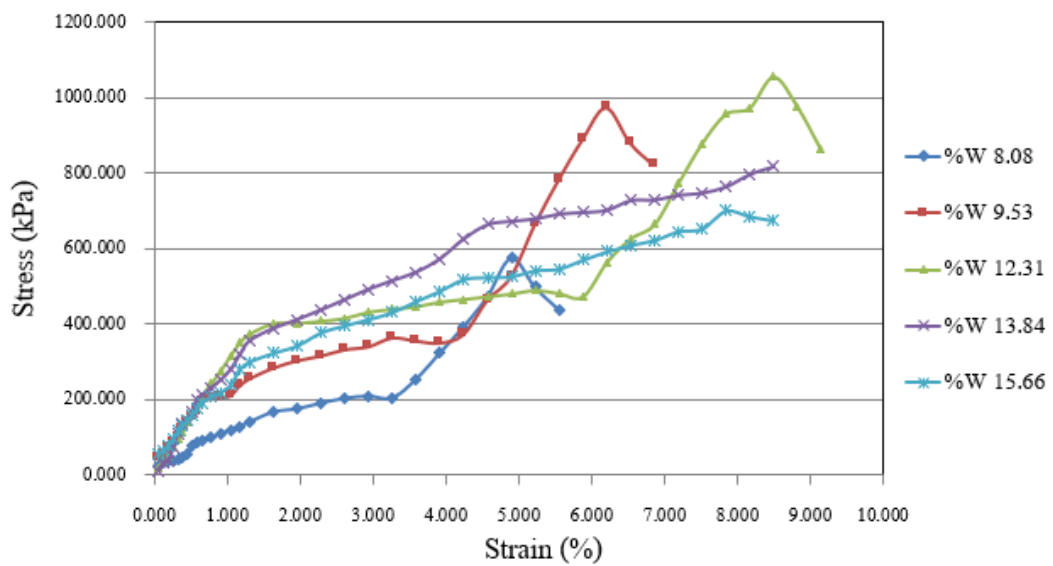
รูปที่ ก-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 20% ป่มที่ 7 วัน บดอัดแบบ Modified Proctor



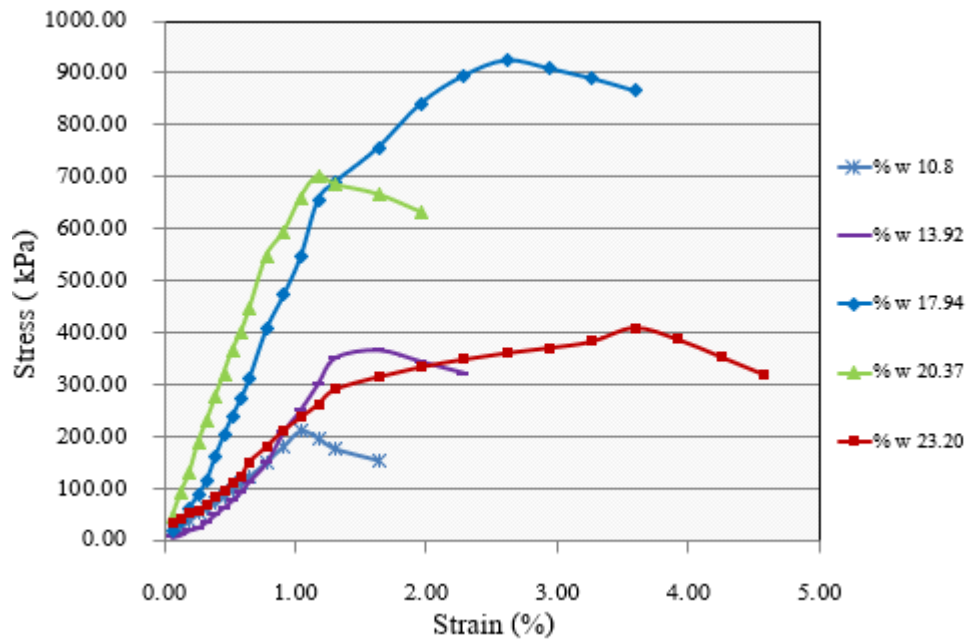
รูปที่ ก-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 20% ระยะเวลาป่มที่ 7 วัน บดอัดแบบ Standard Proctor



