การนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ

นางสาวณัฐวรรณ สมรรคนัฏ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF BENTONITE WASTE FOR LANDFILL LINER MATERIAL

Miss Nuttawan Samukanut

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ
โดย	นางสาวณัฐวรรณ สมรรคนัฏ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตระการ ประภัสพงษา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ณัฐวรรณ สมรรคนัฏ : การนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ (UTILIZATION OF BENTONITE WASTE FOR LANDFILL LINER MATERIAL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ธเนศ ศรีศิริโรจนากร, 142 หน้า.

กระบวนการขุดเจาะใต้ผิวดินทำให้เกิดของเสียจากการขุดเจาะขึ้นในปริมาณมาก เรียกว่า ของเสียเบนโทไนท์ ทั้งนี้หน่วยงานขุดเจาะใต้ผิวดินต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำของเสียเบนโทไนท์ไปกำจัดโดยการถมในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาต อีกทั้งพบว่าตัวอย่างของเสียเบนโทไนท์ที่ทำการศึกษาเป็นของเสียไม่อันตราย เนื่องจากค่าการชะละลายของโลหะหนัก คือ ปริมาณของโครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ag) สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และมีแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9.16 โดยน้ำหนักแห้ง งานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ และยังเป็นการลดปริมาณของเสียจากกระบวนการขุดเจาะที่ต้องนำไปกำจัด ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย โดยนำของเสียเบนโทไนท์มาปรับปรุงสภาพดินทรายปนร่วนเพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมในการก่อสร้างสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอย จากการทดสอบอัตราส่วนแอคทีเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 0 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าการเพิ่มขึ้นของแอคทีฟเบนโทไนท์จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลง การบวมตัวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของแอคทีฟเบนโทไนท์ในปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของแอคทีฟเบนโทไนท์เพิ่มมากเกินไปค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลง ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์อยู่ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตวัสดุกันซึม เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าเท่ากับ 7.12×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ที่ไม่เกิน 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ของ U.S.EPA และมีกำลังต้านทานต่อแรงเฉือน 269.69 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และบวมตัวร้อยละ 0.31 ของความสูงเดิม ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะ แต่เมื่อมีการทดสอบการซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายกรดอะซิติก จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

		ลายมือชื่อนิสิต	....
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	....
ปีการศึกษา	2560		

5770412421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: LINER MATERIAL / BENTONITE WASTE / LANDFILL

NUTTAWAN SAMUKANUT: UTILIZATION OF BENTONITE WASTE FOR LANDFILL LINER MATERIAL. ADVISOR: ASSOC. PROF. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. TANATE SRISIRIROJANAKORN, Ph.D., 142 pp.

Horizontal directional drilling (HDD) can generate a large amount of bentonite waste, which needs to be disposed of in other areas. However, Bentonite waste in this study was considered a non-hazardous waste because its leachate contained heavy metals that were below 2005 standard of Ministry of Industry and contained active bentonite around 9%. The research aimed to reuse the bentonite waste which would cause in the amount of waste to be disposed and saving in the costs for waste disposal. This can be done by mixing the bentonite waste with loamy sand and use as a liner material. The ratios of active bentonite in the mixture were 0, 3, 6 and 9% dry weight. Increasing the active bentonite content decreased the hydraulic conductivity and increased swelling of samples. Slightly increasing the active bentonite content increased shear strength but adding too much active bentonite decreased the shear strength. In addition, the sample with 6% active bentonite was suitable because the hydraulic conductivity was 7.12×10^{-8} cm/s and was below the limit of 1×10^{-7} cm/s, which is the requirement for the liner material on landfill by the U.S.EPA. The shear strength of the sample with 6% active bentonite was 269.69 kN/m^2 and swelling was 0.31% by initial height, which did not affect for landfill construction process. Hydraulic conductivity of liner material was increased when using NaCl , NaOH and CH_3COOH as leachate.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Environmental Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2017	Co-Advisor's Signature	....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่มีส่วนให้ความอนุเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ ศรีศิริโรจนากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือและถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ (กรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล (กรรมการ) และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตระการ ประภัสพงษา (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างยิ่ง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และมอบความปรารถนาดีให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณกองวิเคราะห์วิจัยวัสดุ ศูนย์วิจัย และพัฒนาการก่อสร้าง การเคหะแห่งชาติ และพี่ๆ วิศวกรโยธา สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือ และให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับทำงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณเศวต บุญเมือง ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างของเสียเบนโทไนท์เพื่อใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ที่ช่วยสนับสนุนส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ
กิตติกรรมประกาศ..ฉ
สารบัญ..ช
สารบัญภาพ..ฏ
สารบัญตาราง..ฒ
บทที่ 1 บทนำ..1
1.1. ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา..1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย..2
1.3. ขอบเขตการวิจัย..2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..3
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..4
2.1. การปนเปื้อนของชั้นน้ำใต้ดิน..4
2.1.1. ทรัพยากรน้ำใต้ดิน..4
2.1.2. ที่มาของการปนเปื้อน..6
2.1.3. น้ำชะขยะ..9
2.2. วัสดุกันซึม (Liner material)..12
2.2.1. วัสดุกันซึมธรรมชาติ..13
2.2.2. มาตรฐานของวัสดุกันซึม..15
2.3. ของเสียเบนโทไนท์ (Bentonite waste)..16
2.3.1. นิยาม..16
2.3.2. องค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์..19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.3.3. การกำจัดของเสียเบนโทไนท์ในปัจจุบัน 25
2.3.4. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม 26
2.4. ชนิดของดิน 26
2.4.1. แผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกดิน 26
2.5. การทดสอบการชะละลาย 28
2.5.1. การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) 28
2.5.2. การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Waste extraction test (WET) 28
2.6. กำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดิน (Shear strength) 29
2.6.1. กำลังของดิน (Soil strength) 29
2.6.2. การทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่มีแรงอัดด้านข้าง (Unconfined compression test) 29
2.7. ความซึมได้ของน้ำ (Permeability) 30
2.7.1. การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน 32
2.8. การบวมตัว (Swelling) 34
2.9. ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
2.9.1. งานวิจัยเกี่ยวกับอัตราส่วนการผสมของเสียเบนโทไนท์ 35
2.9.2. งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุกันซึมในสภาวะหลุมฝังกลบจำลอง 39
2.10. สรุปแนวทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 41
บทที่ 3 แผนการทดลอง และการดำเนินงานวิจัย 42
3.1. แผนงานวิจัย 42
3.2. วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย 45
3.2.1. ของเสียเบนโทไนท์ (Bentonite waste) 45
3.2.2. ดินทรายปนร่วน (Loamy sand) 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.3. เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 47
3.3.1. เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 47
3.3.2. สารเคมี 50
3.4. ชุดการทดลอง 50
3.4.1. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านน้ำแบบความดันน้ำเปลี่ยน 50
3.5. ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 56
3.5.1. การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาสมบัติของของเสียเบนโทไนท์ 56
3.5.2. การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน 57
3.5.3. การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของวัสดุกันซึมภายใต้สภาพสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ 61
3.6. ตัวแปรที่ทำการศึกษา 62
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง 64
4.1. การทดลองที่ 1. 1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นพิษของของเสียเบนโทไนท์ 64
4.1.1. การชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) 64
4.2. การทดลองที่ 1. 2 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของของเสียเบนโทไนท์และดินทรายปนร่วน 66
4.2.1. ขนาดอนุภาค 66
4.2.2. ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ 68
4.3. การทดลองที่ 2 ผลของอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน ต่อสมบัติของวัสดุกันซึม 68
4.3.1. กำลังต้านทานต่อแรงเฉือน 71
4.3.2. ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำ 73
4.3.3. การบวมตัว 76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.4. การทดลองที่ 3 ผลของของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะต่อค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึม 78

4.4.1. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 78

4.4.2. สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) 80

4.4.3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 83

4.5. การประเมินต้นทุนเชิงวิศวกรรม และการประยุกต์ใช้งานจริง 85

4.5.1. การประเมินต้นทุนเชิงวิศวกรรม 85

4.5.2. การประยุกต์ใช้งานจริง 86

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 89

5.1. สรุปผลการวิจัย 89

5.2. ข้อเสนอแนะ 90

รายการอ้างอิง 91

ภาคผนวก ก. วิธีการการทดสอบ 101

ภาคผนวก ก.1 การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้วโดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) 102

ภาคผนวก ก.2 วิธีวิเคราะห์ Methylene blue procedure 103

ภาคผนวก ก.3 การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) 106

ภาคผนวก ก.4 การวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) 108

ภาคผนวก ก.5 การวิเคราะห์ค่าการบวมตัว (Swelling) 110

ภาคผนวก ข. ข้อมูลดิบจากการทดลอง 111

ภาคผนวก ข.1 ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ 112

ภาคผนวก ข.2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) 113

ภาคผนวก ข.3 การทดสอบการรับแรงเฉือน 125

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ภาคผนวก ข.4 การทดสอบการซึมผ่านโดยใช้น้ำปราศจากไอออน 126

ภาคผนวก ข.5 การทดสอบการบวมตัว.. 127

ภาคผนวก ข.6 การทดสอบการซึมผ่านโดยใช้ของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ.. 139

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 142

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2. 1 ชั้นน้ำแบบต่างๆ... 4

ภาพที่ 2. 2 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากหลุมฝังกลบขยะสู่น้ำบาดาล.................................... 8

ภาพที่ 2. 3 วัสดุกันซึมประเภทดินเหนียวบดอัด.. 14

ภาพที่ 2. 4 วัสดุกันซึมตามมาตรฐานของ U.S.EPA... 15

ภาพที่ 2. 5 ผังกระบวนการในการเกิดของเสียเบนโทไนท์.. 18

ภาพที่ 2. 6 กระบวนการในการเกิดของเสียเบนโทไนท์.. 18

ภาพที่ 2. 7 องค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์).. 19

ภาพที่ 2. 8 การจัดเรียงตัวของแร่มอนต์มอริลโอไนท์... 21

ภาพที่ 2. 9 โครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนท์... 22

ภาพที่ 2. 10 การจัดเรียงตัวของโซเดียมเบนโทไนท์... 23

ภาพที่ 2. 11 วงน้ำรอบอนุภาค (Diffuse double layer - DDL)... 24

ภาพที่ 2. 12 การขยายตัว (Swelling) ของเบนโทไนท์เมื่อมีน้ำในโครงสร้าง.................................. 25

ภาพที่ 2. 13 สามเหลี่ยมของการจำแนกประเภทของดิน... 26

ภาพที่ 2. 14 การทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่มีแรงอัดด้านข้าง.. 30

ภาพที่ 2. 15 การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head permeameter)........................... 32

ภาพที่ 2. 16 การทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter)........................... 34

ภาพที่ 3. 1 แผนการทดลอง..44

ภาพที่ 3. 2 ตัวอย่างของเสียเบนโทไนท์...45

ภาพที่ 3. 3 ตัวอย่างดินทรายปนร่วน.. 46

ภาพที่ 3. 4 การกระจายตัวของขนาดเม็ดดินทรายปนร่วน... 46

ภาพที่ 3. 5 ชุดอุปกรณ์ขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ... 48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

ภาพที่ 3. 6 อุปกรณ์วัดความชื้นในดิน 49

ภาพที่ 3. 7 ขนาดของ Rigid wall compaction-mold permeameter ที่ใช้ในการทดลอง 51

ภาพที่ 3. 8 Rigid wall compaction-mold permeameter ที่ใช้ในการทดลอง 53

ภาพที่ 3. 9 การประกอบ Rigid wall compaction-mold permeameter 54

ภาพที่ 3. 10 แผงหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำ 54

ภาพที่ 3. 11 แผนผังการทดลองส่วนที่ 1 57

ภาพที่ 3. 12 แผนผังการทดลองส่วนที่ 2 60

ภาพที่ 3. 13 แผนผังการทดลองส่วนที่ 3 62

ภาพที่ 4. 1 ขนาดอนุภาคของของของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วน 66

ภาพที่ 4. 2 ขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์บริสุทธิ์ ของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วน 67

ภาพที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และความหนาแน่นแห้งของอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน 69

ภาพที่ 4. 4 กำลังต้านทานแรงเฉือนของแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์ 71

ภาพที่ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ และอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน 73

ภาพที่ 4. 6 การบวมตัวของดินแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน 76

ภาพที่ 4. 7 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นน้ำชะละลาย 79

ภาพที่ 4. 8 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกเป็นน้ำชะละลาย 81

ภาพที่ 4. 9 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นน้ำชะละลาย 83

ภาพที่ 4. 10 รถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการผสมของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน 87

ภาพที่ 4. 11 รถบดล้อหนามขนาดใหญ่ใช้สำหรับบดอัดดิน 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

ภาพที่ 4. 12 รถปาดเกลี่ยใช้ปาดหน้าดินในหลุมฝังกลบขยะให้เรียบ 88

ภาพที่ ก. 1 วงสีฟ้า (Blue halo)..104

ภาพที่ ก. 2 กราฟมาตรฐานของเบนโทไนท์บริสุทธิ์สำหรับวิเคราะห์เบนโทไนท์ที่ใช้งานได้ 105

ภาพที่ ก. 3 การวางตัวอย่างดินบนแท่นทดสอบ 108

ภาพที่ ก. 4 การนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำ.. 110

ภาพที่ ก. 5 แผ่นวัดการบวมตัว 110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2 - 1 เขตน้ำบาดาล และความลึกน้ำบาดาลในเขตพื้นที่จังหวัดต่างๆ................................5

ตารางที่ 2 - 2 จำนวนบ่อบาดาลทั่วประเทศไทย 6

ตารางที่ 2 - 3 การกำจัดขยะมูลฝอยโดยการฝังกลบปี พ.ศ. 2557 - 2559 7

ตารางที่ 2 - 4 การปนเปื้อนของชั้นน้ำใต้ดินจากการฝังกลบขยะที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการในแต่ละประเทศ... 9

ตารางที่ 2 - 5 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในแต่ละกลุ่มประเทศ 10

ตารางที่ 2 - 6 ลักษณะของน้ำชะขยะมูลฝอยในบริเวณที่ฝังกลบขยะใหม่และเก่า........................ 11

ตารางที่ 2 - 7 การทดสอบสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ในแต่ละขั้นตอน 17

ตารางที่ 2 - 8 องค์ประกอบทางแร่ธาตุ (Mineralogical composition) ของเบนโทไนท์........... 20

ตารางที่ 2 - 9 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของเบนโทไนท์....................... 20

ตารางที่ 2 - 10 การจำแนกประเภทของดินตามขนาดเม็ดดิน 27

ตารางที่ 2 - 11 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลักษณะต่างๆ 31

ตารางที่ 3 - 1 การทดสอบความเป็นพิษ ขนาดของอนุภาค และปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ ของของเสียเบนโทไนท์...56

ตารางที่ 3 - 2 การวิเคราะห์สมบัติการรับแรงเฉือน การซึมผ่านของน้ำ และการบวมตัว.............58

ตารางที่ 3 - 3 ตัวแปรของการทดลองในการทำวิจัย..63

ตารางที่ 4 - 1 การชะละลายของโลหะหนักของของเสียเบนโทไนท์ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) เทียบกับค่ามาตรฐาน...65

ตารางที่ 4 - 2 เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย พ.ศ. 2548..65

ตารางที่ 4 - 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม............70

ตารางที่ 4 - 4 อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแต่ละอัตราส่วน 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

ตาราง ก - 1 การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน....106

ตาราง ข - 1 ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ที่ใช้ในงานวิจัย 112

ตาราง ข - 2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1....113

ตาราง ข - 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2....114

ตาราง ข - 4 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3....115

ตาราง ข - 5 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1....116

ตาราง ข - 6 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2....117

ตาราง ข - 7 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3....118

ตาราง ข - 8 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1....119

ตาราง ข - 9 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2....120

ตาราง ข - 10 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3....121

ตาราง ข - 11 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1....122

ตาราง ข - 12 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2. 123

ตาราง ข - 13 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3....124

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

ตาราง ข - 14 การรับแรงเฉือนของวัสดุกันซึมในอัตราส่วนต่างๆ 125

ตาราง ข - 15 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำชะละลาย 126

ตาราง ข - 16 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1 127

ตาราง ข - 17 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2 128

ตาราง ข - 18 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3 129

ตาราง ข - 19 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1 130

ตาราง ข - 20 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2 131

ตาราง ข - 21 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3 132

ตาราง ข - 22 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1 133

ตาราง ข - 23 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2 134

ตาราง ข - 24 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3 135

ตาราง ข - 25 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1 136

ตาราง ข - 26 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2 137

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

ตาราง ข - 27 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3....138

ตาราง ข - 28 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นน้ำชะละลาย....139

ตาราง ข - 29 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกเป็นน้ำชะละลาย....140

ตาราง ข - 30 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นน้ำชะละลาย....141

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1. ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

การกำจัดขยะโดยการฝังกลบเป็นวิธีที่ใช้กันมานานในประเทศไทยเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ต่ำ แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการกำจัดขยะแบบฝังกลบ คือ ปัญหาการปนเปื้อนน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน โดยน้ำชะขยะที่ไหลซึมลงมาอาจมีการปนเปื้อนสารเคมี และเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งเมื่อไหลเข้าไปในบ่อน้ำบาดาลของชุมชนบริเวณใกล้เคียงจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชนที่มีการใช้ประโยชน์ของน้ำบาดาลทั้งในการอุปโภค บริโภค และเกษตรกรรม การปนเปื้อนในน้ำใต้ดินเป็นปัญหาสำคัญในประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากส่งผลกระทบทั้งด้านสิ่งแวดล้อม สุขภาพอนามัย เศรษฐกิจ และสังคม ดังนั้นจึงควรที่จะลดปัญหาการปนเปื้อนโดยการป้องกันการไหลของน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ในต่างประเทศจะนิยมใช้วัสดุกันซึม (Liner material) ปูในตำแหน่งด้านล่างสุดและ ด้านข้างของหลุมฝังกลบเพื่อป้องกันการรั่วซึมในแนวดิ่ง และแนวระดับ หรืออย่างน้อยที่สุดจะชะลอการไหลของน้ำชะขยะให้ซึมผ่านได้ช้าลงจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนได้น้อย ชนิดของวัสดุกันซึมมีหลายประเภท เช่น วัสดุกันซึมประเภทดินเหนียว (Clay liner material) ที่มีราคาก่อสร้างที่ถูกแต่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่ต่ำมากนัก นอกจากนี้บางพื้นที่ไม่มีดินเหนียวในการก่อสร้าง หรือพื้นที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งดินเหนียวทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ส่วนวัสดุกันซึมสังเคราะห์ (Synthetic liner material) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ สามารถชะลอการไหลซึมของน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ น้ำหนักเบา ง่ายต่อการก่อสร้าง แต่มีราคาที่สูง

มาตรฐานการออกแบบวัสดุกันซึมของ U.S.EPA ค.ศ. 1993 และมาตรฐานการจัดการขยะมูลฝอยชุมชนที่จัดทำโดยกรมควบคุมมลพิษ พ.ศ. 2544 ได้ระบุแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และอนุญาตให้มีการเติมสารปรับปรุงสภาพดินเดิม คือ เบนโทไนท์ลงไปผสมกับทราย เพื่อแก้ปัญหาบางพื้นที่ไม่มีดินเหนียวในการก่อสร้าง แต่เนื่องจากเบนโทไนท์มีราคาที่แพงทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมาก จึงนำมาสู่งานวิจัยนี้ที่สนใจจะทำการศึกษาวัสดุกันซึมที่มีสมบัติต้านทานการซึมผ่านของน้ำชะขยะโดยใช้ของเสียเบนโทไนท์ผสมกับดินเดิมในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนร่วน (Loamy sand) เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนดินเหนียวในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อลดต้นทุนการผลิตวัสดุกันซึม และเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเบนโทไนท์ โดยตัวอย่างที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นของเสียเบนโทไนท์ที่เกิดจากงานการขุดเจาะใต้ผิวดิน เช่น การขุดเจาะเพื่อวางท่อ และการขุดเจาะเพื่อวางอุโมงค์ เป็นต้น

โดยประมาณได้ว่าการขุดเจาะใต้ผิวดินเพื่อวางท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตรก่อให้เกิดของเสียเบนโทไนท์ 10,400 กิโลกรัมต่อกิโลเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพดินบริเวณที่ทำการขุดเจาะ