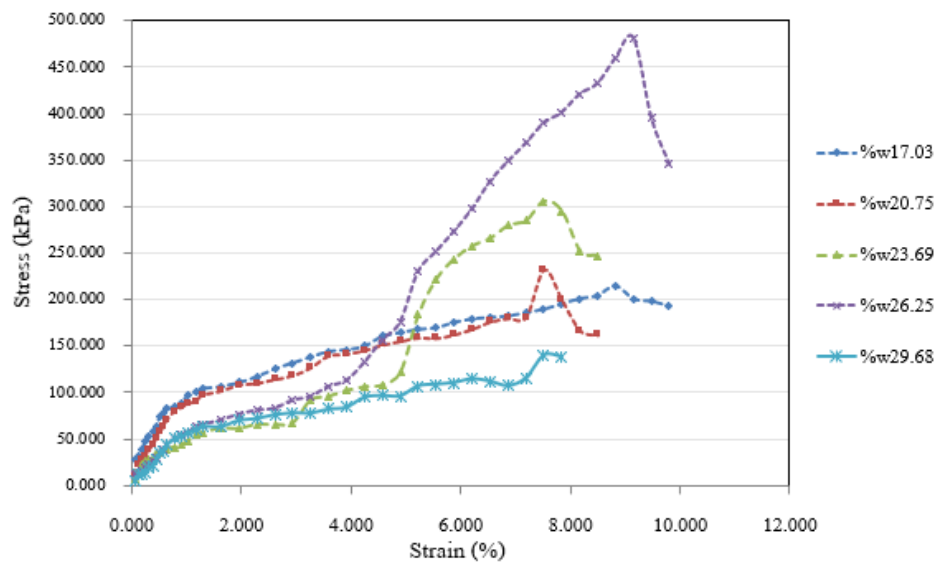
รูปที่ ก-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉ่ำ
 ลอยที่ 20% บ่มที่ 7 วัน บดอัดแบบ Reduced proctor



รูปที่ ก-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉ่ำ
 ลอยที่ 20% บ่มที่ 28 วัน บดอัดแบบ Modified Proctor



รูปที่ ก-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 20% ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน บดอัดแบบ Standard Proctor



รูปที่ ก-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (kPa) และ Strain (%) ของอัตราส่วนผสมแฉะ
ลอยที่ 20% บ่มที่ 28 วัน บดอัดแบบ Reduced proctor

ภาคผนวก ข
บทความวิจัย

บทความวิจัยเรื่องที่ 1

บทความวิจัยเรื่องที่ 1 ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, บทความ GTE24; 1-7 วันที่ 24-26 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 จัดการประชุม ณ โรงแรมภูเก็ต เกรซแลนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต ส่วนรายละเอียดของบทความรายละเอียดดังนี้

การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินเหนียวจังหวัดสงขลา
ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย
Assessment of Utilization of Local Songkhla Clay – Rubber wood ash
Mixture as Landfill Liner

ณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ์^{1*} ธนิต เอลิมยานนท์² และ ธนันท์ ชูอุปการ³

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: nattarat.eve@gmail.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการใช้วัสดุผสมจากดินเหนียวท้องถิ่นจังหวัดสงขลาและเถ้าลอยไม้ยางพารา สำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมบ่อฝังกลบมูลฝอย งานวิจัยของ Benson และ Daniel แสดงให้เห็นว่าช่วงของค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นกันซึม ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องมีค่าต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ค่ากำลังอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต้องต่ำกว่า 4% ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้อัตราส่วนของดินเหนียวต่อเถ้าลอยไม้ยางพารา ของวัสดุผสมโดยน้ำหนักแห้งได้แก่ 100:0 และ 80:20 และมีการแปรผันระยะเวลาในการบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่าดินเหนียวอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) ถึงแม้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s แต่ก็ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมเนื่องจากมีค่ากำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่า 200 kPa และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 4% อย่างไรก็ตาม สำหรับวัสดุผสมในอัตราส่วน 80:20 ในทุกระยะเวลาการบ่ม ผลการทดสอบได้ค่าทุกคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ที่เหมาะสมตามที่กำหนดไว้ ดังนั้นวัสดุผสมในอัตราส่วน 80:20 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย

คำสำคัญ: ชั้นกันซึมดินเหนียวคอดัด, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ, ค่ากำลังอัดแกนเดียว, ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร

Abstract

In this study, mixtures of Songkhla local clay and Rubber wood ash were studied as a landfill liner. Benson and Daniel showed that suitable liner properties consist of a hydraulic conductivity lower than 1×10^{-7} cm/s, an unconfined compressive strength not less than 200 kPa and a volumetric shrinkage strain lower than 4%. In order to determine an appropriate mixture, the clay-fly ash ratios of 100:0 and 80:20 were used. For the mixture of 80:20, incubation times of 0, 7, and 28 days were employed. Experimental results show that for the 100:0 mixture

(clay only) although its coefficient of hydraulic conductivity is lower than 1×10^{-7} cm/s but it is not suitable for use as a liner because its unconfined compressive strength and volumetric shrinkage strain are less than 200 kPa and more than 4%, respectively. On the other hand, for the 80:20 mixture with at all incubation times, the test results meet the specified criteria. Hence, it is suitable for use as the landfill liner.