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุกันซึมระหว่างแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนทั้งในแง่ความต้านทานต่อแรงเฉือน การซึมผ่านของน้ำ และการบวมตัว โดยคาดหวังว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันการรั่วซึม หรือช่วยชะลอการไหลของน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุกันซึมจากของเสียเบนโทไนท์

1.2.2. ศึกษาสมบัติของวัสดุกันซึมภายใต้สภาพสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ

1.3. ขอบเขตการวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการขยะ ตึกปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกองวิเคราะห์วิจัยวัสดุ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการก่อสร้าง การเคหะแห่งชาติ มีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1. ศึกษาตัวอย่างของของเสียเบนโทไนท์ที่ได้จากงานการขุดเจาะใต้ผิวดิน เช่น การขุดเจาะเพื่อวางอุโมงค์ หรือการขุดเจาะเพื่อวางท่อ

1.3.2. ดำเนินการทดลองโดยใช้ดินเดิมเป็นดินทรายปนร่วน (Loamy sand) เนื่องจากเป็นดินที่พบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่สูง

1.3.3. ศึกษาความเป็นพิษของของเสียเบนโทไนท์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี Waste extraction test (WET) ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 สมบัติทางกายภาพของของเสียเบนโทไนท์และดินทรายปนร่วนด้วยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analysis) ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer และสมบัติทางเคมีของของเสียเบนโทไนท์ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ ซึ่งสามารถวัดได้ตามวิธี Methylene blue procedure ตามมาตรฐาน ASTM C837-09

1.3.4. ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน โดยการวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) ซึ่งสามารถวัดได้ตามการทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่มีแรงอัดด้านข้าง (Unconfined compression test) ตาม

มาตรฐาน ASTM D2166-00 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ซึ่งสามารถวัดได้ตามวิธีวิเคราะห์ Rigid wall compaction-mold permeameter แบบ Falling head ตามมาตรฐาน ASTM D5856-15 และการวิเคราะห์ค่าการบวมตัว (Swelling) ซึ่งสามารถวัดได้ตามวิธี California bearing ratio test (C.B.R) ตามมาตรฐาน ASTM D1883-16

1.3.5. ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของวัสดุกันซึมโดยใช้ของเหลวในการไหลซึมผ่านแบบต่างๆ คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. จากการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุกันซึมจากของเสียเบนโทไนท์ จะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ และยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที พร้อมทั้งผ่านเกณฑ์ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือน และการบวมตัว ก็จะสามารถผลิตวัสดุกันซึมที่ลดปัญหาการปนเปื้อนน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ลดต้นทุนการผลิตวัสดุกันซึม สามารถใช้ได้ในพื้นที่ที่ขาดแคลนดินเหนียวสำหรับการก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะ และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเบนโทไนท์

1.4.2. จากการศึกษาสมบัติของวัสดุกันซึมภายใต้สภาพสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ ก็จะสามารถทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่พัฒนาขึ้นเมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ในสภาพหลุมฝังกลบ

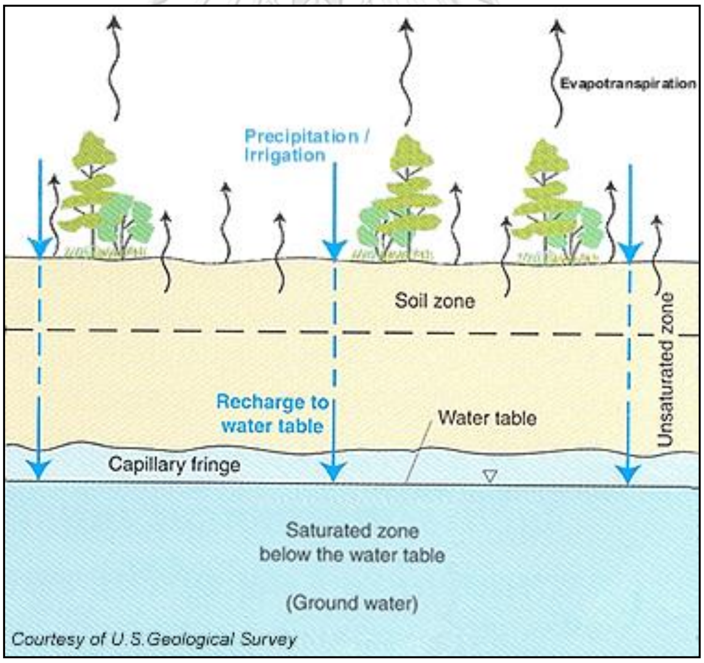
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. การปนเปื้อนของชั้นน้ำใต้ดิน

2.1.1. ทรัพยากรน้ำใต้ดิน

ชั้นน้ำใต้ดิน คือ น้ำในชั้นที่อยู่ในระดับใต้ดิน เกิดจากการดูดซับน้ำลงสู่ใต้ดิน น้ำใต้ดินสามารถแบ่งออกเป็นหลายลักษณะตามการกักของน้ำที่ถูกกักเก็บไว้ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ชั้นหิน ชั้นตะกอน หรือชั้นกรวด โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนตามเส้นระดับน้ำใต้ดิน (Water table) คือ บริเวณที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) และบริเวณส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) (Greer และ Welch, 2012) แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2. 1 ชั้นน้ำแบบต่างๆ

(Greer และ Welch, 2012)

- บริเวณที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) เป็นบริเวณตั้งแต่ผิวดินลงไปจนถึงเส้นระดับน้ำใต้ดินจะมีช่องว่างบางส่วนไว้กักเก็บน้ำ และบางส่วนจะมีอากาศแทรกอยู่ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ น้ำในดิน (Soil water) น้ำซึม (Gravitational water) และน้ำซับ (Capillary water)

- บริเวณส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) เป็นบริเวณที่อยู่ใต้เส้นระดับน้ำใต้ดินลงไป ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะอิ่มตัวไปด้วยน้ำ ไม่มีอากาศเหลืออยู่ภายในน้ำใต้ดินในส่วนนี้ คือ น้ำบาดาล (Ground water)

"น้ำบาดาล" หมายความว่า น้ำใต้ดินที่เกิดอยู่ในชั้นดิน กรวด ทราย หรือหิน ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเกินความลึกที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษาแต่จะกำหนดความลึกน้อยกว่าสิบเมตรไม่ได้ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2520) ตามพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้กำหนดเขตน้ำบาดาลความลึกของน้ำบาดาล ตามตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2- 1 เขตน้ำบาดาล และความลึกน้ำบาดาลในเขตพื้นที่จังหวัดต่างๆ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2520)

พื้นที่	ความลึก
กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา สมุทรปราการ สมุทรสาคร นครปฐม	ลึกจากผิวดินลงไป เกินกว่า 15 เมตร
กาฬสินธุ์ ขอนแก่น ชัยภูมิ นครพนม นครราชสีมา บุรีรัมย์ มหาสารคาม มุกดาหาร ยโสธร ร้อยเอ็ด เลย ศรีสะเกษ สกลนคร สุรินทร์ หนองคาย หนองบัวลำภู อุดรธานี อุบลราชธานี อำนาจเจริญ	ลึกจากผิวดินลงไป เกินกว่า 20 เมตร
กระบี่ กาญจนบุรี กำแพงเพชร จันทบุรี ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ชัยนาท ชุมพร เชียงราย เชียงใหม่ ตราด ตรัง ตาก นครนายก นครศรีธรรมราช นครสวรรค์ นราธิวาส น่าน ประจวบคีรีขันธ์ ปราจีนบุรี ปัตตานี พะเยา พิจิตร พิษณุโลก เพชรบูรณ์ เพชรบุรี แพร่ พังงา พัทลุง ภูเก็ต แม่ฮ่องสอน ยะลา ระนอง ระยอง ราชบุรี ลพบุรี ลำปาง ลำพูน สงขลา สตูล สมุทรสงคราม สระแก้ว สระบุรี สิงห์บุรี สุโขทัย สุพรรณบุรี สุราษฎร์ธานี อ่างทอง อุทัยธานี อุตรดิตถ์	ลึกจากผิวดินลงไป เกินกว่า 30 เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำจืดที่ใหญ่ที่สุดสามารถที่จะสูบขึ้นมาเพื่อบริโภค อุปโภคได้ ดังนั้นจึงถือว่าน้ำบาดาลมีความสำคัญต่อชีวิตมนุษย์ (พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกูล, 2558) น้ำบาดาลมีความสำคัญในการดำรงชีวิตเพิ่มมากขึ้น ประชาชนประมาณ 2 พันล้านคนทั่วโลกบริโภคน้ำดื่มที่ผลิตจากน้ำบาดาล นอกจากนี้การเกษตร และอุตสาหกรรมก็มีการใช้ประโยชน์จากน้ำบาดาล เช่น สหภาพยุโรปใช้น้ำบาดาลผลิตน้ำดื่มร้อยละ 70 แอฟริกาใต้ใช้น้ำบาดาลผลิตน้ำประปาร้อยละ 80 อินเดียใช้น้ำบาดาลในการชลประทานร้อยละ 60 และสหรัฐอเมริกาใช้น้ำบาดาลผลิตน้ำดื่มร้อยละ 50 (Wijnen และคณะ, 2012) ในส่วนของประเทศไทยมีการใช้ประโยชน์จากน้ำบาดาลในปริมาณที่มาก มีปริมาณน้ำประมาณ 1.1 ล้านล้านลูกบาศก์เมตร ใช้เพื่อการเกษตรปีละ 5,800 ล้านลูกบาศก์เมตร ใช้เพื่ออุตสาหกรรมปีละ 2,000 ล้านลูกบาศก์เมตร และใช้เพื่ออุปโภคบริโภคปีละ 1,000 ล้านลูกบาศก์เมตร และใช้เพื่อกิจกรรมต่างๆประมาณปีละ 8,800 ล้านลูกบาศก์เมตร (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2557) โดยบ่อบาดาลทั่วทั้งประเทศไทยที่สามารถใช้งานได้ในปัจจุบันแสดงตามตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2- 2 จำนวนบ่อบาดาลทั่วประเทศไทย (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2560)

ภาคในประเทศไทย	จำนวนบ่อบาดาลที่ใช้งานได้ (บ่อ)
ภาคเหนือ	12,171
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	38,657
ภาคตะวันออก	6,473
ภาคตะวันตก	5,271
ภาคกลาง	25,535
ภาคใต้	13,341
รวม	**101,448**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.2. ที่มาของการปนเปื้อน

การปนเปื้อนของชั้นน้ำใต้ดินจากน้ำชะขยะเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญ สามารถพบได้ทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ปัญหานี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน สภาพแวดล้อม และระบบนิเวศในบริเวณใกล้เคียงหลุมฝังกลบขยะ นอกจากนี้การทิ้งขยะโดยไม่มีการแยก เช่น ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยาฆ่าแมลง รวมกันนั้นจะทำให้เกิดน้ำชะขยะที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก (Wachirawongsakorn, 2013) ปัจจุบันหลุมฝังกลบ

ขยะในประเทศไทยที่มีการฝังกลบแบบไม่ถูกหลักวิชาการ เช่น การกำจัดขยะมูลฝอยแบบเทกอง (Open dump) การฝังกลบแบบเทกองควบคุม (Control dump) ขนาดมากกว่า 50 ตัน/วัน หรือการเทกองทิ้งในบ่อดินเก่า พื้นที่รกร้าง มีจำนวนมากถึง 2,072 แห่ง แต่หลุมฝังกลบขยะที่ถูกหลักวิชาการมีจำนวนเพียง 294 แห่งทั่วประเทศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) แสดงดังตารางที่ 2-3

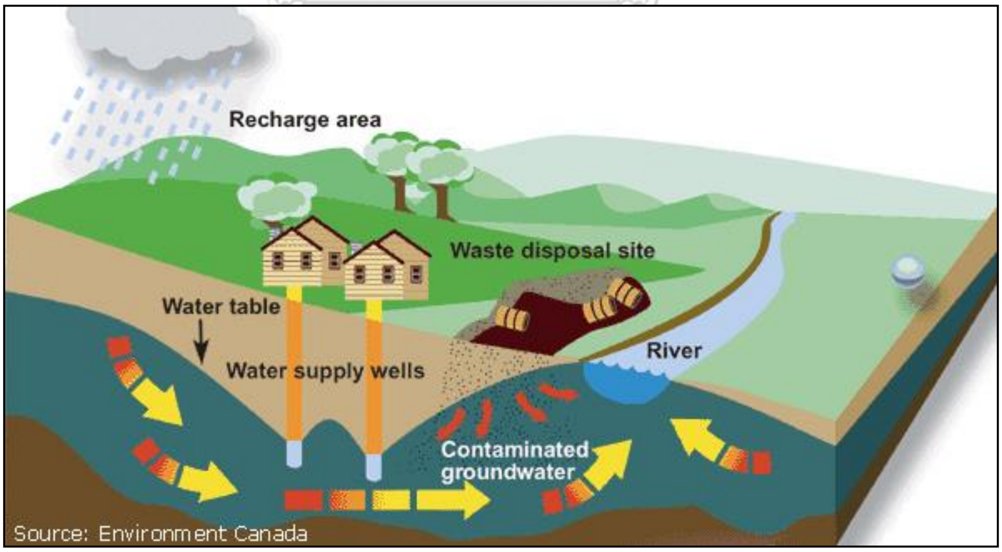
ตารางที่ 2- 3 การกำจัดขยะมูลฝอยโดยการฝังกลบปี พ.ศ. 2557 - 2559 (กรมควบคุมมลพิษ, 2558, 2559, 2560)

การฝังกลบ	ลักษณะ	พ.ศ. 2557	พ.ศ. 2558	พ.ศ. 2559
		จำนวน (แห่ง)	จำนวน (แห่ง)	จำนวน (แห่ง)
การฝังกลบแบบไม่ถูกหลักวิชาการ	การกำจัดขยะมูลฝอยแบบเทกอง (Open dump)	1,898	2,075	2,057
	การฝังกลบแบบเทกองควบคุม (Control dump) ขนาดมากกว่า 50 ตันต่อวัน	25	19	15
	รวม	**1,923**	**2,094**	**2,072**
การฝังกลบแบบถูกหลักวิชาการ	การฝังกลบขยะมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) และการฝังกลบขยะมูลฝอยเชิงวิศวกรรม (Engineered landfill)	78	84	92
	การฝังกลบแบบเทกองควบคุม (Control dump) ขนาดน้อยกว่า 50 ตันต่อวัน	381	321	202
	รวม	**459**	**405**	**294**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 2-3 จะพบว่าสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยโดยการฝังกลบแบบถูกหลักวิชาการ เช่น การฝังกลบขยะมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) การฝังกลบขยะมูลฝอยเชิงวิศวกรรม (Engineered landfill) และการฝังกลบแบบเทกองควบคุม (Control dump) ขนาดน้อยกว่า 50 ตันต่อวัน มีจำนวนลดลง เนื่องจากการฝังกลบแบบเทกองควบคุม (Control dump) ขนาดน้อยกว่า 50 ตันต่อวัน มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการดำเนินงานเป็นการกำจัดแบบเทกอง (Open dump) เนื่องจากปัญหาด้านงบประมาณ การจัดหาดิน ฝังกลบ และการขาดบุคลากรที่มีความรู้ในการจัดการขยะ เป็นต้น

การฝังกลบขยะที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการมีหลายรูปแบบ เช่น การเทขยะทิ้งกลางแจ้ง หลุมฝังกลบขยะไม่มีระบบกันซึมที่ก้นบ่อ หรือระบบกันซึมไม่มีประสิทธิภาพ เป็นต้น ดังนั้นหลุมฝังกลบขยะเหล่านี้จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน น้ำชะขยะจะไหลผ่านโพรงดินอิ่มน้ำซึมลงตามชั้นดินในแนวดิ่งตามแรงโน้มถ่วงของโลกจนถึงน้ำบาดาล ถ้าน้ำบาดาลที่ปนเปื้อนไหลไปสู่บ่อน้ำบาดาลของชุมชนบริเวณใกล้เคียงจะก่อให้เกิดปัญหาแก่ประชาชนที่มีการอุปโภค และบริโภคน้ำบาดาล (ธนิต เฉลิมยานนท์, 2552) ดังภาพที่ 2.2 และการปนเปื้อนของชั้นน้ำใต้ดินจากการฝังกลบขยะที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการในแต่ละประเทศแสดงดังตารางที่ 2-4



ภาพที่ 2. 2 การเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากหลุมฝังกลบขยะสู่น้ำบาดาล
(The United States Geological Survey, 2015)

ตารางที่ 2- 4 การปนเปื้อนของชั้นน้ำใต้ดินจากการฝังกลบขยะที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการในแต่ละประเทศ (Klinck และ Stuart, 1999)

ประเทศ	ลักษณะการกำจัดขยะ	ประเภทของขยะ	ตัวชี้วัดการปนเปื้อน
อาร์เจนตินา	แบบเทกองทิ้งกลางแจ้ง	ขยะชุมชน	Cl, HCO_3 และ Zn
บราซิล	แบบเทกองทิ้งพื้นที่รกร้าง	ขยะชุมชน และขยะอุตสาหกรรม	Na, Cl, และ NH_4
กรีก	แบบเทกองทิ้งกลางแจ้ง	ขยะชุมชน	โลหะหนัก, Cl, P, NH_4 และ NO_3
อินเดีย	แบบเทกองทิ้งในพื้นที่ลุ่ม	ขยะชุมชน	TDS, Cl, SO_4, Fe, และNH_4
โรมาเนีย	แบบเทกองทิ้งในเหมืองเก่า	ขยะชุมชน และขยะอุตสาหกรรม	Na, Cl, Cr, Ni, Cu, CN และ NH_4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.3. น้ำชะขยะ

น้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate) เป็นของเหลวใดๆ ที่ไหลซึมผ่านชั้นขยะ ส่วนใหญ่เป็นของเหลวที่เกิดจากการย่อยสลาย (Decomposition) ของขยะมูลฝอย ของเหลวที่อยู่ภายในขยะมูลฝอย (Inherent water) และของเหลวบางส่วนมาจากภายนอก เช่น น้ำฝน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินที่ไหลซึมเข้ามาในบริเวณหลุมฝังกลบขยะ การที่ของเหลวไหลซึมผ่านชั้นของขยะทำให้องค์ประกอบทางชีวภาพ และเคมีของขยะมูลฝอยนั้นชะละลายปนกับของเหลวดังกล่าวกลายเป็นน้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate) ซึ่งเป็นมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ลักษณะน้ำชะขยะขึ้นอยู่กับประเภทของขยะมูลฝอย อายุของหลุมฝังกลบขยะ และการจัดการหลุมฝังกลบขยะ (Bhalla และคณะ, 2013) โดยปริมาณของขยะมูลฝอยแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2- 5 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในแต่ละกลุ่มประเทศ (Challcharoenwattana และ Pharino, 2015)

ประเทศ	อัตราการเกิดขยะ (กิโลกรัมต่อคนต่อวัน)	สารอินทรีย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	กระดาษ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พลาสติก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	แก้ว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	โลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อื่นๆ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ประเทศที่มีรายได้อยู่ในระดับสูง (อังกฤษ สิงคโปร์)	2.1	28	31	11	7	6	17
ประเทศที่มีรายได้อยู่ในระดับปานกลางกลุ่มบน (ตุรกี ประเทศไทย)	1.2	54	14	11	5	3	13
ประเทศที่มีรายได้อยู่ในระดับปานกลางกลุ่มล่าง (พม่า ฟิลิปปินส์)	0.79	59	9	12	3	2	15
ประเทศที่มีรายได้อยู่ในระดับต่ำ (เฮติ มาลี รวันดา)	0.6	64	5	8	3	3	17
กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย	1.57	50	11.3	22.5	2.7	1.7	12
พนมเปญ, กัมพูชา	0.74	69.6	6.4	15.5	1.2	0.6	7
เดลี, อินเดีย	0.5	38.6	5.6	6	1	0.2	49
ปักกิ่ง,จีน	0.85	63.4	11.1	12.7	1.8	0.3	11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ของเสียประเภทสารอินทรีย์ (Organic waste) ประกอบด้วยของเสียเศษอาหาร (Food waste) เป็นของเสียที่เกิดจากการเตรียมวัตถุดิบ การปรุงอาหาร และการบริโภคอาหารของประชาชนในโรงงานอุตสาหกรรม ห้างสรรพสินค้า ร้านอาหาร ตลาด และบ้านพักอาศัย เช่น เปลือกผลไม้ ผัก เนื้อสัตว์ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และเศษอาหาร เป็นต้น ของเสียทางเกษตรกรรม (Agricultural waste) เป็นของเสียหลังจากการเก็บเกี่ยวทางการเกษตร เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ ฟาง และ มูลสัตว์ เป็นต้น ลักษณะของของเสียประเภทนี้จะมีความชื้นสูง สามารถย่อยสลายทางชีวภาพเกิดเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid - VFA) ในกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) และสร้างกรดอะซิติก (Acetic acid - CH_3COOH) ในกระบวนการ Acetogenesis (United Nations Environment Programme 2013; เทศบาลนครภูเก็ต, 2553)