Keywords: Compacted clay liner, Hydraulic conductivity, Unconfined compressive, Volumetric shrinkage strain

1. ที่มาและความสำคัญ

บ่อฝังกลบ (Landfill) เป็นสถานที่สำหรับฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) ซึ่งเป็นวิธีกำจัดมูลฝอยอีกวิธีหนึ่งที่ป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยนำขยะมูลฝอยมาเทกองไว้ในบ่อฝังกลบ จากนั้นใช้เครื่องจักรบดอัดให้แน่นและกลบดินทับเป็นชั้นๆ บ่อฝังกลบประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ชั้นกันซึม (Liner) เป็นส่วนที่อยู่ล่างสุดของบ่อฝังกลบ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำชะมูลฝอยซึมผ่านไปปนเปื้อนกับน้ำใต้ดิน, ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย (Leachate collection system) และระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final cover system) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำฝนซึมผ่านลงไปบ่อฝังกลบ จึงทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยได้น้อยลง [1]

ดินเหนียวสามารถใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมได้อย่างดีถ้ามีการบดอัดที่เหมาะสม เนื่องจากดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ ในขั้นตอนการบดอัด มักนิยมบดอัดจนดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ในการก่อสร้างชั้นดินเหนียวกันซึมนี้จะนำดินเหนียวมาบดอัดเป็นชั้นๆ ซึ่งอาจมีความหนา 60 เซนติเมตร แต่เนื่องด้วยเมื่อบดอัดดินเหนียวอาจจะเกิดรอยร้าวหรือรอยแตกถ้าบดอัดไม่ดี หรือเกิดรอยร้าวส่งผลให้สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่านไปได้ [2]

ปัจจุบันไม้ยางพาราถูกนำไปใช้เป็นวัสดุทำเฟอร์นิเจอร์เป็นผลทำให้เหลือเศษไม้ยางพาราเป็นจำนวนมากและถูกเก็บมาทำเป็นเชื้อเพลิงของการอบไม้ยางพารา โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้ที่มีอุตสาหกรรมแปรรูปไม้

ยางพาราเป็นจำนวนมาก หากนำเถ้าลอยที่ได้จากการอบไม้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ย่อมส่งผลดีต่ออุตสาหกรรมและสภาพแวดล้อมในภาคใต้ [3]

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของชั้นกันซึมแบบดินเหนียวคัดที่ใต้ดินเหนียวท้องถิ่นจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วน 0 และ 20% เพื่อประเมินความเหมาะสมสำหรับทำชั้นวัสดุกันซึมใต้บ่อฝังกลบ (Liner) ตามข้อกำหนดของระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลและสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำชะขยะ (Leachates)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชั้นกันซึมดินเหนียวคัด

ชั้นกันซึม (Liner) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างสุดของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะมูลฝอยลงสู่ลำน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติใกล้เคียง ดินเหนียวคัด มักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยและกักเก็บของเสีย ทั้งนี้ เนื่องจากดินเหนียวมีคุณสมบัติในการระบายน้ำต่ำ นอกจากนี้ประจุลบที่อยู่ในอนุภาคของดินเหนียวยังสามารถหน่วงประจุบวกของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำชะขยะได้ หน่วยงานที่ควบคุมดูแลส่วนใหญ่ต้องการออกแบบให้ชั้นกันซึมดินเหนียวคัด (Compacted clay liner) และชั้นปิดทับ (Cover) เพื่อกักเก็บของเสียอันตราย (Hazardous waste) ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial waste) และขยะมูลฝอยจากชุมชน (Municipal solid waste) [1]

2.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash) จัดเป็นสารประกอบซิลิกาสังเคราะห์หรือซิลิกาตามดัดแปลงประเภทหนึ่งเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาไม้ยางพารา มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์กรประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิสภาพแวดล้อมขณะเผา [4]

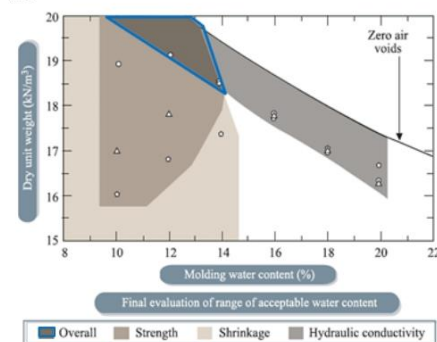
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไม้ยางพาราโดยวิธี X-Ray - Fluorescence ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์ โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่ามีองค์ประกอบของ CaO ร้อยละ 41.19 องค์ประกอบของ SiO_2 ร้อยละ 2.57, Al_2O_3 ร้อยละ 0.53, Fe_2O_3 ร้อยละ 0.56 เถ้าลอยไม้ยางพารามีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 3.66 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าไม่สามารถจัดเป็นสารประกอบซิลิกาแต่มีปริมาณของ CaO ร้อยละ 41.19 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของ CaO ในปูนซีเมนต์จึงมีความสามารถเกิดปฏิกิริยาปอลิเมอร์ได้ [3]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพาราและเถ้าลอย [3],[5]

| ออกไซด์ | เถ้าลอยไม้ยางพารา | เถ้าลอย |
|---|-------------------|---------|
| CaO | 41.91 | 15.27 |
| SiO_2 | 2.57 | 41.16 |
| Al_2O_3 | 0.53 | 22.30 |
| Fe_2O_3 | 0.56 | 11.51 |
| MgO | 4.52 | 2.70 |
| K_2O | 16.11 | 2.93 |
| Na_2O | - | 1.66 |
| TiO_2 | - | - |
| P_2O_5 | 3.06 | - |
| SO_3 | 5.54 | 1.43 |
| Cl | 0.82 | - |
| MnO_2 | 1.36 | - |
| ZnO | 0.12 | - |
| Rb | 0.18 | - |
| SiO | 0.16 | - |
| ZrO_2 | - | - |
| น้ำหนักสูญหายหลังการเผา | - | - |
| พื้นที่ผิวจำเพาะ $\text{m}^2/\text{กรัม}$ | 9.23 | - |
| ความพรุน $\text{m}^3/\text{กรัม}$ | 17.72 | - |

2.3 ทฤษฎี Daniel and Benson

Daniel and Benson [6] ได้แสดงให้เห็นว่า ช่วงของค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นกันซึม ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ต้องมีค่าต่ำกว่า $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ค่ากำลังอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และการหดตัวเชิงปริมาตรต้องต่ำกว่า 4% โดยใช้พลังงานบดอัดดินสามชนิดได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน, ค่ากำลังอัดแกนเดียว และการหดตัวเชิงปริมาตร นำค่าดังกล่าวมาพล็อต "ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone)" ของทั้งสามเงื่อนไขเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นกันซึมดินเหนียวคัด ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Acceptable Zone) [6]

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

การประเมินความเหมาะสมของการใช้ดินเหนียวจังหวัดสงขลาผสมแกลบลอยไม่ยางพาราสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย ผู้วิจัยเลือกใช้ดินเหนียวทำงานหอม ในพื้นที่ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และมีการนำแกลบลอยไม่ยางพารามาผสม โดยดินต้องผ่านคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับชั้นกันซึมดินที่ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมควรจะต้องมีค่าขีดจำกัดเหลวไม่น้อยกว่า 20% เพราะดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวสูงจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ [7] และดินที่ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมควรจะต้องมีค่าดัชนีพลาสติกไม่น้อยกว่า 7-10% และไม่มากกว่า 30-40% เพราะเมื่อดินมีค่าดัชนีพลาสติกสูงมาก เมื่อแห้งดินจะเป็งก้อนแข็งและเมื่อเปียกดินจะเหนียวมากทำให้การบดอัดในสนามทำได้ยาก [6]

3.2 อัตราส่วนผสมของดินเหนียวและแกลบลอยไม่ยางพารา

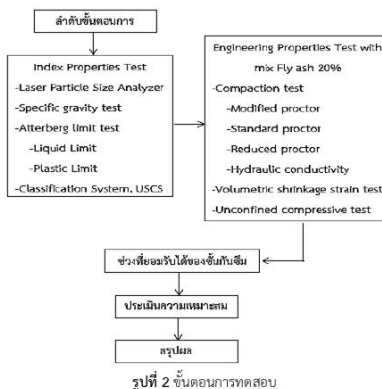
อัตราส่วนผสมของดินเหนียวและแกลบลอยไม่ยางพารา ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ 2 อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 2 โดยอัตราส่วนแรกใช้ดินเหนียวอย่างเดียว (แกลบลอยไม่ยางพารา 0%) และ อัตราส่วนผสมของดินเหนียว 80% และแกลบลอยไม่ยางพารา 20% ซึ่งให้ค่าคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ดีเป็นไปตามผลการศึกษาของ [8] สำหรับอัตราส่วนผสม 80:20 ได้ศึกษาผลของเวลาบ่มที่ 0, 7, และ 28 วันด้วย