นอกจากนี้น้ำชะขยะมูลฝอยยังมีองค์ประกอบของไอออนหลากหลายชนิด เช่น โซเดียมไอออน (Na^+) โพแทสเซียมไอออน (K^+) แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เป็นต้น โดยความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในน้ำชะขยะมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับอายุของหลุมฝังกลบขยะแสดงดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2- 6 ลักษณะของน้ำชะขยะมูลฝอยในบริเวณที่ฝังกลบขยะใหม่และเก่า (ศูนย์วิจัย และจัดการคุณภาพอากาศ, 2554)

ชนิดของไอออน	**ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	
	หลุมฝังกลบใหม่ (อายุน้อยกว่า 2 ปี)	**หลุมฝังกลบเก่า (อายุมากกว่า 2 ปี)**
	ช่วงข้อมูล	ช่วงข้อมูล
BOD_5	2,000–30,000	100–200
COD	3,000–60,000	100–500
ของแข็งแขวนลอย (TDS)	200–2,000	100–400
โซเดียมไอออน (Na^+)	200–2,500	100–200
โพแทสเซียมไอออน (K^+)	200–1,000	50–400
แคลเซียมไอออน (Ca^{2+})	200–3,000	100–400
แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})	50–1,500	50–200
แคลเซียมไอออน (Cl^-)	200–3,000	100–400

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินบริเวณใกล้เคียงหลุมฝังกลบขยะมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ สารเคมีอินทรีย์สังเคราะห์ สารไฮโดรคาร์บอน แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (Ammonia nitrogen) โลหะหนัก (Heavy metals) สารอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ (Chlorinated organic) และเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) แต่สารปนเปื้อนที่พบมากที่สุด คือ สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic hydrocarbons) และสารประกอบที่มีความเป็นขั้วสูง (พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกูล, 2558) สารปนเปื้อนในน้ำดินสามารถทำปฏิกิริยากับดิน และแร่ธาตุในดินได้ โดยสารประกอบอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับดินรวมถึงการดูดซับ การย่อยสลายทางชีวภาพ ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ปฏิกิริยารีดอกซ์ และกระบวนการระเหยของแอมโมเนีย (Volatilization) ส่วนโลหะหนักจะถูกดูดซับ มีการแลกเปลี่ยนไอออน ตกตะกอน และปฏิกิริยารีดอกซ์ (Sizirici และ Tansel, 2015) นอกจากนี้ โลหะหนัก (Cd, Cu, As, Pb) NH_4^+ และ NO_3^- ยังเป็นอันตรายต่อร่างกายของมนุษย์ถ้ามีการบริโภคน้ำที่ปนเปื้อนสารเหล่านี้ลงไป (Han และคณะ, 2014)

ปัญหาการปนเปื้อนของชั้นน้ำใต้ดินจากน้ำชะขยะ นับว่าเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบทั้งด้านสิ่งแวดล้อม ด้านสุขภาพอนามัย ด้านเศรษฐกิจ และด้านสังคม ดังนั้นจึงควรที่จะลดปัญหาโดยการชะลอการไหลซึมน้ำชะขยะลงมาสู่ชั้นน้ำใต้ดินสามารถทำได้โดยปูวัสดุกันซึมในตำแหน่งด้านล่างสุด และด้านข้างของหลุมฝังกลบขยะ (ภิรส เจนวิทยะเวชกุล, 2543)

2.2. วัสดุกันซึม (Liner material)

วัสดุกันซึมเป็นวัสดุธรรมชาติ หรือวัสดุที่ถูกสังเคราะห์มีอัตราการไหลซึมต่ำ ใช้ปูในตำแหน่งด้านล่างสุด และด้านข้างของหลุมฝังกลบ เพื่อป้องกันการรั่วซึมในแนวดิ่ง และแนวระดับของสารปนเปื้อนในน้ำชะขยะมูลฝอยลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน หรือชะลอการไหลของน้ำชะขยะให้ซึมผ่านได้ช้าลงจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนได้น้อย วัสดุกันซึมต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของน้ำชะขยะมูลฝอย ทนความดันของน้ำ และสามารถรองรับแรงกดจากน้ำหนักของขยะมูลฝอย (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2558) การเลือกใช้วัสดุกันซึมควรคำนึงถึงราคาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเนื่องจากราคาของวัสดุกันซึมมีผลต่อต้นทุนการก่อสร้างหลุมฝังกลบเป็นอย่างมาก หลุมฝังกลบขยะส่วนใหญ่จึงมีความสนใจในการใช้วัสดุกันซึมธรรมชาติเนื่องจากมีราคาที่ต่ำกว่าวัสดุกันซึมสังเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.1. วัสดุกันซึมธรรมชาติ

วัสดุกันซึมธรรมชาติในปัจจุบันมีมากมายหลายประเภท เช่น ดินเหนียว ดินเหนียวบดอัด และการเติมสารปรับปรุงสภาพดินเดิม เป็นต้น

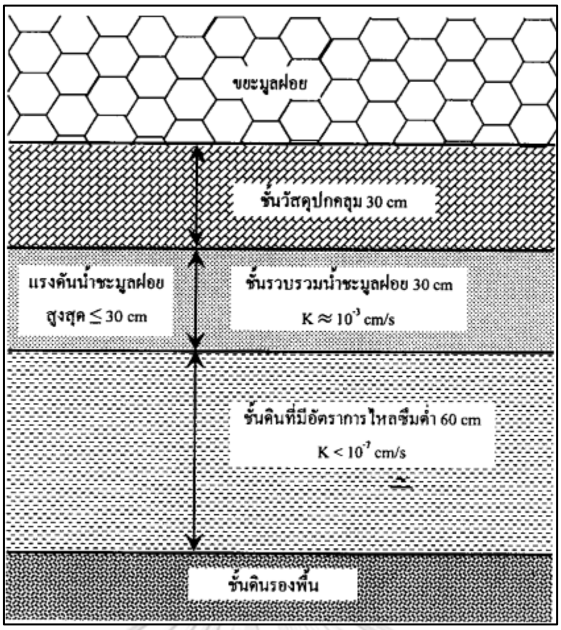
ดินเหนียว (Clay)

ดินเหนียว (Clay) โดยลักษณะของเม็ดดินจะละเอียดเม็ดเล็ก ตามมาตรฐานในระบบ Unified soil classification (U.S.C) ได้กำหนดขนาดของเม็ดดินเหนียวมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร เนื้อดินมีความเหนียวแน่นเนื่องจากอนุภาคดินเหนียวตามธรรมชาติจะถูกเชื่อมประสานด้วยพันธะที่แข็งแรง สารประกอบหลักที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมประสานในดินเหนียว ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต และ Amorphous Silica (สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2557) วัสดุกันซึมชนิดนี้มีราคาถูก แต่เนื่องจากระหว่างเม็ดดินมีช่องว่างของอากาศทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ (ธนิต เฉลิมยานนท์, 2552)

ดินเหนียวบดอัด (Compacted clay liners - CCLs)

วัสดุกันซึมประเภทนี้จะมีการใช้เครื่องมือกลบดอัดดินเหนียวให้แน่นเพื่อไล่อากาศออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้เม็ดดินอัดตัวกันแน่นขึ้น เมื่อดินมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นการยุบตัวในชั้นดินลดลง สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น และการซึมน้ำลดลงจะสามารถป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะได้มากยิ่งขึ้น การบดอัดดินเหนียวนั้นจะทำให้น้ำชะมูลฝอยไหลซึมผ่านได้ช้าสามารถหน่วงสารปนเปื้อนในน้ำชะขยะได้เนื่องจากในอนุภาคดินเหนียวมีประจุลบ ทำให้สามารถหน่วงประจุบวกของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนในน้ำชะขยะมูลฝอย ข้อจำกัดของวัสดุกันซึมประเภทนี้ คือ บางพื้นที่ไม่มีดินเหนียวในการก่อสร้าง หรือพื้นที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งดินเหนียวทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง (ธนิต เฉลิมยานนท์, 2552; ธเรศ ศรีสถิตย์, 2558)

มาตรฐานการใช้ดินเหนียวบดอัดเป็นวัสดุกันซึมจะใช้ดินเหนียวบดอัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที มีความหนาของดินเหนียวบดอัด 60 เซนติเมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2544) ดังภาพที่ 2.3 ทั้งนี้ดินเหนียวจะถูกบดอัดเป็นชั้นๆ ชั้นละ 15 – 20 เซนติเมตร เพื่อทำหน้าที่กันซึมตามข้อกำหนดของ Integrated solid waste Management (ISWM) (Integrated solid waste management, 2004)



ภาพที่ 2. 3 วัสดุกันซึมประเภทดินเหนียวบดอัด
(กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

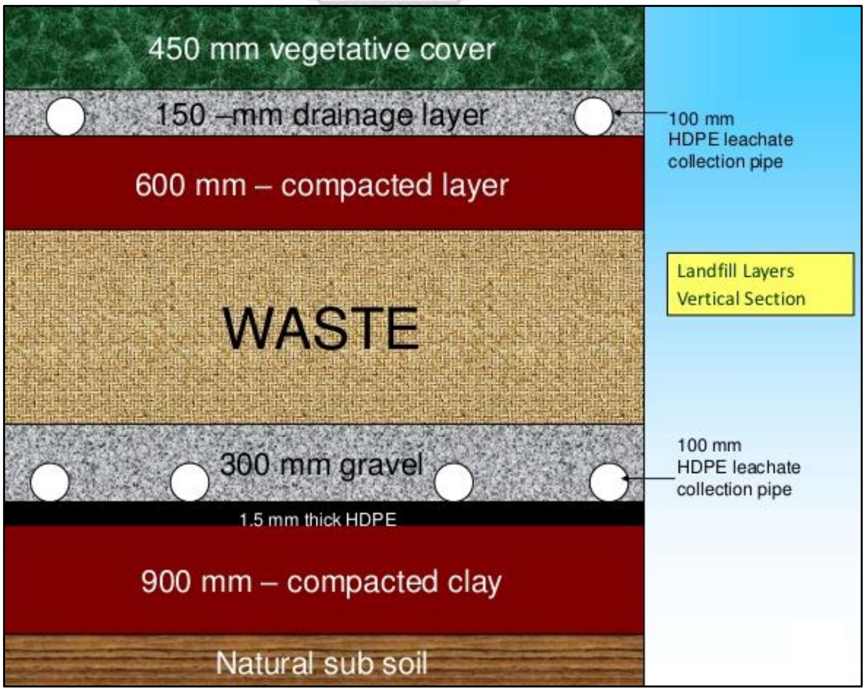
<u>การเติมสารปรับปรุงสภาพดินเดิม</u> (Soils amendment)

สารปรับปรุงสภาพดินเป็นสารที่ใส่ผสมลงไปในดินเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพเกี่ยวกับโครงสร้างของดิน เช่น การปรับปรุงเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของน้ำ และถ่ายเทอากาศในดิน การออกแบบหลุมฝังกลบในบางพื้นที่ดินในบริเวณนั้นไม่เหมาะสมสำหรับทำวัสดุกันซึม คือ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และไม่สามารถหาดินจากบริเวณอื่นมาแทนได้จึงต้องมีการเติมสารเติมแต่งลงไปในดินนั้นเพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงจนมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวบดอัดที่มีค่าเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที การปรับปรุงสภาพดินเดิมสามารถทำได้โดยผสมสารปรับปรุงสภาพดินเข้าไป สารปรับปรุงสภาพดินจะเข้าไปแทนที่ตามโพรงอากาศระหว่างกลุ่มอนุภาคดิน เช่น การปรับปรุงสภาพดินด้วยเบนโทไนท์ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน (Brunner และ Keller, 1972) ความหนาของวัสดุกันซึมที่มีการเติมสารปรับปรุงสภาพดินเดิมด้วยเบนโทไนท์ควรจะมีความหนา 60 เซนติเมตร ทั้งนี้ดินที่ถูกปรับปรุงสภาพดินเดิมจะถูกบดอัดเป็นชั้นๆ ชั้นละ 15 – 20 เซนติเมตร เพื่อทำหน้าที่กันซึมตามข้อกำหนดของ Integrated solid waste Management (ISWM) (Integrated solid waste management, 2004)

2.2.2. มาตรฐานของวัสดุกันซึม

มาตรฐานการออกแบบวัสดุกันซึมของ U.S.EPA ใน Subtitle D ของขยะชุมชน และมาตรฐานการจัดการขยะมูลฝอยชุมชนของกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดให้วัสดุกันซึมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนด้านล่างเป็นดินเหนียวบดอัดหนา 60 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุด 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนด้านบนเป็นแผ่นพลาสติกสังเคราะห (Synthetic liner) หนา 1.5 มิลลิเมตร (US Environmental Protection Agency, 1993; กรมควบคุมมลพิษ, 2544) ดังภาพที่ 2.4

ในทางปฏิบัตินั้นการออกแบบวัสดุกันซึมต้องคำนึงถึงราคาการก่อสร้างหลุมฝังกลบควบคู่กับสมบัติของวัสดุกันซึมที่ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที จึงทำให้ส่วนใหญ่หลุมฝังกลบขยะมูลฝอยจะนิยมใช้วัสดุกันซึมธรรมชาติโดยนำดินเหนียวมาบดอัดปูรองก้นบ่อหลุมฝังกลบขยะ แต่เนื่องจากบางพื้นที่ไม่มีดินเหนียวในการก่อสร้าง หรือพื้นที่อยู่ห่างไกลจากแหล่งดินเหนียวทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง จึงเลือกใช้การเติมสารปรับปรุงสภาพดินเดิมให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุกันซึม (Brunner และ Keller, 1972) (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2558)



ภาพที่ 2. 4 วัสดุกันซึมตามมาตรฐานของ U.S.EPA (Kant, 2015)

2.3. ของเสียเบนโทไนท์ (Bentonite waste)

2.3.1. นิยาม

ของเสียเบนโทไนท์เป็นของเสียที่เกิดจากขุดเจาะใต้ผิวดิน เช่น การขุดเจาะวางท่อ การขุดเจาะวางอุโมงค์ และการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาล ของเสียเบนโทไนท์เกิดจากการนำสารเบนโทไนท์ผสมน้ำจนมีลักษณะเป็นดินโคลนฉีดเข้าไปที่หัวคว้านเพื่อรักษาสภาพของช่องเจาะในการก่อสร้างแบบเจาะลอด (HDD) ความหนืดของสารละลายเบนโทไนท์จะแขวนลอยเศษดิน เศษหินเพื่อลำเลียงเศษวัสดุออกมายังพื้นที่ทำงานด้านนอกโดยผ่านช่องว่างระหว่างก้านเจาะกับผนังหลุม นอกจากนี้สารละลายเบนโทไนท์จะถูกใช้เป็นวัสดุหล่อลื่นให้แก่หัวเจาะเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างท่อกับหลุมเจาะ และกันไม่ให้น้ำไหลเข้ามาในหลุมเจาะ โดยโคลนเบนโทไนท์จะแทรกตัวในช่องดินที่เจาะลอด (คชินท์ สายอินทวงศ์, 2551)

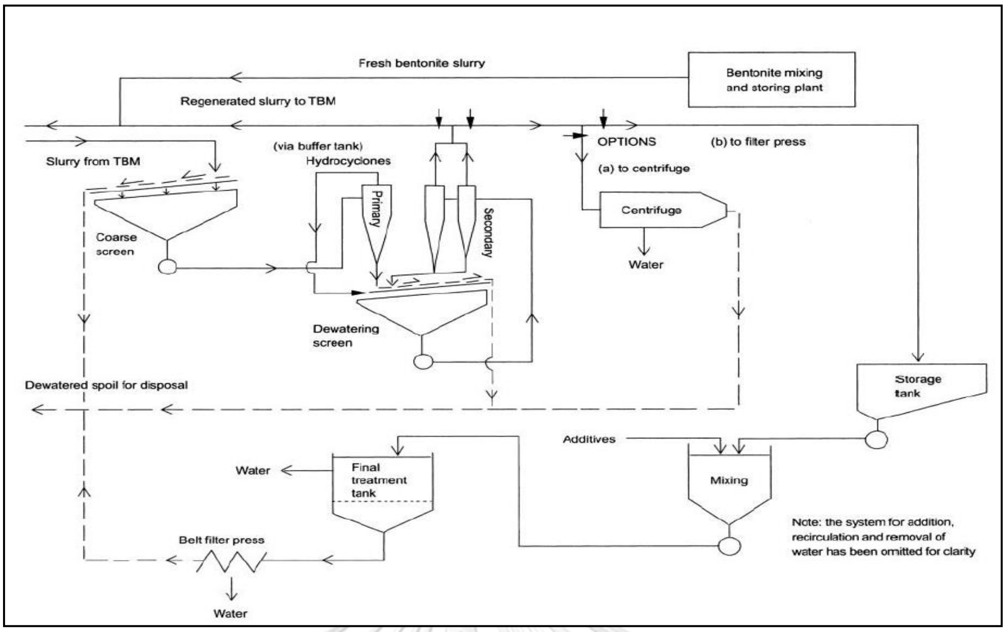
โคลนเบนโทไนท์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจะถูกดูดหมุนเวียนเข้าไปยังเครื่องเวียนโคลนกลับมาใช้ใหม่ (Recycling unit) โดยระบบจะคัดแยกเศษดิน ทราย และหินที่ปนเปื้อนกับน้ำโคลนออกไป ระบบการคัดแยกจะประกอบไปด้วยตะแกรงแบบสั่น (Vibrating screen) สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร เครื่องไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) สำหรับแยกอนุภาคขนาด 0.1-0.2 มิลลิเมตร และเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) สำหรับแยกอนุภาคตะกอนทราย (Fine silt) ที่มีขนาด 0.05 มิลลิเมตร หรือเล็กกว่า โคลนเบนโทไนท์ที่เวียนกลับมาใช้ใหม่นั้นจะมีความหนาแน่นที่สูงขึ้น จึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของโคลนเบนโทไนท์ทุกครั้งที่มีการวนมาใช้ใหม่ให้อยู่ในช่วงที่สามารถใช้งานได้ ดังตารางที่ 2-7 การขุดเจาะใต้ผิวดินแต่ละครั้งจะเกิดการสูญเสียสารละลายเบนโทไนท์ เช่น บางส่วนติดไปกับเม็ดดิน บางส่วนซึมเข้าไปสู่ชั้นดิน บางส่วนปนเปื้อนมากเกินกว่าจะนำกลับมาใช้ใหม่ และบางส่วนมีสมบัติด้านความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) ค่าพีเอช (pH) และปริมาณทราย (Sand content) ไม่เหมาะสมสำหรับการขุดเจาะใต้ผิวดิน จึงไม่สามารถเวียนกลับมาใช้ในกระบวนการได้อีกต้องนำไปกำจัดเป็นของเสียเบนโทไนท์ โดยจะใช้รถดูด (Vacuum truck) เป็นรถลำเลียงของเสียเบนโทไนท์ไปทิ้งยังบ่อทิ้งของเสียเบนโทไนท์ สารละลายเบนโทไนท์ที่สูญเสียไปจะถูกแทนที่ด้วยสารละลายเบนโทไนท์ชุดใหม่ (Federation of Piling Specialists, 2006; Hongchao, 2014; Reeves และคณะ, 2006; เกรียงไกร ศิรนานนท์, 2557; พรชัย อัศวชินโชติ, 2558) แสดงดังภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.6 โดยปริมาณของเสียเบนโทไนท์ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรือขนาดอุโมงค์ที่จะทำการขุดเจาะ ระยะทางในการขุดเจาะ และสภาพดินบริเวณที่ทำการขุดเจาะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2- 7 การทดสอบสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ในแต่ละขั้นตอน (Federation of Piling Specialists, 2006)