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของดินเหนียวและแกลบลอยไม่ยางพารา

| อัตราส่วนผสม | ดินเหนียว (%) | แกลบลอย (%) |
|--------------|---------------|-------------|
| 1 | 100 | 0 |
| 2 | 80 | 20 |

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการศึกษาการประเมินความเหมาะสมของดินเหนียวทำงานหอมสำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมดินบดอัดสำหรับสถานที่ฝังกลบ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้ ในส่วนแรกคือการทดสอบคุณสมบัติดิน ได้แก่ การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test), การทดสอบพิกต์ออตเตอร์เบิร์ก (Atterberg limit test) และการจำแนกชนิดของดินตามวิธี Unified Soil Classification System (USCS) ในส่วนที่สองคือ การทดสอบการบดอัด (Compaction test) การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity test) การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive test) และ ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage strain test) หลังจากนั้นนำผลการทดสอบเขียนกราฟหาช่วงที่ยอมรับได้เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของชั้นกันซึมบดอัด จากนั้นนำช่วงที่ยอมรับได้ทั้งหมดตามหัวข้อ 2.3 เพื่อประเมินอัตราส่วนผสมดินเหนียวและแกลบลอยไม่ยางพารา ที่เหมาะสมสำหรับกันซึมดินบดอัดสำหรับสถานที่ฝังกลบต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบ

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติชั้นกันซึมดินเหนียวทำงานหอมและแกลบลอยไม่ยางพารา

คุณสมบัติชั้นกันซึมดินเหนียวทำงานหอมและแกลบลอยไม่ยางพาราแสดงดังตารางที่ 3 คือมีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 57.90% ค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 25.60% และค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 32.30% นอกจากนี้สามารถจำแนกชนิดของดินเหนียวได้เป็นดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity clay, CH) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ในส่วนของแกลบลอยไม่ยางพารามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.58

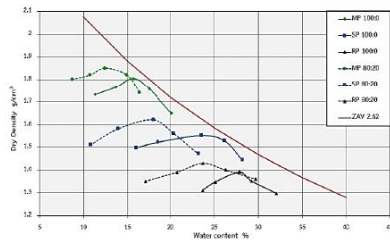
ตารางที่ 3 คุณสมบัติชั้นกันซึมดินเหนียวจังหวัดสงขลาและแกลบลอยไม่ยางพารา

| คุณสมบัติ | ดินเหนียว | แกลบลอยไม่ยางพารา | ดินเหนียวผสมแกลบลอยไม่ยางพารา |
|----------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|
| Liquid limit (%) | 57.90 | - | 49.5 |
| Plastic limit (%) | 25.60 | - | 32.4 |
| Plasticity index (%) | 32.30 | - | 17.1 |
| Specific gravity | 2.62 | 2.58 | 2.65 |
| Classification | CH | - | - |

4.2 ผลการทดสอบการบดอัด

ผลการทดสอบการบดอัดดินด้วยพลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงานคือแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor, MP), แบบมาตรฐาน (Standard proctor, SP) และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced proctor, RP) ซึ่งใช้พลังงานบดอัดต่อปริมาตรเท่ากับ 50% ของ SP ของดินเหนียวทำงานหอมผสมแกลบลอยไม่ยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 พบว่าเมื่อพลังงานการบดอัดต่ำลง ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะลดลงและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนผสม และดินเหนียวที่มีการผสมแกลบลอยไม่ยางพาราจะทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณความชื้นลดลง ซึ่งในกราฟบดอัดแต่ละเส้นต้องมีค่าไม่เกิน Zero Air Voids (ZAV, G_s

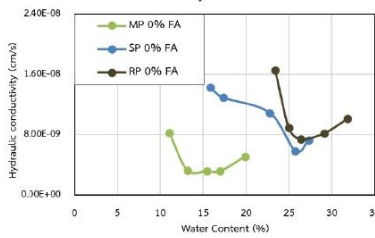
2.62) เป็นเส้นที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักดินแห้งของดินบดอัดในกรณีที่ดินอิมตัว แสดงดังรูปที่ 3



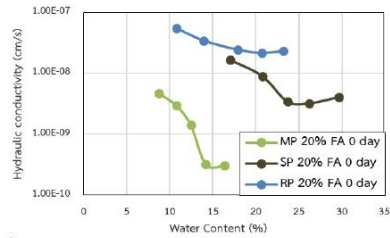
รูปที่ 3 กราฟการบดอัดในอัตราส่วนดินเหนียวต่อเถ้าลอยไมยางพารา 100:0 และ 80:20