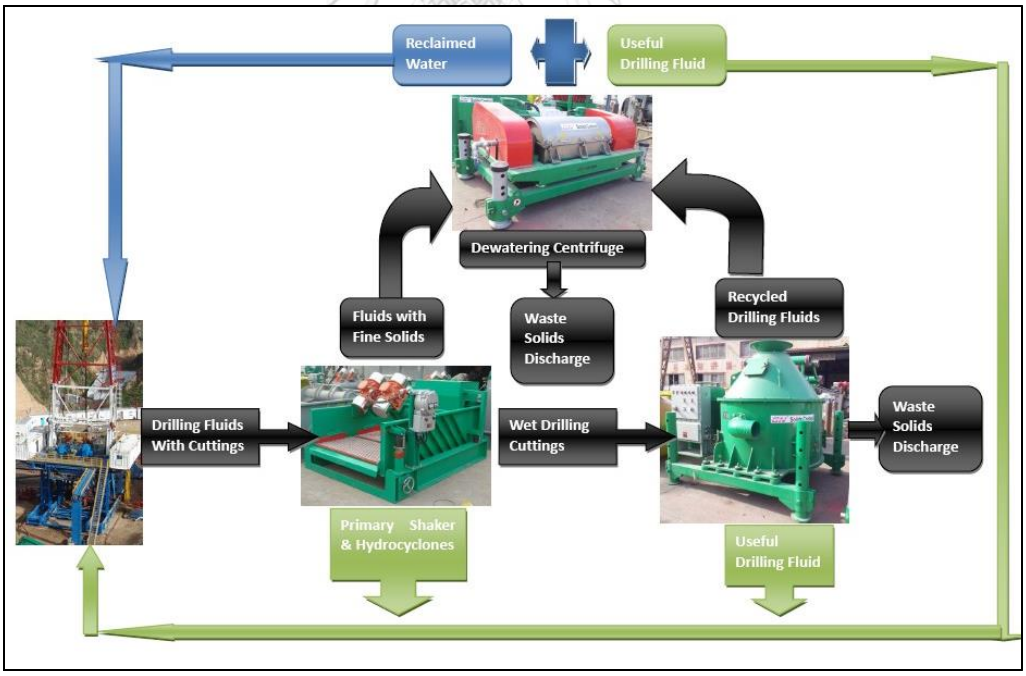
วิธีการทดสอบ	สารละลายเบนโทไนท์เริ่มต้น	ของเสียเบนโทไนท์
การทดสอบความหนาแน่น (Density test) โดยใช้ Mud balance	1.02 - 1.15 กรัมต่อมิลลิลิตร	มากกว่า 1.3 กรัมต่อมิลลิลิตร
การทดสอบความหนืด (Viscosity test) ด้วยวิธีกรวย Marsh cone viscosity test	32 – 50 วินาที	32 – 60 วินาที
การทดสอบความเป็นกรด – ด่าง (pH value)	7 - 11	มากกว่า 11
การทดสอบปริมาณทรายในสารละลาย (Sand content)	ร้อยละ 2 – 4 โดยน้ำหนักของสารละลายเบนโทไนท์	มากกว่าร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของสารละลายเบนโทไนท์
การทดสอบค่าการไหลสูญหายของน้ำในสารละลาย (Fluid loss)	30 – 40 มิลลิลิตร	มากกว่า 50 มิลลิลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 2. 5 ผังกระบวนการในการเกิดของเสียเบนโทไนท์

(Reeves และคณะ, 2006)

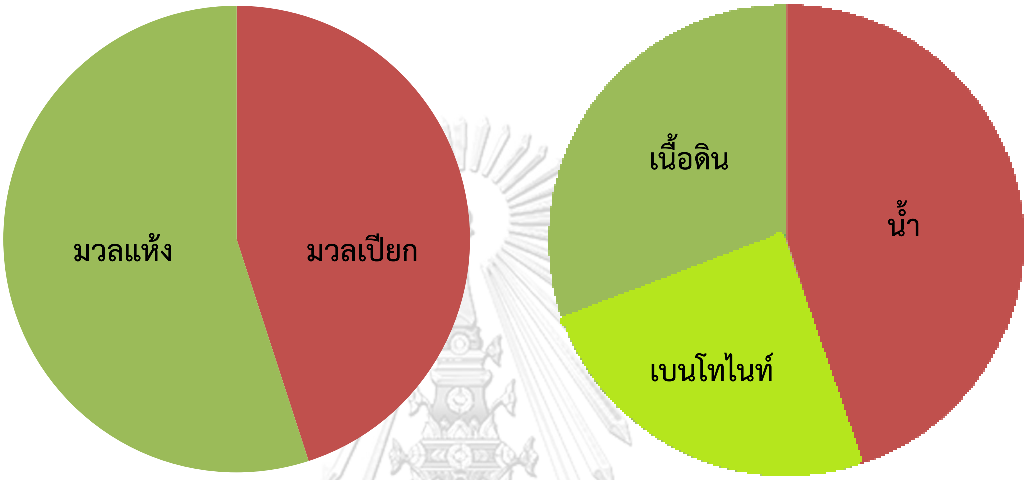


ภาพที่ 2. 6 กระบวนการในการเกิดของเสียเบนโทไนท์

(Hongchao, 2014)

2.3.2. องค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์

ของเสียเบนโทไนท์ส่วนใหญ่เกิดจากการขุดเจาะใต้ผิวดิน ซึ่งองค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ มวลแห้ง หมายถึง เนื้อดินและทรายที่มาจากแนวการขุดเจาะใต้ผิวดิน และสารเบนโทไนท์ที่ใช้รักษาสภาพของช่องเจาะใต้ผิวดิน อีกส่วนคือ มวลเปียก หมายถึง น้ำที่ใช้ละลายเบนโทไนท์ให้กลายเป็นโคลนเบนโทไนท์ แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2. 7 องค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์ (Reeves และคณะ, 2006)

ก. เบนโทไนท์ (Bentonite)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เบนโทไนท์มีสูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 . $4SIO_2$. $2H_2O$ โดยเป็นสารประกอบของ Hydrated aluminium silicate และเป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มสินแร่สเมคไตต์ (Smectite) มีองค์ประกอบหลัก คือ แร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) รองลงมา ได้แก่ เฟลด์สปาร์ (Feldspar) แคลไซต์ (Calcite) ซิลิกา (Silica) และยิปซั่ม (Gypsum) (Liu และคณะ, 2013) แสดงดังตารางที่ 2-8 และองค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์แสดงดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2- 8 องค์ประกอบทางแร่ธาตุ (Mineralogical composition) ของเบนโทไนท์ (Choo และ Bai, 2016)

องค์ประกอบทางแร่ธาตุ	**ร้อยละโดยน้ำหนัก**
แร่มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite)	56.5 - 91.2
แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar)	6.2 – 25.9
แร่ควอตซ์ (Quartz)	0.8 – 42.6
แร่คริโซเบริล (Cristobalite)	1.4 – 5.7
แร่แคลไซต์ (Calcite)	1.9 – 7.1
ซิลิกา (Silica)	5.7 – 9.6
ยิปซัม (Gypsum)	0.8 – 3.5

ตารางที่ 2- 9 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของเบนโทไนท์ (Digdon, 2009)

องค์ประกอบทางเคมี	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**MgO**	**Na_2O**	**CaO**	**K_2O**	**TiO**	**FeO**
ร้อยละโดยน้ำหนัก	55-78	13-27	1-5	1-3	1-3	0.1-3	0-2	0-0.5	0-0.5

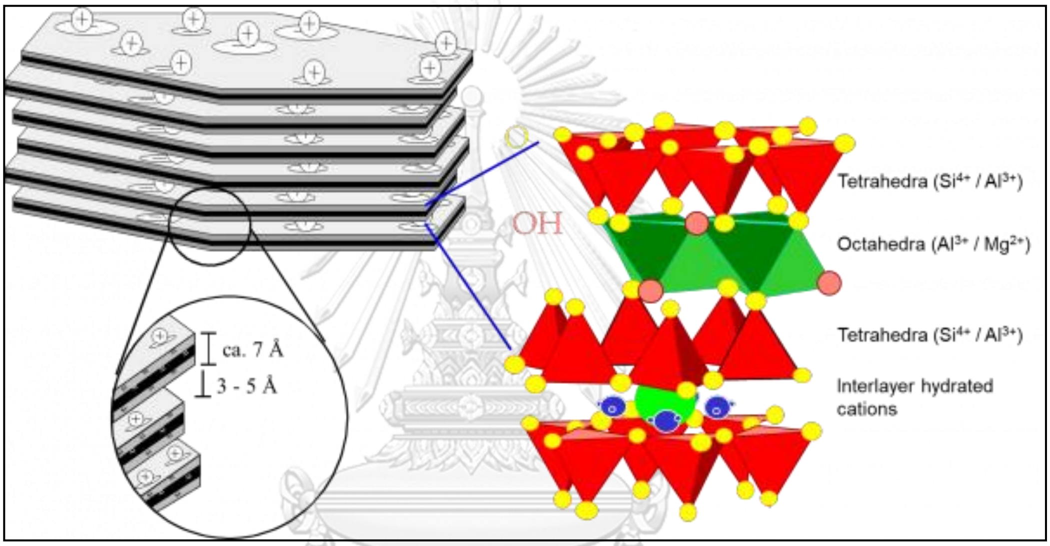
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>โครงสร้างหลัก</u>

โครงสร้างของเบนโทไนท์จะมีการจัดเรียงตัวของผนึกในแร่ดินเหนียวแบบมอนต์มอริลโลไนท์ประกอบด้วยโครงสร้างผลึก 3 แผ่น คือ แผ่นอะลูมินาหรือแผ่นออกตะฮีดรอล (Alumina octahedral- Al_2O_3) แทรกอยู่กลางระหว่างแผ่นซิลิกาหรือแผ่นเตตระฮีดรอล (Silica tetrahedral - SiO_2) มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเป็นแบบ 2 : 1 (Tetrahedral – octahedral - tetrahedral) แสดงดังภาพที่ 2.8

- Silica tetrahedral unit ประกอบด้วยซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เกิดเป็นรูปที่มี 4 ด้าน หน่วยโครงสร้างจะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่นเหมือนรังผึ้งด้วยการใช้ออกซิเจนร่วมกัน 1 อะตอม

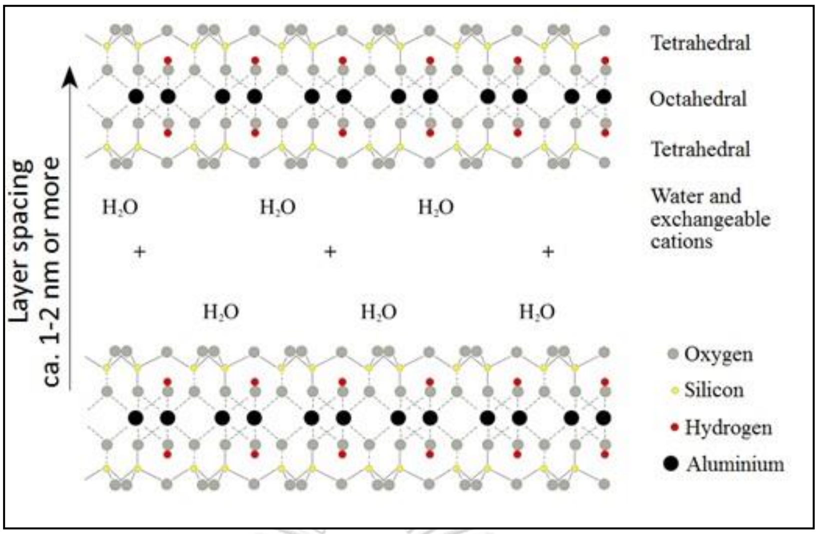
- Alumina octahedral unit ประกอบด้วยอะลูมินัม 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม เกิดเป็นรูปที่มี 8 ด้าน หน่วยโครงสร้างจะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่นแน่นทึบด้วยการใช้ออกซิเจนร่วมกัน 3 อะตอม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 2. 8 การจัดเรียงตัวของแร่มอนต์มอริลโอไนท์
(ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน, 2555)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกากับแผ่นอะลูมินาเกิดจากการใช้ออกซิเจนร่วมกัน (Oxygen-oxygen linkage) แบบพันธะโควาเลนต์ และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกาชั้นล่างของผลึกหนึ่งกับแผ่นซิลิกาชั้นบนของอีกผลึกหนึ่ง คือ แรงแวนเดอวาลส์ (Van der waals force) แรงยึดเหนี่ยวนี้จะอยู่ระหว่างชั้นเรียกว่า Interlayer ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนมากทำให้โมเลกุลของน้ำ ของเหลว หรือไอออนประจุบวกสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นได้ แสดงดังภาพที่ 2.9 โดยมีระยะห่างของชั้นประมาณ 1-2 นาโนเมตร หรือมากกว่า

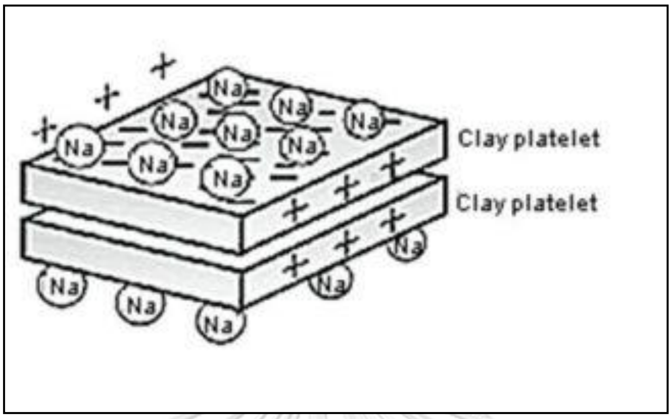


ภาพที่ 2. 9 โครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนท์
(ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน, 2555)

ผลึกของเบนโทไนท์จะมีประจุลบอยู่ที่พื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาค เนื่องจากการแทนที่ของไอออนที่มีขนาดใกล้เคียงกันโดยไอออนที่มีประจุบวกน้อยกว่าจะไปแทนที่ไอออนที่มีประจุบวกมากกว่า เช่น การแทนที่ประจุ Al^{3+} ด้วยประจุ Mg^{2+} และ Fe^{2+} ในแผ่นอะลูมินา (Alumina octahedral) และการแทนที่ประจุ Si^{4+} ด้วยประจุ Al^{3+} ในแผ่นซิลิกา (Silica tetrahedral) จากการแทนที่ด้วยประจุที่มีวาเลนซ์ไม่เท่ากัน ทำให้ผิวของเบนโทไนท์เกิดความไม่สมดุลทางประจุไฟฟ้า และแสดงประจุลบ จึงต้องมีการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพื่อปรับให้ผิวของเบนโทไนท์เกิดความสมดุลทางประจุไฟฟ้า ในธรรมชาติเบนโทไนท์จะแลกเปลี่ยนประจุบวกกับผลึกเบนโทไนท์ใกล้เคียง โดยประจุที่มีการแลกเปลี่ยนส่วนใหญ่ คือ โซเดียม (Na^{+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ส่งผลให้เบนโทไนท์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะอยู่ในรูปโซเดียมเบนโทไนท์ (Na-bentonite) และแคลเซียมเบนโทไนท์ (Ca-bentonite) (Richard และ Cyrus, 2012; Sangburarn และ Lerdlum, 2011; Tyagi และคณะ, 2006)

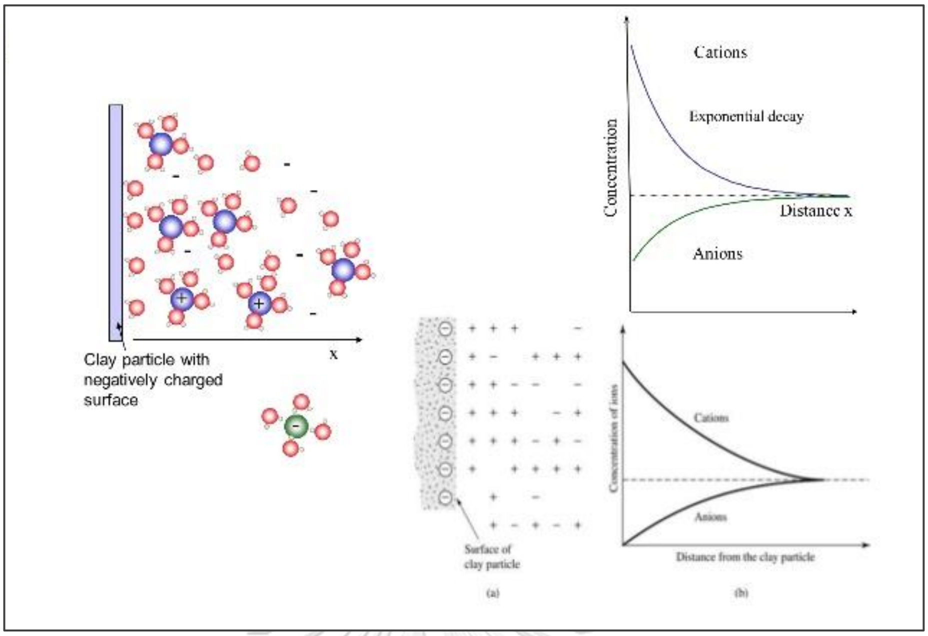
โซเดียมเบนโทไนท์ (Na-bentonite) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำโดยสามารถดูดซับน้ำได้เป็น 5 เท่า และเมื่ออิ่มตัวปริมาตรของเบนโทไนท์จะสามารถบวมตัวได้เป็น 15 – 20 เท่าของน้ำหนักแห้ง เนื่องจากผลึกของโซเดียมเบนโทไนท์มีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมเบนโทไนท์ โดยโซเดียมเบนโทไนท์จะกระจายอยู่ในน้ำทำให้น้ำโคลนมีลักษณะกึ่งแข็ง กึ่งเหลวคล้ายวุ้น เหมาะสำหรับเป็นโคลนเจาะ (Drilling mud) (Kelly, 2002) แสดงดังภาพที่ 2.10

แคลเซียมเบนโทไนท์ (Ca-bentonite) มีสมบัติการดูดซับน้ำ และพองตัวน้อยกว่าโซเดียมเบนโทไนท์ สามารถนำมาทำโคลนเจาะหลุมตื้นๆ ทำสารดูดซับหรือฟอกสี (Absorbents) (สรินทร ลิ่นปนาทธ, 2545)



ภาพที่ 2. 10 การจัดเรียงตัวของโซเดียมเบนโทไนท์ (Kelly, 2002)

นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับน้ำของโซเดียมเบนโทไนท์ จะทำให้ไอออนโซเดียมที่แลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคเบนโทไนท์กลายเป็นไอออนโซเดียมที่มีการดูดซับน้ำ (Hydrated Na^{+}) หรือไอออนบวกที่มีการดูดซับน้ำ (Hydrated cations) มาล้อมรอบ ทั้งนี้ไอออนโซเดียมที่มีการดูดซับน้ำ (Hydrated Na^{+}) หรือไอออนบวกที่มีการดูดซับน้ำ (Hydrated cations) ซึ่งอยู่บริเวณโดยรอบของอนุภาคเบนโทไนท์จะเรียกว่า วงน้ำรอบอนุภาค (Diffuse double layer - DDL) แสดงดังภาพที่ 2.11 โดยความหนาของชั้นน้ำรอบอนุภาคจะมีผลต่อแรงกระทำระหว่างอนุภาคเบนโทไนท์ ถ้าความหนาของชั้นน้ำรอบอนุภาคมากจะส่งผลให้อนุภาคเกิดการกระจายตัว (Dispersion) แต่ถ้าความหนาของชั้นน้ำรอบอนุภาคน้อยจะส่งผลให้อนุภาคเกิดการรวมกัน (Aggregation) (Mojid, 2014)



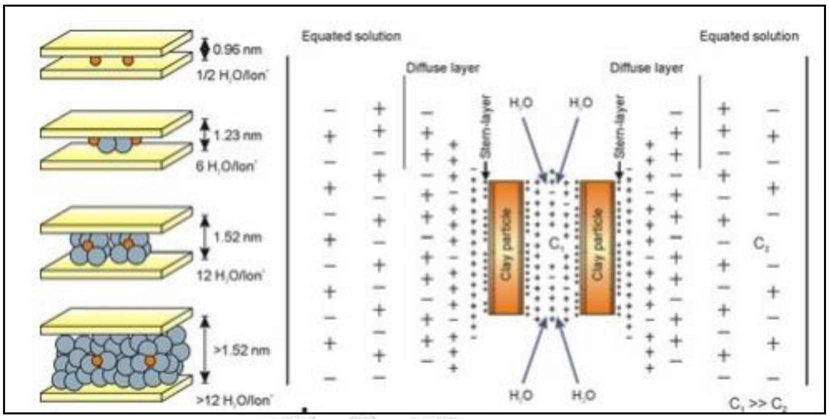
ภาพที่ 2. 11 วงน้ำรอบอนุภาค (Diffuse double layer - DDL)
(Harraz, 2016)

<u>สมบัติของเบนโทไนท์</u>

เบนโทไนท์มีความสามารถในการแทนที่ของอะตอมประจุไฟฟ้าบวกด้วยธาตุที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่า เช่น การแทนที่ของ H^{+}, Na^{+}, Ca^{2+} หรือ Mg^{2+} ใน Si^{4+} และ Al^{3+} นอกจากนี้การที่อนุภาคของเบนโทไนท์มีขนาดของอนุภาคเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปฏิกิริยาทางเคมีมาก มีความสามารถสูงในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวก (Cation exchange capacity - CEC) และความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของของเหลว ทำให้เบนโทไนท์มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มความหนืด และเกิดการพองตัวกลายเป็นเจล ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และความหนาแน่นของสารละลาย (กรมทรัพยากรธรณี, 2553)

เบนโทไนท์มีสมบัติการบวมตัว (Swelling) เบนโทไนท์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นซิลิกาชั้นล่างของผลึกหนึ่งกับแผ่นซิลิกาชั้นบนของอีกผลึกหนึ่ง คือ แรงแวนเดอวาลส์ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนมาก ทำให้น้ำหรือโมเลกุลมีขั้วโมเลกุลอื่นๆ สามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นทำให้เกิดการขยายตัว การบวมตัวของเบนโทไนท์เกิดจากการดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลน้ำ และประจุลบบนอนุภาคเบนโทไนท์ การที่เบนโทไนท์บวมตัวจะไปอุดช่องว่างในดินทำให้ลดเส้นทางการไหลของน้ำส่งผลให้เบนโทไนท์มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ จึงนิยมใช้เบนโทไนท์สำหรับหล่อลื่นหัวเจาะ ช่วยลดความดัน ไม่ทำให้ทรายที่เกิดจากการ ขุดเจาะตกตะกอน ช่วยในการลอยตัวพยุงก้านขุดเจาะ

ควบคุมความดันใต้ผิวดิน รักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะ และก่อสร้าง (Richard และ Cyrus, 2012; ทีฆรัต ชวาลวิวัฒน์ และคณะ, 2544) ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2. 12 การขยายตัว (Swelling) ของเบนโทไนท์เมื่อมีน้ำในโครงสร้าง (Richard และ Cyrus, 2012)

เบนโทไนท์มีสมบัติด้านการดูดซับเนื่องจากเบนโทไนท์มีลักษณะเป็นผลึกแผ่นเล็กบาง มีพื้นที่ผิวมากซึ่งที่บริเวณพื้นผิวของเบนโทไนท์จะมีแรงดึงดูดระหว่างประจุลบของเบนโทไนท์ และประจุบวกต่างๆ โดยการแลกเปลี่ยนจะเกิดในระหว่างชั้นของซิลิเกตทำให้เบนโทไนท์มีความสามารถในการดูดซับสูง เช่น การดูดซับโลหะหนัก การสีน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ และดูดซับสี เป็นต้น (นิวัติ อนงค์รักษ์, 2554)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.3. การกำจัดของเสียเบนโทไนท์ในปัจจุบัน

ภายหลังจากการขุดเจาะใต้ดินเพื่อวางท่อ หรือวางอุโมงค์แล้วนั้นจะเกิดของเสียเบนโทไนท์จากการขุดเจาะในปริมาณที่มาก การกำจัดของเสียเบนโทไนท์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะผสมของเสียเบนโทไนท์กับวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ ขี้เลื่อย เศษหญ้า หรือฟางข้าว และนำไปถมในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาต หรือปฏิบัติตามข้อตกลงกับเจ้าของที่ดินที่ยินยอมให้ใช้ และต้องแจ้งข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (Material safety data sheet) ของสารเบนโทไนท์ให้เจ้าของที่ดินทราบ (กระทรวงพลังงาน, 2556) บางผู้ประกอบการจะผสมของเสียเบนโทไนท์กับกับยิปซัม และบางผู้ประกอบการจะผสมของเสียเบนโทไนท์กับดินในอัตราส่วน 50 : 50 เพื่อให้ของเสียเบนโทไนท์แห้งก่อนที่จะนำถมในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาต (ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549)

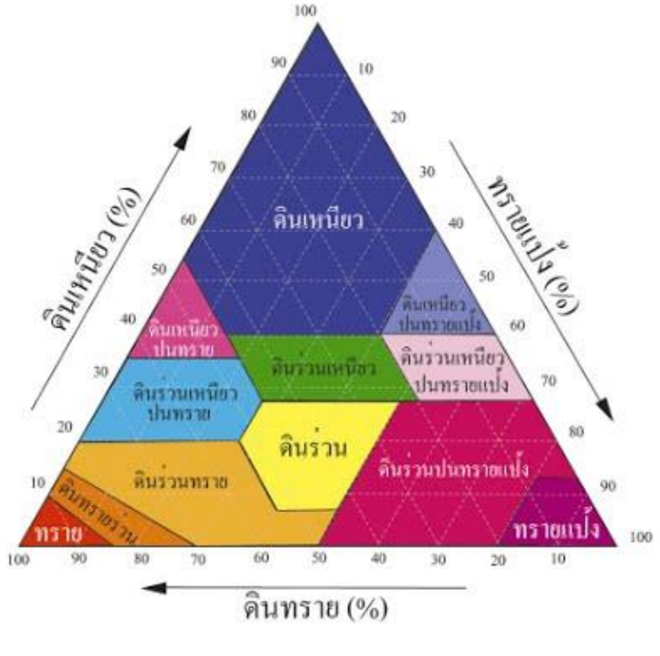
2.3.4. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ของเสียเบนโทไนท์ที่เกิดจากการขุดเจาะใต้ผิวดินมีปริมาณที่มาก ซึ่งถ้ามีการรั่วไหลจากพื้นที่กักเก็บไปยังพื้นที่ทำการเกษตรของชาวบ้าน ต้นไม้ในพื้นที่อาจจะเสียหายได้จากการโดนทับของของเสียเบนโทไนท์ นอกจากนี้ถ้าของเสียเบนโทไนท์ไหลไปสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะทำให้น้ำบริเวณนั้นมีลักษณะขุ่น ไม่สามารถใช้อุปโภค และบริโภคได้ (สำนักข่าวอิศรา, 2558)

2.4. ชนิดของดิน

2.4.1. แผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกดิน

แผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกประเภทดิน (Triangular soil classification chart) เป็นการจำแนกประเภทของดินโดยอาศัยขนาดของเม็ดดิน ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกไม่ต้องใช้ค่าขีดความเหลว ขีดความเหนียว และดัชนีสภาพพลาสติกในการร่วมพิจารณา โดยแผนภูมิสามเหลี่ยมจะมี ลักษณะเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่ละด้านจะแบ่งเป็นหน่วยร้อยละของดินเหนียว (Clay) ดินทรายแป้ง (Silt) และดินทราย (Sand) วิธีการตรวจสอบประเภทของดินทำได้โดยลากเส้นร้อยละของดินทั้ง 3 ด้านมาตัดกันที่จุดหนึ่ง ที่จุดนั้นแสดงถึงประเภทของดินที่กำลังพิจารณา (มานิต ช่วยงาน, 2552a) แผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกดินแสดงในภาพที่ 2.13 และการจำแนกประเภทของดินตามขนาดเม็ดดินแสดงดังตารางที่ 2-10



ภาพที่ 2. 13 สามเหลี่ยมของการจำแนกประเภทของดิน (มานิต ช่วยงาน, 2552a)

ตารางที่ 2- 10 การจำแนกประเภทของดินตามขนาดเม็ดดิน (บุญชุม เปียแดง และคณะ, 2526)

ชนิดดิน	**ส่วนประกอบ (ร้อยละ)**		
	ดินทราย (ขนาดเม็ดดิน 0.075 - 2.000)	**ทรายแป้ง (ขนาดเม็ดดิน 0.002 - 0.075)**	**ดินเหนียว (ขนาดเม็ดดิน เล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร)**
ดินทราย (Sand)	85 – 100	0 – 20	0 – 15
ดินทรายปนร่วน (Loamy sand)	70 – 90	0 – 30	0 – 15
ดินร่วนปนทราย (Sandy loam)	52 – 90	0 – 50	0 – 20
ดินร่วน (Loam)	20 - 52	28 – 50	10 – 27
ดินร่วนปนทรายแป้ง (Silt loam)	0 – 50	20 – 50	0 – 27
ดินทรายแป้ง (Silt)	0 – 20	มากกว่า 90	0 – 12
ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam)	45 – 75	0 – 25	20 – 23
ดินร่วนเหนียว (Clay loam)	20 – 45	15 – 55	27 – 40
ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (Silty clay loam)	0 – 20	40 – 70	27 – 40
ดินเหนียวปนทราย (Sandy clay)	45 – 60	0 – 20	35 – 55
ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty clay)	0 – 20	40 – 60	40 – 60
ดินเหนียว (Clay)	0 - 45	0 - 40	40 - 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5. การทดสอบการชะละลาย

2.5.1. การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)

การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นไปตามมาตรฐานของ U.S.EPA, SW-846 Method 1311 มีไว้สำหรับจำแนกของเสียที่เป็นของเสียอันตราย (Hazardous) และของเสียที่ไม่อันตราย (Non-hazardous) การทดสอบนี้ออกแบบมาเพื่อจำลองสภาวะการชะละลายของวัสดุในหลุมฝังกลบขยะจริง โดยจะใช้สารชะเป็นกรดอะซิติก (กรดน้ำส้มสายชู- Acetic acid- CH_3COOH) เนื่องจากในหลุมฝังกลบจะเกิดกรดไขมันที่ระเหย (Volatile fatty acids - VFAs) ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ในหลุมฝังกลบขยะระหว่างขั้นตอนการสลายตัวของสารอินทรีย์ ในกรณีที่ของเสียมีลักษณะเป็นกากตะกอน (Sludge) หรือของเหลวข้น (Slurry) ที่ไม่สามารถกรองหรือบดได้ ให้นำตัวอย่างไปอบให้แห้ง บันทึกค่าน้ำหนักที่หายไป และบดให้มีขนาดเล็กกว่า 9.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปสกัดด้วยกรดอะซิติกนาน 18 ชั่วโมง การสกัดจะใช้อัตราส่วนของปริมาตรสารชะล้างต่อปริมาณของแข็งเท่ากับ 20 : 1 จากนั้นแยกของแข็งออกจากของเหลว แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-atomic emission Spectrometer (ICP) (Pendowshi, 2003; US Environmental Protection Agency, 1992)

2.5.2. การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Waste extraction test (WET)

การสกัดของเสียด้วยวิธีนี้เป็นไปตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย พ.ศ. 2548 เกี่ยวข้องกับของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม ในการทดสอบถ้าความเข้มข้นทั้งหมด (Total concentration) ของของเสียมีค่ามากกว่า TTLC (Total threshold limit concentration) หรือความเข้มข้นทั้งหมด (Total concentration) ของของเสียมีค่าน้อยกว่า TTLC แต่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ STLC (Soluble threshold limit concentration) แสดงว่าของเสียนั้นเป็นของเสียอันตราย การทดสอบ WET ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาจากการทดสอบการชะละลายของ California (Cal WET) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกฎหมายของเสียอันตรายในรัฐ California การทดสอบนี้จะมีการใช้น้ำชะเป็นกรดซิตริก (กรดมะนาว - Citric acid - $C_6H_{10}O_8$) การทดสอบด้วยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพการชะละลายที่มากกว่า TCLP ในกรณีที่ของเสียมีลักษณะเป็นกากตะกอน (Sludge) หรือของเหลวข้น (Slurry) ที่ไม่สามารถกรองหรือบดได้ ให้นำตัวอย่างไปอบให้แห้ง บันทึกค่าน้ำหนักที่หายไป และบดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปสกัดด้วยกรดซิตริกนาน 48 ชั่วโมง การสกัดจะใช้อัตราส่วนของปริมาตรสารชะล้างต่อปริมาณของแข็งเท่ากับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

10 :1 จากนั้นแยกของแข็งออกจากของเหลว แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometer (ICP) (Pendowshi, 2003; กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549)

2.6. กำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดิน (Shear strength)

2.6.1. กำลังของดิน (Soil strength)

กำลังของดินเป็นความสามารถของดินในการต้านทานต่อแรงเฉือน (Shearing resistance) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการ คือ แรงเสียดทานภายในเม็ดดิน (Internal friction angle - Ø) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion - c) สำหรับเม็ดดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินน้อย เช่น กรวด และทราย ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจะขึ้นกับแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินซึ่งจะเปลี่ยนไปตามแรงกดที่กระทำต่อมวลดินโดยเมื่อดินได้รับแรงกดจะเกิดสภาพเค้นขึ้นที่ผิวสัมผัส ถ้าดินอยู่ในสภาพหลวมจะทำให้เม็ดดินจับตัวกันแน่น แต่ถ้ามีแรงกดเพิ่มขึ้นจนไม่มีช่องว่างของเม็ดดินเหลืออยู่จะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้นไม่ทัน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของหน้าดินแตกหักได้

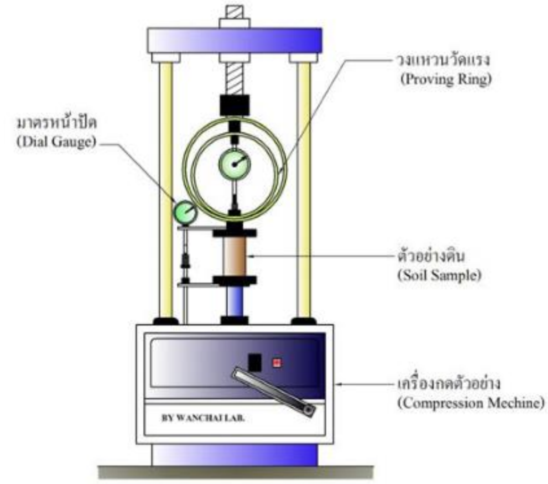
สำหรับเม็ดดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมาก เช่น ดินเหนียว หรือดินที่มีการเติมสารเติมแต่งปรับสภาพดิน โดยแรงยึดเหนี่ยวจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เกิดจากแรงดึงดูดของประจุไฟฟ้า และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเม็ดดิน โดยค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินซึ่งจะเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำในดิน ขนาดของเม็ดดิน และความหนาแน่นของดิน (มานิต ช่วยงาน, 2552c)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.6.2. การทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่มีแรงอัดด้านข้าง (Unconfined compression test)

การทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่มีแรงอัดด้านข้างเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดินชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมาก จะทดสอบโดยนำดินตัวอย่างที่มีการขึ้นรูปแล้วมาวางในตำแหน่งระหว่างแผ่นเหล็ก 2 แผ่น แล้วกดด้วยแรงกดในแนวดิ่งด้วยความเร็วคงที่จนตัวอย่างดินเกิดการแตกหัก การทดสอบด้วยวิธีนี้จะสะดวก และรวดเร็ว (มณเฑียร กังศศิเทียม, 2529b; วันชัย ยอดฤทธิ์, 2552) แสดงดังภาพที่ 2.14 นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินบดอัดสำหรับเป็นวัสดุกันซึมไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตาราง

เมตร เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักของรถบดอัดขยะ และน้ำหนักของขยะมูลฝอยได้ (Daniel และ Wu, 1993)



ภาพที่ 2. 14 การทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่มีแรงอัดด้านข้าง (วันชัย ยอดฤทธิ์, 2552)

2.7. ความซึมได้ของน้ำ (Permeability)

การที่น้ำสามารถไหลซึมผ่านในดินได้เนื่องจากน้ำมีความดันหรือระดับที่แตกต่างกันระหว่างจุด 2 จุดในดิน การไหลซึมของน้ำผ่านมวลดินจะเป็นแบบ Laminar flow ผ่านช่องคดเคี้ยวระหว่างเม็ดดิน การไหลซึมของน้ำผ่านดินจะเป็นการไหลอย่างช้าๆ ผ่านไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้แรงดันหรือระดับน้ำเกิดการสูญเสียไปเพราะแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินตามกฎของดาร์ซี่ที่กล่าวไว้ว่า “ความเร็วของการไหลซึมของของเหลวผ่านตัวกลางพรุน จะแปลผันตรงกับไฮดรอลิคเกรเดียน (Hydraulic gradient)” (มณเฑียร กังศศิเทียม, 2529b) สามารถเขียนเป็นสูตรตามกฎของดาร์ซี่ (Darcy) ได้ดังนี้

$$v = ki = k\frac{\Delta h}{L} \qquad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ	v	คือ	ความเร็วของการไหลซึม (เซนติเมตรต่อวินาที)
	k	คือ	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน (เซนติเมตรต่อวินาที)
	i	คือ	ความลาดชลศาสตร์ (Hydraulic gradient)

Δh คือ ความต่างของระดับน้ำระหว่างจุด (เซนติเมตร)

L คือ ความสูงของตัวอย่างดิน (เซนติเมตร)

ปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านดินสามารถคำนวณได้จาก

$$Q = kiA \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านดิน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่านของดิน (ตารางเซนติเมตร)

จากสมการที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าความเร็วของการไหลซึม และปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านดินขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำในดิน (Coefficient of permeability - k) นอกจากนี้ดินที่มีลักษณะแตกต่างกันจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของน้ำมีความแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2- 11 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลักษณะต่างๆ (Geotechnical Engineering Laboratory - University of at Arlington, 2008)

ลักษณะดิน	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที)	การซึมผ่าน
กรวด (Gravel)	มากกว่า 10^{-1}	สูง
ทรายหยาบ (Sandy gravel, Clean sand และ Fine sand)	10^{-1} -10^{-3}	ปานกลาง
ทรายละเอียด ตะกอนทรายหยาบ (Sand, Dirty sand และ Silty sand)	10^{-3} - 10^{-5}	ต่ำ
ตะกอนทราย (Silt และ Silt clay)	10^{-5} - 10^{-7}	ต่ำมาก
ดินเหนียว (Clay)	น้อยกว่า 10^{-7}	ทึบน้ำ

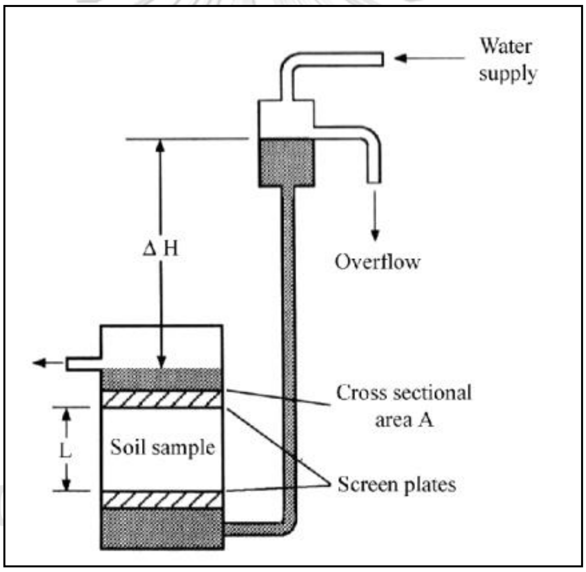
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7.1. การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head) และการทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head)

- การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head permeameter)

การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่เหมาะสำหรับดินที่มีเม็ดหยาบซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูง น้ำสามารถไหลผ่านได้เร็ว เช่น พวกกรวด และทราย การทดสอบจะปล่อยน้ำที่มีความดันคงที่ไหลผ่านตัวอย่างดิน แล้ววัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินตามเวลาที่กำหนด และบันทึกค่าความต่างของระดับน้ำระหว่างจุดใน manometer (Das, 2001; Rinaldo, 2005) แสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2. 15 การทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head permeameter) (Rinaldo, 2005)

- การทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter)

การทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยนเหมาะสำหรับดินที่มีเม็ดละเอียดซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ ดินเม็ดละเอียดยอมให้น้ำซึมผ่านได้ยาก และไหลผ่านได้ช้า เช่น พวกตะกอนทรายและดินเหนียว จึงไม่สามารถวัดปริมาณน้ำที่ไหลซึมออกมาในช่วงเวลาที่กำหนดได้เหมือนการทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head) โดยการทดสอบจะปล่อยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างดินทำให้

ระดับน้ำในหลอดแก้วลดลง และบันทึกค่าระดับน้ำ h_1 และ h_2 ในช่วงเวลา t (Das, 2001; Rinaldo, 2005) แสดงดังภาพที่ 2.16 และจากสมการที่ 2 จะได้

$$q = kiA$$

$$(-a)\left(\frac{dh}{dt}\right) = k\left(\frac{h}{L}\right)A$$

$$-\left(\frac{1}{h}\right)dh = \left(\frac{Ak}{aL}\right)dt$$

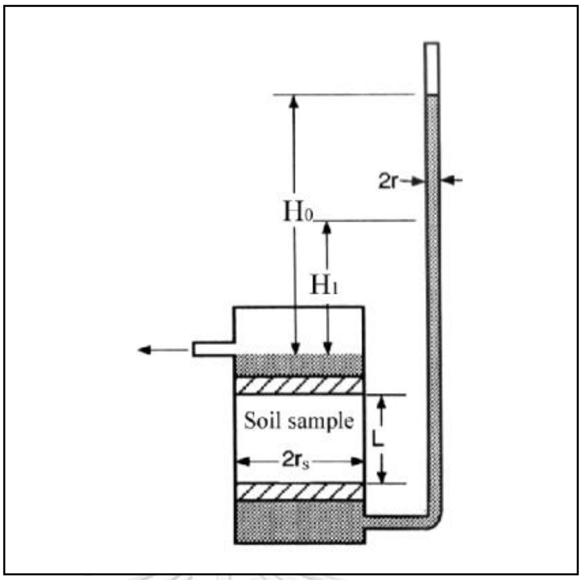
$$-\int_{h_2}^{h_1}\frac{1}{h}\,dh = \left(\frac{Ak}{aL}\right)\left(\int_0^t dt\right)$$

$$-\ln h\Big|_{h_1}^{h_2} = \left(\frac{Ak}{aL}\right)t\Big|_0^t$$

$$\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \left(\frac{Ak}{aL}\right)t$$

$$k = \frac{aL}{At}\ln\frac{h_1}{h_2}$$ สมการที่ 3

เมื่อ	k	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที)
	a	คือ	พื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ว (ตารางเซนติเมตร)
	L	คือ	ความสูงของตัวอย่างดิน (เซนติเมตร)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน (ตารางเซนติเมตร)
	t	คือ	เวลาที่ทำการทดลองปล่อยให้ระดับน้ำลดจากระดับ h_1 ถึงระดับ h_2 (วินาที)
	h_1, h_2	คือ	ระดับน้ำในหลอดแก้วเมื่อเวลาผ่านไป 0 และ t วินาที (เซนติเมตร)



ภาพที่ 2. 16 การทดสอบแบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter) (Rinaldo, 2005)

2.8. การบวมตัว (Swelling)

ดินโดยทั่วไปจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่หลากหลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะไม่ขยายตัวเมื่อได้รับความชื้น อย่างไรก็ตามมีองค์ประกอบของดินบางประเภทที่มีสมบัติในการขยายตัวประกอบไปด้วย มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ไบเดลไลต์ (Beidellite) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) แอตตาพัลไจต์ (Attapulgite) นอนโทรไนต์ (Nontronite) และคลอไรท์ (Chlorite) นอกจากนี้ยังมีเกลือประเภทซัลเฟตบางชนิดทำให้ดินเกิดการบวมตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Fredlund, 1975)

ลักษณะของดินประเภทนี้ คือ ในฤดูฝนที่มีความชื้นดินจะดูดซับน้ำ และเกิดการขยายตัวเชิงปริมาตรส่งผลต่อการรับแรงของโครงสร้างอาคาร โดยเมื่อดินบวมตัวจะเกิดแรงดันยกแผ่นคอนกรีตหรือฐานรองพื้นขึ้นก่อให้เกิดความเสียหายต่ออาคารและบริเวณโดยรอบ ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณทางเท้าหรือผนังอาคารใต้ดิน ระบบท่อหรือทางน้ำแตกหัก ส่วนความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชั้นบนของอาคารจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนไหวในโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง ส่วนในฤดูร้อนดินจะหดตัว และมีรอยแตกเกิดขึ้นอย่างรุนแรงการหดตัวดังกล่าวจะไปทำลายโครงสร้างที่ค้ำยันอาคารสิ่งก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของอาคาร นอกจากนี้รอยแยกจากการหดตัวดังกล่าวจะเป็นเส้นทางให้น้ำสามารถซึม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ลงไปได้ เมื่อเกิดสภาวะชื้นจากน้ำที่ไหลลงมาดินดังกล่าวก็จะเกิดการบวมตัวอีกครั้งเกิดวัฏจักรของการหดตัวและการบวมตัววนไปเรื่อยๆ (Biswas และ Krishna, 2008; Rogers และคณะ, 1993)

การประเมินการบวมตัวของดินแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ศักยภาพการบวมตัว (Swelling potential) เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการบวมตัวของดินเมื่อได้รับความชื้น และส่วนที่สอง คือ ความดันการบวมตัว (Swelling pressure) จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความดันของดินเมื่อเกิดการบวมตัวเทียบกับวัสดุแข็งบริเวณใกล้เคียงมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางฟุต การวัดการบวมตัวของดินสามารถทำได้โดยวิธี California bearing ratio test (C.B.R) ตามมาตรฐาน ASTM D1883-16 และวิธี Free swell Index ตาม ASTM- D5890 (Biswas และ Krishna, 2008)

2.9. ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1. งานวิจัยเกี่ยวกับอัตราส่วนการผสมของเสียเบนโทไนท์

Chalermyanont และ Arrykul (2005) ได้ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะระหว่างทราย และเบนโทไนท์เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานการก่อสร้างวัสดุกันซึมในสถานที่เก็บน้ำ และหลุมฝังกลบขยะ การทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้ Rigid-wall permeameter แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter) มาตรฐาน ASTM D5856 และมีการวิเคราะห์การรับแรงเฉือนเพื่อหาค่ากำลังของดิน โดยเบนโทไนท์ที่ใช้ในการทดลองเป็นประเภทโซเดียมเบนโทไนท์และทรายที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายในพื้นที่จังหวัดสงขลาที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเป็น 3.6×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที การทดลองจะผสมเบนโทไนท์ในปริมาณร้อยละ 0 3 5 7 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง เติมน้ำประปาจนได้ความชื้นที่เหมาะสมตามวิธีของ Standard proctor compaction method (ASTM D698) ทิ้งไว้ให้อิ่มตัวนาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบการซึมผ่านโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (De – ionized water) เป็นน้ำชะ จากการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์จากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลงอย่างมากจาก 5.13×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที เป็น 5.15×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ แต่การเพิ่มปริมาณของเบนโทไนท์ที่สูงกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์จากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.3 เป็นร้อยละ 9.46 ตามลำดับ การผสมเบนโทไนท์ในปริมาณสูงจะทำให้การรับแรงเฉือนของวัสดุกันซึมมีค่าลดลงเนื่องจากวัสดุกันซึมจะเกิดการบวมตัวของเบนโทไนท์เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำ ดังนั้นการใช้ทรายผสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เบนโทไนท์ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ก็สามารถผลิตวัสดุกันซึมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วงต่ำกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานการก่อสร้างวัสดุกันซึมในสถานที่เก็บน้ำ และยังมีความสามารถรับแรงเฉือนสูงเพียงพอสำหรับการใช้งานในสภาพทั่วไปได้

Gueddouda และคณะ (2008) ได้ศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารผสมระหว่างทรายประเภท Dune sand และแคลเซียมเบนโทไนท์ เพื่อใช้ในงานก่อสร้างวัสดุกันซึมของหลุมฝังกลบขยะ เขื่อนดิน และระบบเก็บกากกัมมันตรังสี ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ส่วนผสมให้เกิดความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ มีสมบัติที่ดีด้านสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ และสมบัติที่ดีเชิงกล โดยวัสดุกันซึมที่ได้ต้องมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ลดลง และการรับแรงเฉือนที่ยอมรับได้ การทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้ Permeameter แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter) และมีการวิเคราะห์การรับแรงเฉือนเพื่อหาค่ากำลังของดิน ทรายที่ใช้ทดลองได้มาจากทางตอนใต้ของประเทศแอลจีเรียซึ่งเป็น Desert sand การทดลองจะผสมเบนโทไนท์ในปริมาณร้อยละ 0 3 5 10 12 และ 15 โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าการเติมแคลเซียมเบนโทไนท์ร้อยละ 12 – 15 โดยน้ำหนักแห้งจะมีค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของน้ำของต่ำกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาทีและมีความสามารถรับแรงเฉือนสูง

Wayal และ Ameta (2008) ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารผสมระหว่างทรายประเภท Dune sand จากประเทศอินเดีย และโซเดียมเบนโทไนท์ การทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้ Permeameter แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter) ทรายที่ใช้ในการทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านของน้ำ 2.0×10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที ปริมาณของเบนโทไนท์ที่ใช้ผสมทราย คือ ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าการเพิ่มปริมาณของเบนโทไนท์จากร้อยละ 2 เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลงจาก 1.65×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที เป็น 2.18×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที

Vangpaisal และ Sangtian (2010) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินทรายปนทรายแป้งด้วยโซเดียมเบนโทไนท์ เพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำลงสำหรับใช้ในการก่อสร้างเป็นวัสดุกันซึม การทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์หาอัตราส่วนการผสมเบนโทไนท์ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอยู่ในมาตรฐานของวัสดุกันซึม คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที โดยวัสดุกันซึมที่ได้ต้องมีการพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ และการรับแรงเฉือนของวัสดุกันซึม โดยเบนโทไนท์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดโซเดียมเบนโทไนท์ มีปริมาณของแร่มอนต์มอริลโอไนท์ (Montmorillonite) ประมาณร้อยละ 57 การทดลอง

จะผสมเบนโทไนท์ในปริมาณร้อยละ 0 2 4 6 และ 8 โดยน้ำหนักแห้ง เติมน้ำปราศจากไอออน (De – ionized water) ในปริมาณที่กำหนดเพื่อให้ได้ค่าความชื้นตามต้องการ จากนั้นเก็บไว้ในถุงพลาสติกปิดมิดชิดนาน 24 ชั่วโมงเพื่อให้เบนโทไนท์ดูดซับความชื้น และเป็นการปรับสภาพให้มวลดินมีความชื้นสม่ำเสมอ การทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้ Flexible-wall permeameter ตามมาตรฐาน ASTM D5084 โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร พบว่าการเพิ่มเบนโทไนท์ลงไปผสมดินทรายปนทรายแป้งจากร้อยละ 2 เป็นร้อยละ 8 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลงจาก 1×10^{-5} เป็น 1×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ เนื่องจากเบนโทไนท์จะเข้าไปแทรกระหว่างช่วงว่างในเม็ดดินและเกิดการบวมตัวปิดเส้นทางการไหลของของเหลว นอกจากนี้การใช้อัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ที่สูงเกินไปจะทำให้ปริมาณดินเหนียวในมวลดินสูงมากเกินไป การใช้เบนโทไนท์มากเกินไปไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน และทำให้ค่าการรับแรงเฉือนของวัสดุกันซึมลดลง ก่อสร้างยากขึ้น ดังนั้นการใช้ทรายผสมเบนโทไนท์ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้งที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเป็น 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของวัสดุกันซึมมาตรฐาน สามารถรับแรงเฉือน และก่อสร้างง่าย จึงถึงว่าเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

Proia และคณะ (2016) ได้ศึกษาอัตราส่วนผสมของเบนโทไนท์กับดินทรายที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล การทดลองจะผสมเบนโทไนท์ในปริมาณร้อยละ 0 5 7 10 20 30 50 70 และ 100 โดยน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำของผสมมาหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor compaction) ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ที่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง ส่งผลเพียงเล็กน้อยกับปริมาณความชื้น แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้ง ส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีการเลื่อนขึ้นเล็กน้อยไปทางซ้าย (ปริมาณเบนโทไนท์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลง ค่าความหนาแน่นแห้งสูงขึ้น) เนื่องมาจากเบนโทไนท์เป็นสารที่มีขนาดเล็กมาก สามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทำให้ตัวอย่างดินมีความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนเบนโทไนท์มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้ง กราฟความสัมพันธ์จะเลื่อนลงมาทางขวา (ปริมาณเบนโทไนท์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง) และแสดงพฤติกรรมเป็นวัสดุที่มีพลาสติกสูง เนื่องจากเม็ดทรายมีการกระจายตัวในเนื้อของเบนโทไนท์ ซึ่งในกรณีนี้ส่งผลให้เม็ดทรายไม่มีแรงดึงดูดระหว่างเม็ดทรายด้วยกัน ทำให้ความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองในระดับจุลภาคโดยใช้ scanning electron microscope (SEM) พบว่าอนุภาคของเบนโทไนท์เกาะติดอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดทราย โดยจะสร้าง “bridges” เชื่อมระหว่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อนุภาค แต่เมื่อมีปริมาณเบนโทไนท์เพิ่มสูงขึ้นจะเห็นอนุภาคของเม็ดทรายแช่อยู่ในเนื้อของเบนโทไนท์ จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเติมเบนโทไนท์เพียงเล็กน้อยนั้นอนุภาคของเบนโทไนท์จะสามารถไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายได้โดยไม่รบกวนโครงสร้างของตัวอย่าง แต่การเติมปริมาณเบนโทไนท์มากกว่าร้อยละ 7 – 10 โดยน้ำหนักแห้ง นั้นจะส่งผลให้โครงสร้างของเม็ดทรายถูกทำลาย และส่งผลต่อการจัดเรียงตัว นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนเบนโทไนท์ที่น้อยกว่า 10 โดยน้ำหนักแห้ง ส่งผลให้ตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายเม็ดทราย อัตราส่วนเบนโทไนท์ที่มากกว่า 60 โดยน้ำหนักแห้ง ส่งผลให้ตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายเบนโทไนท์ ดังนั้นที่อัตราส่วนผสมเบนโทไนท์ที่อยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 60 โดยน้ำหนักแห้ง จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน

Sobti และ Singh (2017) ได้ศึกษาการนำวัสดุในพื้นที่ คือ ทราย ทรายแป้ง เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า มาผลิตวัสดุกันซึม และเติมเบนโทไนท์ลงไปในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อช่วยในการผลิตวัสดุกันซึม งานวิจัยนี้จะทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำตาม ASTM D5084-10 และการทดสอบ consolidation พบว่าการเติมเบนโทไนท์ลงไปในส่วนผสมทรายและทรายแป้งจะทำให้ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นแห้งมีค่าลดต่ำลง

- การเติมเบนโทไนท์ผสมกับทราย (sand-bentonite) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงจาก 1.75×10^{-5} เป็น 3.34×10^{-11} เมตรต่อวินาที
- การเติมเบนโทไนท์ผสมกับทรายแป้ง (silt-bentonite) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงจาก 1.3×10^{-8} เป็น 4.5×10^{-12} เมตรต่อวินาที
- การเติมเบนโทไนท์ผสมกับเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า (coal ash-bentonite) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงจาก 2.07×10^{-6} เป็น 6.01×10^{-11} เมตรต่อวินาที

จากการทดลองพบว่า sand-bentonite กับ coal ash-bentonite มีพฤติกรรมด้านการซึมผ่านที่คล้ายคลึงกัน ส่วน silt-bentonite จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนการเติมเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนเบนโทไนท์ผสมกับทราย (sand-bentonite) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้ง อัตราส่วนเบนโทไนท์ผสมกับเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า (coal ash-bentonite) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้ง และอัตราส่วนเบนโทไนท์ผสมกับทรายแป้ง (silt-bentonite) ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนักแห้งเป็นอัตราส่วนผสมเหมาะสำหรับทำวัสดุกันซึม

2.9.2. งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของวัสดุกันซึมในสภาวะหลุมฝังกลบจำลอง

Tossiri (2001) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึม Compacted sand – bentonite การทดลองจะผสมเบนโทไนท์ในปริมาณร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักแห้ง เติมน้ำประปาในปริมาณที่กำหนดเพื่อให้ได้ค่าความชื้นตามต้องการ เก็บตัวอย่างดินที่ผสมแล้วนาน 24 ชั่วโมงในภาชนะปิดมิดชิดเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ โดยวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนท์จะถูกบดอัดในกระบอกขึ้นรูปแบบอัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร แล้วนำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) กรดอะซิติก(CH_3COOH) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นน้ำชะ โดยนำผลไปเปรียบเทียบการไหลซึมด้วยน้ำประปา พบว่าการเติมเบนโทไนท์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้งจะมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน 2×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที แต่เมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ไหลซึมผ่านของผสมตัวอย่างทำให้วัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนท์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้ง มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพิ่มขึ้น 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยน้ำประปา ถ้าใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ กรดอะซิติก กรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพิ่มขึ้นเป็น 58 14 39 และ 3 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยน้ำประปา

Hamdi และ Srasra (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของแร่ธาตุ และอัตราการไหลซึมของฟลูออไรด์ และฟอสเฟตต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านวัสดุกันซึมของหลุมฝังกลบขยะ วัสดุกันซึมที่ใช้ในการทดลองจะเป็นวัสดุกันซึมดินเหนียวธรรมชาติจากประเทศตูนีเซีย 3 ตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเป็น 8.5×10^{-8}, 2.08×10^{-7} และ 6.8×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ น้ำชะขยะจำลองเป็นสารละลายกรดที่มีค่าพีเอช 2.7 มีฟลูออไรด์เข้มข้น 2,360 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสเฟตเข้มข้น 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้ Ragid - wall permeameter ตามมาตรฐาน ASTM D5856 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในการทดลองนี้จะทดสอบระยะยาว (Long term) ใช้เวลามากกว่า 200 วัน พบว่าตัวอย่างดินที่ 2 มีการแตกหักของเนื้อดินเมื่อการทดสอบผ่านไป 60 วัน เนื่องจากชิ้นงานเกิดการบวมตัว และการแลกเปลี่ยนประจุกับสารละลายกรดทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงาน นอกจากนี้ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ และฟอสเฟตมีค่าที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น โดยดินเหนียวจะสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้มากกว่าฟอสเฟต

Hassan (2014) ได้ศึกษาผลกระทบของสารเคมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของวัสดุกันซึมดินเหนียวบดอัดในสภาวะหลุมฝังกลบจำลองซึ่งจะมีการย่อยสลายของสารอินทรีย์จนเกิดน้ำชะขยะมูลฝอย และมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดินเหนียวที่นำมาทดลองมีอยู่ 2 ชนิด คือ Leda

Clay ซึ่งผสมโซเดียมเบนโทไนท์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ Halton Clay ซึ่งผสมโซเดียมเบนโทไนท์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สารเคมีที่ใช้เป็นน้ำชะขยะจำลองมีองค์ประกอบของกรดอะซิติกเข้มข้น 7 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดโพรพิโอเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดบิวทิริกเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร $NaHCO_3$ เข้มข้น 3,012 มิลลิกรัมต่อลิตร $CaCl_2$ เข้มข้น 2,882 มิลลิกรัมต่อลิตร $MgCl_2.6H_2O$ เข้มข้น 3,114 มิลลิกรัมต่อลิตร $MgSO_4.7H_2O$ เข้มข้น 319 มิลลิกรัมต่อลิตร NH_4HCO_3 เข้มข้น 2,439 มิลลิกรัมต่อลิตร $CO(NH_2)_2$ เข้มข้น 695 มิลลิกรัมต่อลิตร $NaNO_3$ เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร K_2CO_3 เข้มข้น 324 มิลลิกรัมต่อลิตร $KHCO_3$ เข้มข้น 312 มิลลิกรัมต่อลิตร และ K_2HPO_4 เข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้จะมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยใช้ Rigid-wall permeameter แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter) มาตรฐาน ASTM D5856 การทดลองใช้เวลา 20 – 35 วัน แตกต่างกันตามชนิดของดิน พบว่าเมื่อผ่านไป 15 วัน วัสดุตัวอย่างจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำประปาเป็นน้ำชะในการทดลอง เนื่องจากการดึงดูดของไอออนโซเดียม (Na^+) อย่างไรก็ตามแรงดึงดูดทางเคมีนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะของประจุบวก และปริมาณของประจุลบบนชั้นดินเหนียวบดอัด