4.3 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

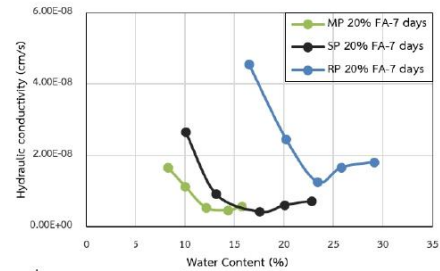
ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไมยางพาราที่อัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะเวลาบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน พบว่าเมื่อพลงงานบดอัดเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าลอยไมยางพาราที่ผสมเข้าไปในสัดส่วน 20% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงเช่นกัน แต่ระยะเวลาการบ่มไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ เพราะด้วยตัวดินเหนียวเองนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำอยู่แล้ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวรงค์ รัตนนคม [8] เนื่องจากเถ้าลอยไมยางพาราเข้าไปทำให้พื้นที่ช่องว่างภายในดินเหนียวลดลงเมื่อทำการบดอัดทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงทำให้ดินผสมเถ้าลอยไมยางพารามีความที่บวมมากขึ้น ทั้งนี้ในอัตราส่วน 0% และ 20% ที่การบดอัดทั้ง 3 พลงงานจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson [6] ดังแสดงในรูปที่ 4-7



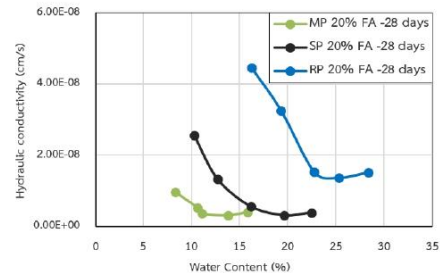
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไมยางพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไมยางพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไมยางพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน

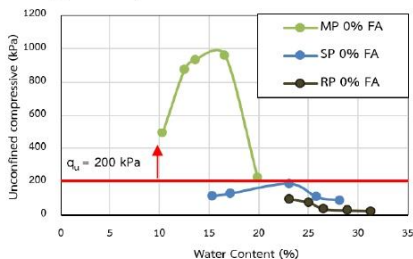


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hydraulic conductivity และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไมยางพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

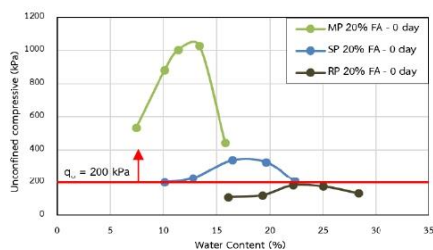
4.4 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวทำนางหอมผสมเถ้าลอยไมยางพาราในอัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพลงงานในการบดอัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8-11 และเมื่อพิจารณาในกรณีเพิ่มเถ้าลอยไมยางพารา 20% พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดยิ่งสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 9-11 ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยที่นำมาใช้เป็นเถ้าลอยไมยางพารา ซึ่งมีคุณสมบัติเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ (Pozzolanic Reaction) คือมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สูงจะเกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น $Ca(OH)_2$ ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ SiO_2 และ Al_2O_3 เกิด

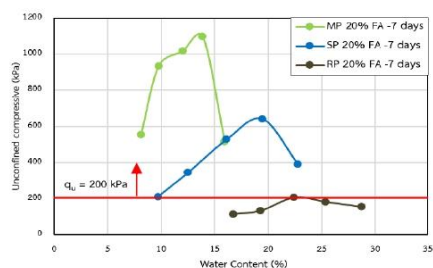
เป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานให้เนื้อดินติดกันแน่นคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ซึ่งทำให้ส่งผลต่อกำลังอัดแกนเดียวมีค่าที่สูงขึ้น และค่ากำลังอัดแกนเดียวจากการทดสอบส่วนใหญ่ในอัตราส่วนดินเหนียวผสมเถ้าลอยไม่ย่างพาราที่ 20% มีค่าที่มากกว่า 200 kPa ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson [6] ดังแสดงในรูปที่ 9-11



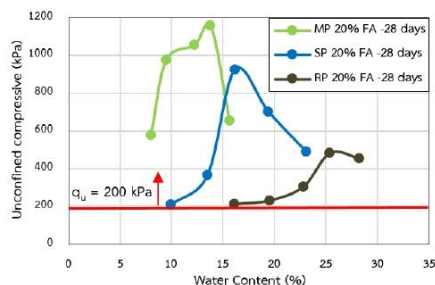
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ย่างพารา ลอย 0% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน



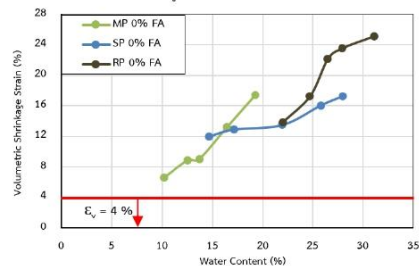
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน



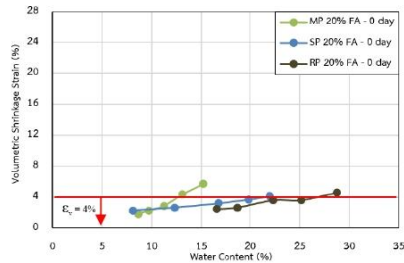
รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Unconfined compressive และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

4.5 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

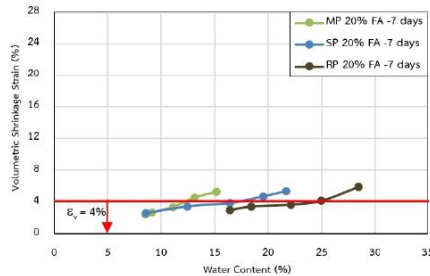
ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรของดินเหนียวทำงานผสมเถ้าลอยไม่ย่างพาราในอัตราส่วน 100:0 พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะยิ่งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12 และเมื่อพิจารณาการเพิ่มเถ้าลอยไม่ย่างพาราลงไปผสมที่อัตราส่วน 80:20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะลดลงอย่างชัดเจนว่าส่วนใหญ่มีค่าการหดตัวน้อยกว่า 4% ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson [6] ดังแสดงในรูปที่ 13-15



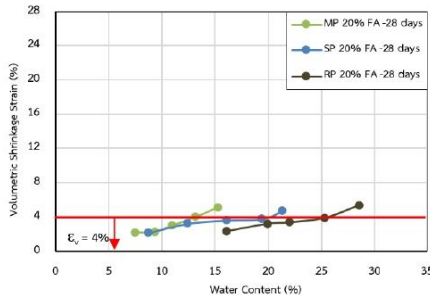
รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของอัตราส่วนผสมเถ้าลอยไม่ย่างพารา 0% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของอัตราส่วนผสมแกลบลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของอัตราส่วนผสมแกลบลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน

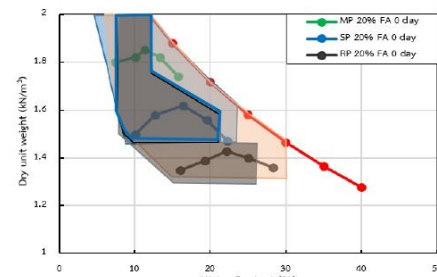


รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Volumetric shrinkage strain และ Water content ของอัตราส่วนผสมแกลบลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

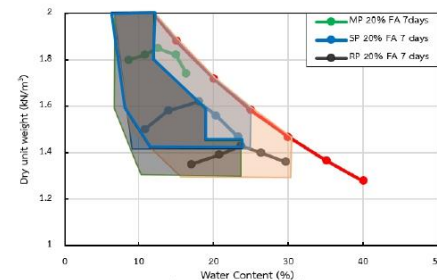
4.6 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมชนิดอัด

ในการพิจารณาพื้นที่ที่เหมาะสมในการบดอัดชั้นกันซึมในรูปของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (หัวข้อ 2.3) ถูกลำเสนอในรูปของพื้นที่ได้กราฟของกราฟการบดอัดในขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด โดยการคำนวณจากผลคูณของ Dry unit weight และ Water content ซึ่ง มีหน่วยพื้นที่เป็น

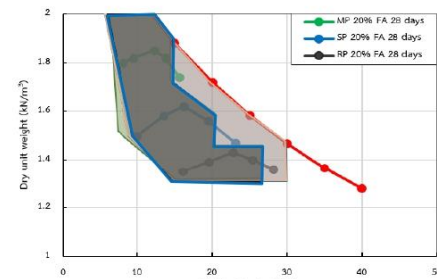
kn/m³ • % พบว่าขอบเขตที่ยอมรับทั้งหมด ผลการคำนวณของดินเหนียวทำงานผสมแกลบลอยไม่ย่างพาราที่อัตราส่วน 100:0 พบว่าไม่มีพื้นที่ที่ยอมรับได้ตามเงื่อนไข และเมื่อมีการผสมแกลบลอยไม่ย่างพาราที่อัตราส่วน 80:20 ในระยะเวลาบ่มที่ 0, 7 และ 28 วัน มีพื้นที่ได้กราฟคือ 3.814 kn/m³ • %, 3.912 kn/m³ • % และ 5.353 kn/m³ • % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้มีพื้นที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน พบว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้ที่ใหญ่ที่สุดโดยมีพื้นที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 26.929 เมื่อเทียบกับที่ระยะบ่ม 0 วัน ดังรูปที่ 16-18