Tang และคณะ (2015) ได้ศึกษาผลกระทบจากการอุดตันของจุลชีพต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของวัสดุดินเหนียวบดอัด (Compacted clay) งานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head) ตามมาตรฐาน JIS A 1218 โดยใช้น้ำชะ 3 ชนิด คือ 1). น้ำปราศจากไอออน 2). สารละลายธาตุอาหาร (Nutrient solution) ซึ่งประกอบไปด้วย $C_6H_{12}O_6$ เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก , NaCl เข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก, $MgSO_4$ เข้มข้นร้อยละ 0.05โดยน้ำหนัก, $FeCl_3$ เข้มข้นร้อยละ0.00075 โดยน้ำหนัก, KH_2PO_4 เข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก และยีสต์ เข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และ 3) น้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบขยะในพื้นที่ Suzhou จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกลั่นมีค่า 3.77×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที แต่เมื่อมีการเปลี่ยนน้ำชะเป็นน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบขยะ และสารละลายธาตุอาหาร (Nutrient solution) จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงกลายเป็น 1.1×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที และ 5.22×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำชะขยะที่เกิดจากหลุมฝังกลบ ทำให้เกิดการอุดตันช่องว่างของดินเหนียวบดอัด โดยในระยะแรกจะเกิดการอุดตันจากตะกอนคาร์บอเนต และระยะที่สองจะเกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียไม่ใช่ออกซิเจน (Anaerobic microorganisms) ไปปิดช่องว่างระหว่างดินจนเกิดเป็น bio – clogging ซึ่งจะไปลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านให้ลดต่ำลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.10. สรุปแนวทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การขุดเจาะใต้ผิวดิน เช่น การขุดเจาะเพื่อวางท่อ และการขุดเจาะเพื่อวางอุโมงค์นั้นจะเกิดของเสียขึ้นในกระบวนการขุดเจาะ คือ ของเสียเบนโทไนท์ โดยสารเบนโทไนท์จะถูกใช้ในการขุดเจาะใต้ผิวดินเพื่อรักษาสภาพของช่องเจาะในการก่อสร้างแบบเจาะลอด (HDD) เพื่อลำเลียงเศษวัสดุออกมายังพื้นที่ทำงานด้านนอกโดยผ่านช่องว่างระหว่างก้านเจาะกับผนังหลุม และเป็นวัสดุหล่อลื่นให้แก่หัวเจาะเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างท่อกับหลุมเจาะ และกันไม่ให้น้ำไหลเข้ามาในหลุมเจาะ โดยประมาณได้ว่าการขุดเจาะใต้ผิวดินเพื่อวางท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ก่อให้เกิดของเสียเบนโทไนท์ 10,400 กิโลกรัมต่อกิโลเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพดินบริเวณที่ทำการขุดเจาะ และของเสียทั้งหมดจะถูกนำไปทิ้งในบ่อดินในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาต ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายการกำจัดของเสียเบนโทไนท์

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นถึงการนำเบนโทไนท์บริสุทธิ์ไปเป็นสารผสมในการปรับปรุงสภาพดินทรายเพื่อผลิตเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังขาดงานวิจัยที่ศึกษาถึงการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ให้ก่อประโยชน์ในการผลิตวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ ซึ่งจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเบนโทไนท์ สามารถลดปัญหาการขาดแคลนดินเหนียวในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และลดต้นทุนการผลิตวัสดุกันซึม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะระหว่างแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนทั้งในแง่การซึมผ่านของน้ำด้วยการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในดินแบบความดันเปลี่ยน ความต้านทานต่อแรงเฉือนด้วยการทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่มีแรงอัดด้านข้าง การบวมตัวตามวิธีวิเคราะห์ California bearing ratio test (C.B.R) และศึกษาพฤติกรรมด้านการซึมผ่านของวัสดุกันซึมเมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบในสภาพหลุมฝังกลบขยะจริง และจากการทดลองทั้งหมดเราจะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน เพื่อนำมาผลิตวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ และที่สำคัญสุดท้ายนี้จากข้อมูลการกำจัดของเสียเบนโทไนท์จะนำมาประเมินต้นทุนเชิงวิศวกรรมเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุกันซึมแทนการนำไปถมในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาตเพื่อดูความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

บทที่ 3
แผนการทดลอง และการดำเนินงานวิจัย

3.1. แผนงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการดำเนินการระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการขยะ ตึกปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกองวิเคราะห์วิจัยวัสดุ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการก่อสร้าง การเคหะแห่งชาติ มุ่งเน้นทำการศึกษาเพื่อผลิตวัสดุกันซึมจากของเสียเบนโทไนท์ที่เกิดจากการขุดเจาะใต้ผิวดิน โดยตัวอย่างของเสียเบนโทไนท์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ของเสียเบนโทไนท์ที่เกิดจากการขุดเจาะวางท่อบริเวณพื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

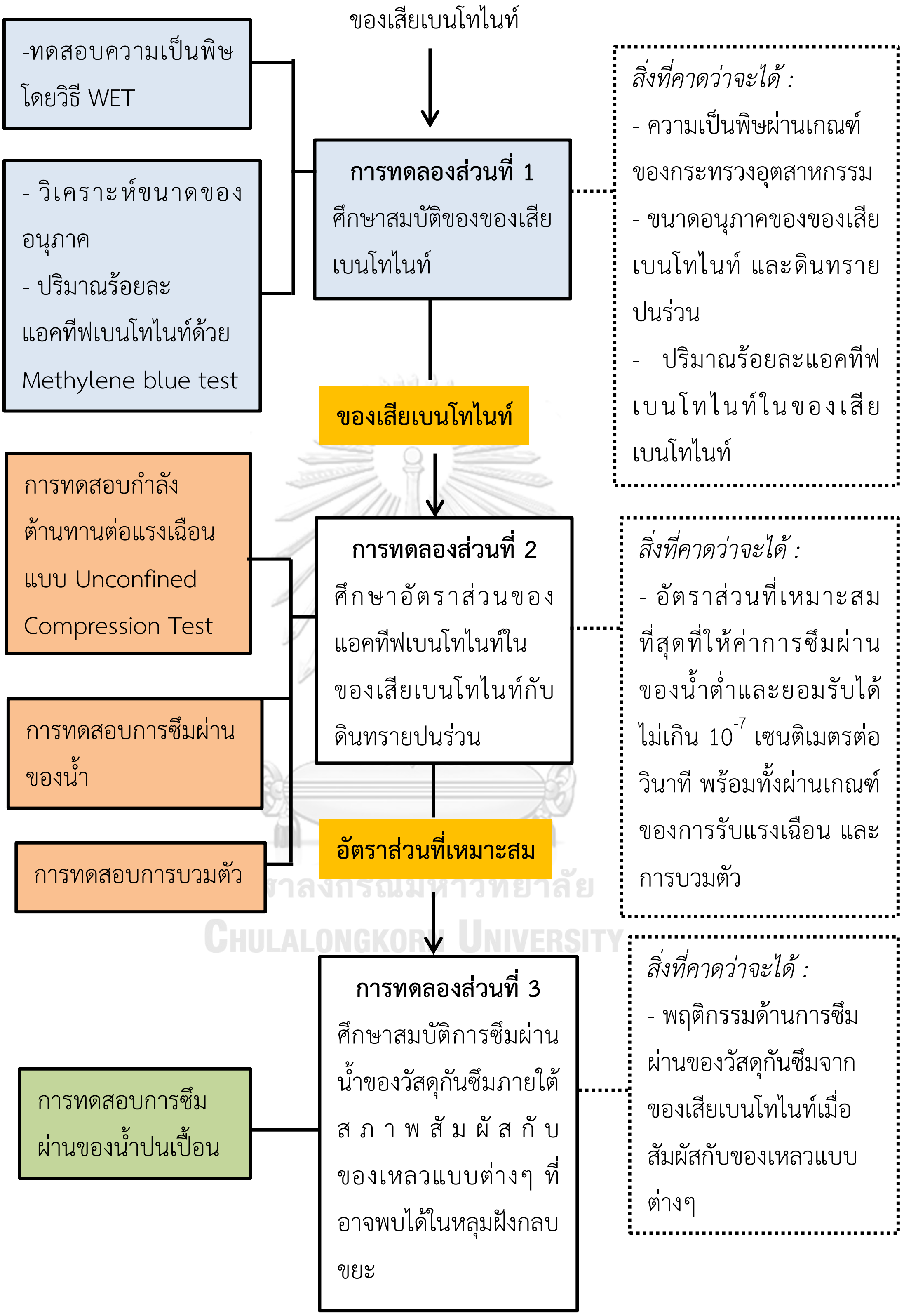
การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาสมบัติของของเสียเบนโทไนท์ โดยวิเคราะห์ความเป็นพิษของของเสียเบนโทไนท์ด้วยวิธี Waste extraction test (WET) เพื่อให้ผ่านเกณฑ์การชะละลายโลหะหนักตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย พ.ศ. 2548 สมบัติทางกายภาพของของเสียเบนโทไนท์และดินทรายปนร่วนด้วยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analysis) ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer และสมบัติทางเคมีของของเสียเบนโทไนท์ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ ซึ่งสามารถวัดได้ตามวิธี Methylene blue procedure ตามมาตรฐาน ASTM C837-09 เพื่อที่จะนำของเสียเบนโทไนท์ไปใช้ในการทดลองส่วนที่ 2

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน (Loamy sand) โดยจะมีการทดสอบกำลังต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) แบบไม่มีแรงอัดด้านข้าง (Unconfined compression test) ตามมาตรฐาน ASTM D2166-00 ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ด้วยวิธี Rigid wall compaction mold permeameter แบบ Falling head ตามมาตรฐาน ASTM D5856-15 โดยใช้น้ำปราศจากไอออน (De–ionized water) เป็นน้ำชะ และทดสอบการบวมตัว (Swelling) ตามมาตรฐาน ASTM D1883-16 เพื่อจะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำและยอมรับได้ ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที (US Environmental Protection Agency, 1993; กรมควบคุมมลพิษ, 2544) สามารถรับแรงเฉือนมากกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (Daniel และ Wu, 1993) และมีการบวมตัวที่ต่ำกว่าร้อยละ 4 ของความสูงเดิม (กรมทางหลวง, 2532) ไปใช้ในการทดลองส่วนที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดลองส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของวัสดุกันซึมภายใต้สภาพสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ โดยนำอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนที่ 2 มาทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ด้วยวิธี Rigid wall compaction-mold permeameter แบบ Falling head โดยมีการจำลองน้ำชะที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ 3 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อทราบถึงพฤติกรรมด้านการซึมผ่านของวัสดุกันซึมจากของเสียเบนโทไนท์เมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3. 1 แผนการทดลอง

3.2. วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1. ของเสียเบนโทไนท์ (Bentonite waste)

ของเสียเบนโทไนท์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นของเสียที่เกิดจากการขุดเจาะวางท่อบริเวณพื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ตัวอย่างที่นำมาศึกษาเป็นของเสียเบนโทไนท์จากโซเดียมเบนโทไนท์ มีลักษณะทางกายภาพเป็นสารเหลวข้น (Slurry) และมีสีเหลืองนวล แสดงดังภาพที่ 3.2 และมีความชื้นร้อยละ 45.43 $\pm$ 1.17

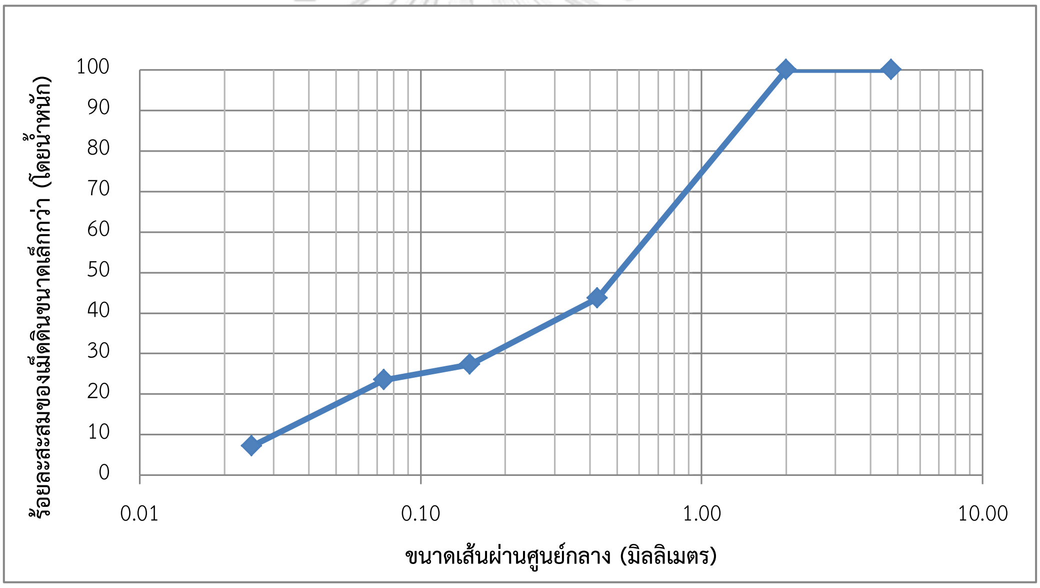
ภาพที่ 3. 2 ตัวอย่างของเสียเบนโทไนท์

3.2.2. ดินทรายปนร่วน (Loamy sand)

ดินทรายปนร่วน เป็นลักษณะของดินที่พบส่วนใหญ่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยทั่วไปจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำสูง ไม่สามารถนำมาใช้เป็นชั้นดินกันซึมในหลุมฝังกลบขยะได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จะจำลองดินทรายปนร่วนโดยอ้างอิงข้อมูลจากแผนภูมิสามเหลี่ยมจำแนกประเภทดิน (Triangular soil classification chart) (มานิต ช่วยงาน, 2552a) และตารางการจำแนกประเภทของดินตามขนาดเม็ดดิน (บุญชุม เปียแดง และคณะ, 2526) ซึ่งจะใช้ทรายแม่น้ำ (Sand) (ขนาดทรายอยู่ในช่วง 0.075-2 มิลลิเมตร) ปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของดินรวม และทรายแป้ง (Silt) ขนาดคัดเกรด 200 เมซ (0.075 มิลลิเมตร) ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของดินรวม ตัวอย่างของดินทรายปนร่วนแสดงดังภาพที่ 3.3 โดยก่อนทำการทดลองได้มีการตรวจสอบเพื่อยืนยันประเภทของดินที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรง (Sieve analysis) ซึ่งกราฟการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินทรายปนร่วนที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังภาพที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3. 3 ตัวอย่างดินทรายปนร่วน



ภาพที่ 3. 4 การกระจายตัวของขนาดเม็ดดินทรายปนร่วน

ดินที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวของเม็ดดินที่ไม่สม่ำเสมอ และขนาดของเม็ดดินมีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly graded soil) ดินดังกล่าวมีองค์ประกอบเป็นดินทรายซึ่งมีขนาดเม็ดดิน 0.075- 2.000 มิลลิเมตร อยู่ร้อยละ 76.54 โดยน้ำหนักของดินรวม ทรายแป้งซึ่งมีขนาดเม็ดดิน 0.002 - 0.075 มิลลิเมตร อยู่น้อยกว่าร้อยละ 23.46 โดยน้ำหนักของดินรวม ซึ่งจะจัดเป็นดินพวกดินทรายปนร่วน (Loamy sand) ตามมาตรฐานการจำแนกดินโดยใช้แผนภูมิสามเหลี่ยมของกระทรวงเกษตร ประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Agriculture – USDA) ค.ศ. 1983

3.3. เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1. เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ก. เครื่องมือในการวิเคราะห์ความเป็นพิษโดยวิธี WET

1. เครื่องเขย่าหลอดทดลองแนวตั้ง (Vertical Rotator Mixer) ยี่ห้อ Grant Bio รุ่น PTR-35
2. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Inductively coupled plasma spectroscope – ICP)

ข. เครื่องมือในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค

1. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Distribution Analyzer) ยี่ห้อ MALVERN รุ่น Mastersizer 3000

ค. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบร้อยละแอคทีฟเบนโทท์

1. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2

ง. อุปกรณ์ที่ใช้ในการบดอัด (Compaction)

1. กระบอกบดอัดโลหะทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) และปลอก (Collar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)
2. ค้อนโลหะ (Rammer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว) มีตัวบังคับระยะตก 305 มิลลิเมตร (12 นิ้ว) น้ำหนักมวลรวมด้ามถือ 2.5 กิโลกรัม
3. เหล็กปาด (Straight edge)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จ. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength)

1. เครื่องทดสอบกำลังต้านทานต่อแรงเฉือน ยี่ห้อ ELE International รุ่น EL78-0060
2. ชุดอุปกรณ์ขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยท่อพลาสติกชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์ผ่าครึ่ง (Polyvinylchloride - PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 70 มิลลิเมตร สูงประมาณ 140 มิลลิเมตร ปลอก (Collar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 70 มิลลิเมตร สูงประมาณ 70 มิลลิเมตร และเข็มขัดรัดท่อ จำนวน 4 อัน แสดงดังภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3. 5 ชุดอุปกรณ์ขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ

ฉ. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability)

1. อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านน้ำแบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head permeameter)
2. ชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำทำด้วยท่อพลาสติกใสชนิดพอลิเอทิลีนที่มีค่าความหนาแน่นสูง (High density polyethylene - HDPE)
3. ชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำทำด้วยท่อพลาสติกใสชนิดพอลิยูรีเทน (Polyurethane - PU)
4. ชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำทำด้วยท่อพลาสติกใสชนิดพอลิเอไมด์ (Polyamide - Nylon)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ช. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบวมตัว (Swelling)

1. กระบอกบดอัดโลหะทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และปลอก (Collar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 50.8 มิลลิเมตร (2 นิ้ว)
2. แท่นโลหะรอง (Spacer disc) เป็นแท่งโลหะทรงกระบอกตัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150.8 มิลลิเมตร สูง 61.4 มิลลิเมตร (2.416 นิ้ว)
3. เหล็กถ่วงน้ำหนัก (Surcharge weight)
4. แผ่นวัดการขยายตัว (Swell plate)
5. สามขา (Tripod)

6. ไดอัลเกจ (Dial gauge)

ซ. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

1. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA2224-CW
2. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Defender
3. เครื่องปั่นแบบใช้แกนแม่เหล็กหมุน (Magnetic heating agitator) ยี่ห้อ Diligent
4. เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve shaker) ยี่ห้อ Endecotts รุ่น Octagon 200
5. เครื่องวัดพีเอช (pH - meter) ยี่ห้อ Metller Toledo รุ่น PSM11T090
6. อุปกรณ์วัดความชื้นในดิน (Moisture content meter) ยี่ห้อ OEM รุ่น TK100 แสดงดังภาพที่ 3.6
7. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น F115
8. นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ AUSTIN
9. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
10. เวอร์เนีย
11. แม่เหล็ก (Magnetic Stir bar) ขนาด 30×7 มิลลิเมตร
12. เครื่องผสมดิน (Mixer)
13. ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) ซึ่งประกอบด้วยตะแกรงขนาด 4 เมซ (4.75 มิลลิเมตร) 10 เมซ (2.00 มิลลิเมตร) 40 เมซ (0.425 มิลลิเมตร) 100 เมซ (0.150 มิลลิเมตร) 200 เมซ (0.075 มิลลิเมตร) และ 500 เมซ (0.025 มิลลิเมตร) และถาดรอง
14. ถ้วยกระเบื้อง และเครื่องแก้วพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์

ภาพที่ 3. 6 อุปกรณ์วัดความชื้นในดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.2. สารเคมี