รูปที่ 16 กราฟแสดงพื้นที่ที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมแกลบลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 0 วัน



รูปที่ 17 กราฟแสดงพื้นที่ที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมแกลบลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 7 วัน



รูปที่ 18 กราฟแสดงพื้นที่ที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนผสมแกลบลอยไม่ย่างพารา 20% ระยะการบ่ม 28 วัน

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินเหนียวทำงานห่อมผสมแฉะลอยไม่ยางพารา สำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอยสรุปได้ว่า การประเมินความเหมาะสมของดินเหนียวทำงานห่อมผสมแฉะลอยไม่ยางพารา ในอัตราส่วน 100:0 และ 80:20 ที่ระยะการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน เมื่อพิจารณาพื้นที่ซ้อนทับของช่วงที่ยอมรับได้ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ, ค่าลึงอัดแฉะเดียวและการหดตัวเชิงปริมาตร จะได้พื้นที่ของขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดได้โดยจัดลำดับความเหมาะสมของดินเหนียวผสมแฉะลอยไม่ยางพารา ในการนำไปใช้เป็นชั้นกันซึมคือ ในอัตราส่วนดินเหนียวต่อแฉะลอยไม่ยางพาราที่ 100:0 ไม่มีพื้นที่ที่ยอมรับได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุในชั้นกันซึมเพราะค่ากำลังอัดแฉะเดียวและค่าหดตัวเชิงปริมาตรไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด แต่เมื่อมีแฉะไม่ยางพาราเป็นส่วนผสมที่อัตราส่วน 80:20 ที่ระยะการบ่ม 0, 7 และ 28 วัน ซึ่งแฉะลอยไม่ยางพาราเป็นวัสดุที่ทำให้ค่ากำลังแฉะเดียวและค่าหดตัวเชิงปริมาตรมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงทำให้มีพื้นที่ที่ 3.814 kN/m²%, 3.912 kN/m²% และ 5.353 kN/m²% ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วน 80 : 20 ที่ระยะการบ่ม 0 วัน เทียบกับระยะบ่มที่ 7 และ 28 วัน พบว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.493 และ 26.929 ตามลำดับ จากการพิจารณาพื้นที่ที่ยอมรับได้สรุปได้ว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เป็นชั้นกันซึมมากที่สุดคือ อัตราส่วนดินเหนียวผสมแฉะลอยไม่ยางพาราที่ 80:20 ที่ระยะการบ่ม 28 วัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์สำหรับการดำเนินการวิจัยนี้ และขอขอบคุณคุณพลวัฒน์ คงสม สำหรับความช่วยเหลือในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ทำให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ (2560). แนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่การออกแบบก่อสร้าง และการจัดการสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล. กรุงเทพฯ : บริษัท ธานี ประดิษฐ์ จำกัด
- [2] อนันต์ เอลิมยานนท์ (2550). *ธรณีเทคนิคของของเสีย*. หน่วยเทคโนโลยีการศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 3.
- [3] อภิศักดิ์ ฮาวา (2551) สมบัติของคอนกรีตมวลเบาหินที่มีผสมแฉะลอยไม่ยางพาราและแฉะกลบ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [4] ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ (2561) การปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

- [5] ปิติศานต์ กร้ามาตร. 2553. คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมแฉะลอยและผงหินปูน. โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [6] Daniai, D. E. and Benson, C. H. (1990). Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, pp1811-1830.
- [7] Daniai, D. E. and Wu, Y. K. (1993). Compacted Clay Liners and Cover for Arid Sites. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, pp 223-237.
- [8] วรณวรพงศ์ รัตนานคม. 2561. การประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเพื่อเป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล, มหาวิทยาลัยบูรพา
- [9] ชัยเจริญ มาจัดสาเร (2554) การประเมินความเหมาะสมของดินบดอัด สำหรับชั้นกันซึมของสถานที่ฝังกลบฯ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ประวัติผู้เขียน

| | | |
|---------------------------------------|---|---------------------|
| ชื่อ สกุล | นางสาวณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ์ | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 6310120004 | |
| วุฒิการศึกษา | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลศรีวิชัย | 2562 |

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ณัฐรัตน์ ไชยพลฤทธิ์, ธนิต เฉลิมขานนท์ และชนันท์ ชูบอุปการ. 2566. การศึกษาความเหมาะสมของการใช้ดินเหนียวจังหวัดสงขลาผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราสำหรับชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28. วันที่ 24-26 พฤษภาคม 2566, โรงแรมภูเก็ต เกรซแลนด์ รีสอร์ท แอนด์ สปา, ภูเก็ต, ประเทศไทย. GTE24; 1-7.