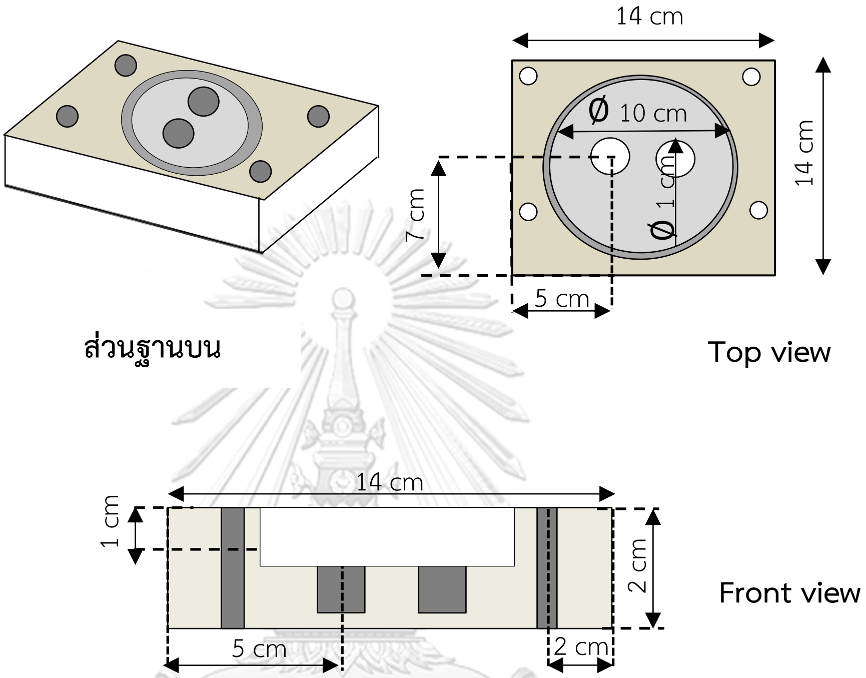
1. กรดซิตริก ($C_6H_8O_7$)
2. กรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้นร้อยละ 65
3. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้นร้อยละ 98
4. เมททิลีนบลู ($C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$)
5. น้ำปราศจากไอออน (De – ionized water)
6. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 0.5 โมลาร์ และ 2.0 โมลาร์
7. สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้น 0.5 โมลาร์ และ 2.0 โมลาร์
8. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5 โมลาร์ และ 2.0 โมลาร์

3.4. ชุดการทดลอง

3.4.1. ชุดอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านน้ำแบบความดันน้ำเปลี่ยน

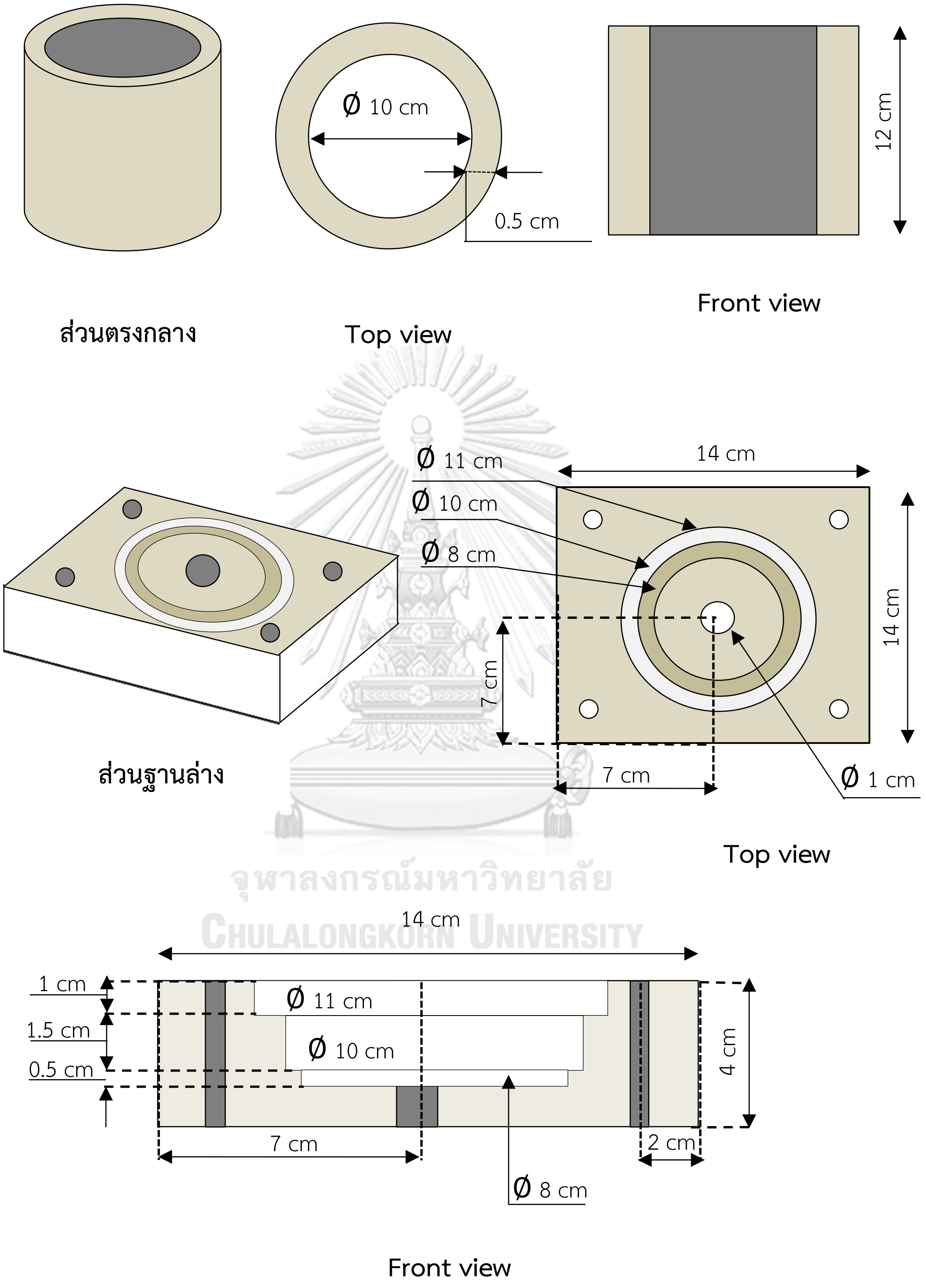
ก. การสร้าง Rigid wall compaction-mold permeameter

อุปกรณ์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้เป็นแบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการชนิดความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head) ตามมาตรฐาน ASTM D5856-15 ในการดำเนินการทดลองจะสร้าง Rigid wall compaction-mold permeameter จำนวน 3 ชุด ในแต่ละชุดจะประกอบด้วย Mold อะคริลิคใสทรงกระบอกกลวงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 10 เซนติเมตร และสูง 12 เซนติเมตร จำนวน 1 อัน สำหรับใส่ตัวอย่างดินที่บดอัด ส่วนบริเวณด้านบน และด้านล่างของ Mold จะทำจากแผ่นอะคริลิคใส ขนาดกว้าง 14 เซนติเมตร และยาว 14 เซนติเมตร โดยแผ่นที่อยู่ด้านล่างจะเจาะรูตรงกลาง 1 รู สำหรับใส่วาล์วน้ำเข้า และแผ่นที่อยู่ด้านบนเจาะรู 2 รู สำหรับใส่วาล์วน้ำออก และวาล์วลมออก แสดงดังภาพที่ 3.7 และ 3.8



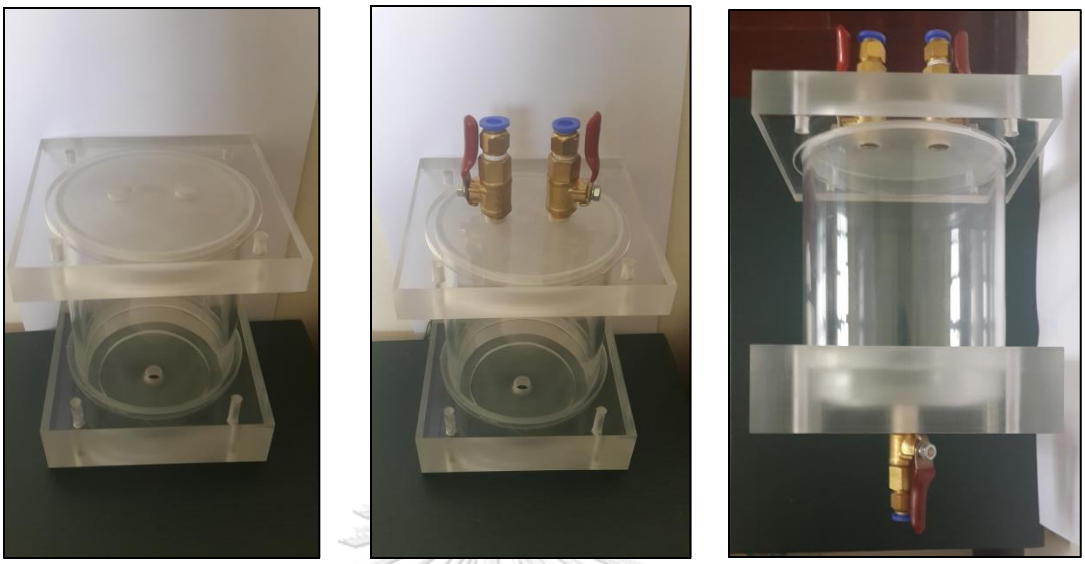
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3. 7 ขนาดของ Rigid wall compaction-mold permeameter ที่ใช้ในการทดลอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

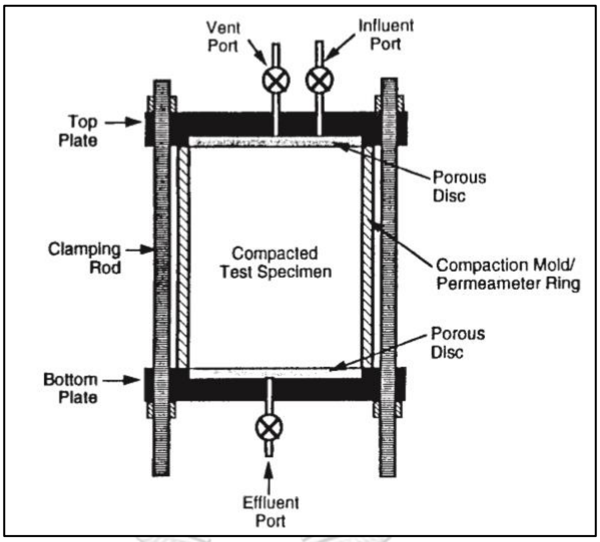
ภาพที่ 3.7 ขนาดของ Rigid wall compaction-mold permeameter ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)



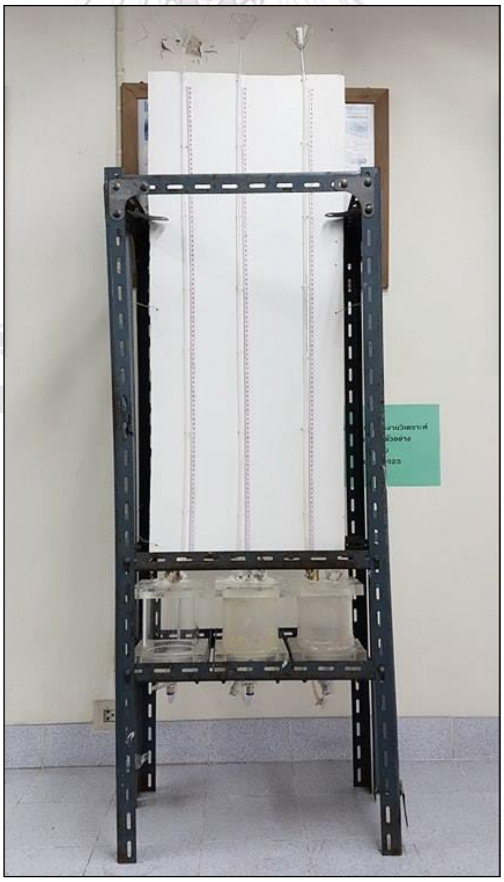
ภาพที่ 3. 8 Rigid wall compaction-mold permeameter ที่ใช้ในการทดลอง

ข. การประกอบ Rigid wall compaction-mold permeameter

ฐานด้านล่างของ Mold จะถูกยึดด้วยแท่งเหล็ก และน็อตทั้ง 4 มุมของแผ่นวางตาข่ายพลาสติก 6 เหลี่ยมชนิดพอลิเอทิลีนที่มีค่าความหนาแน่นสูง (High density polyethylene - HDPE) ซึ่งมีรูเปิด (Mesh size) 2 มิลลิเมตร และผ้ามัสลินบนฐานด้านล่างของชุดทดลองตามลำดับ เพื่อป้องกันดินใน Mold ที่อาจจะหลุดไปอุดตันวาล์วที่อยู่ด้านล่าง จากนั้นวาง Mold สำหรับใส่ตัวอย่างดินที่บดอัดลงไป และวางผ้ามัสลิน 1 แผ่น ปิดทับบริเวณด้านบนของ Mold จากนั้นนำแผ่นอะคริลิคมาปิดทับบริเวณด้านบนของ Mold พร้อมทั้งยึดด้วยน็อต 4 มุมให้แน่น ชุดการทดลอง Rigid wall compaction-mold permeameter ที่ถูกประกอบขึ้นแล้วจะนำไปเชื่อมต่อกับแผงหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำ แสดงดังภาพที่ 3.9 และภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3. 9 การประกอบ Rigid wall compaction-mold permeameter (ASTM D5856-15, 2015)



ภาพที่ 3. 10 แผงหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำ

จากภาพที่ 3.10 หลักการทำงานของชุดการทดลอง Rigid wall compaction-mold permeameter แบบความดันน้ำเปลี่ยน (Falling head) ตามมาตรฐาน ASTM D5856-15 (มานิต ช่วยงาน, 2552c) เป็นดังนี้

(1) เตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบ ประมาณ 2,500 กรัม
(2) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงของ Mold เพื่อหาพื้นที่หน้าตัด และปริมาตรของดินตัวอย่าง
(3) นำตัวอย่างดินไปขึ้นรูปด้วยกระบอกบดอัดมาตรฐานตาม ASTM D698-12e2 การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) โดยแบ่งการบดอัดเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กัน โดยในแต่ละชั้นจะบดอัดจำนวน 25 ครั้งด้วยตุ้มน้ำหนัก
(4) นำตัวอย่างดินพร้อม Mold มาต่อท่อน้ำเข้าและออก เปิดวาล์วน้ำเข้าทางด้านล่างของ Mold โดยให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างดินจากด้านล่างไปด้านบนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะเริ่มทำการทดลอง เพื่อให้ตัวอย่างดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวไปด้วยน้ำ พร้อมทั้งระบายอากาศออกทางด้านบนของตัวอย่างดิน จนไม่มีฟองอากาศอยู่ภายใน Mold จึงปิดวาล์วระบายอากาศ
(5) เริ่มการทดลองโดยปรับระดับน้ำในหลอดทดลองควบคุมความสูงที่ปลายหลอดแก้วเป็น h_1
(6) บันทึกค่าระดับน้ำ h_1 และ h_2 ในช่วงเวลา t
(7) สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำได้จากสมการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

เมื่อ	k	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เซนติเมตรต่อวินาที)
	a	คือ	พื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ว (ตารางเซนติเมตร)
	L	คือ	ความสูงของตัวอย่างดิน (เซนติเมตร)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน (ตารางเซนติเมตร)
	t	คือ	เวลาที่ทำการทดลองปล่อยให้ระดับน้ำลดจากระดับ h_1 ถึงระดับ h_2 (วินาที)
	h_1, h_2	คือ	ระดับน้ำในหลอดแก้วเมื่อเวลาผ่านไป 0 และ t วินาที (เซนติเมตร)

3.5. ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.5.1. การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาสมบัติของของเสียเบนโทไนท์

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ความเป็นพิษของของเสียเบนโทไนท์ วิเคราะห์ขนาดของอนุภาค และวิเคราะห์ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ โดยนำของเสียเบนโทไนท์มาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3 -1

ตารางที่ 3 - 1 การทดสอบความเป็นพิษ ขนาดของอนุภาค และปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ของของเสียเบนโทไนท์

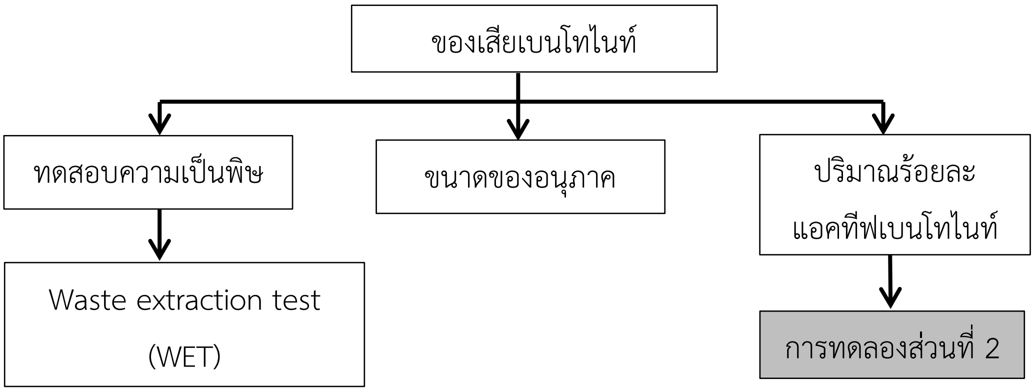
พารามิเตอร์	**วิธีวิเคราะห์**
การทดสอบความเป็นพิษ	- Waste extraction test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548
ขนาดของอนุภาค	- Laser Diffraction Particle Size Analyses
ร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์	- Methylene blue procedure ตามมาตรฐาน ASTM C837-09

การทดสอบการชะละลายของของเสียเบนโทไนท์ด้วยวิธี Waste extraction test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ทดสอบเพื่อยืนยันของเสียเบนโทไนท์เป็นของเสียไม่อันตราย (Non - hazardous waste) โดยวิธีการทดสอบจะระบุในภาคผนวก ก.1

การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคทดสอบเพื่อยืนยันดินที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดินทรายปนร่วน และเพื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของดินทรายปนร่วนกับของเสียเบนโทไนท์

การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ ทดสอบเพื่อนำปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ที่ได้ไปใช้ในการทดลองต่อในส่วนที่ 2 โดยวิธีการทดสอบจะระบุในภาคผนวก ก.2 และผลการทดลองทั้ง 3 ซ้ำจะระบุในภาคผนวก ข.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3. 11 แผนผังการทดลองส่วนที่ 1

3.5.2. การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ และยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ปริมาณของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ที่ผสมกับดินทรายปนร่วน กำหนดให้เป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ที่ได้จากการทดลองส่วนที่ 1 ต่อดินทรายปนร่วน โดยหาได้จากน้ำหนักของแอคทีฟเบนโทไนท์หารด้วยน้ำหนักของดินทรายปนร่วน ตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะมีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ต่อดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 0 3 6 และ 9 โดยน้ำหนัก การทดลองในส่วนที่ 2 จะแบ่งเป็น 3 ส่วน แสดงดังตารางที่ 3 - 2

ทั้งนี้ก่อนที่จะทำการทดลองในส่วนที่ 2 นั้น จะต้องทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D698-12e2 เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC) ในการขึ้นรูปของแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วน คือ ปริมาณความชื้นที่ให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) ของแต่ละตัวอย่างดิน โดยวิธีการทดสอบจะระบุในภาคผนวก ก.3 และผลการทดลองทั้ง 3 ซ้ำจะระบุในภาคผนวก ข.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วน

1. นำของเสียเบนโทไนท์ไปอบในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนของเสียเบนโทไนท์มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 15 – 20 ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยอุปกรณ์วัดความชื้นในดิน (Moisture content meter)
2. ผสมของเสียเบนโทไนท์ กับดินทรายปนร่วนตามอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน เป็นร้อยละ 0 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง โดยในการผสมจะใช้เครื่องปั่นผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ใช้เวลา 5 นาที
3. จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปอบในเตาอบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนของผสมมีปริมาณความชื้นเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC) ซึ่งปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในแต่ละอัตราส่วนผสมมาจากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) โดยจะตรวจสอบความชื้นของวัสดุผสมอีกครั้งด้วยตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส (Oven)
4. เก็บของผสมในภาชนะที่ปิดมิดชิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพดินให้มีความชื้นสม่ำเสมอ

ตารางที่ 3 - 2 การวิเคราะห์สมบัติการรับแรงเฉือน การซึมผ่านของน้ำ และการบวมตัว

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
กำลังต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength)	Unconfined compression test ตามมาตรฐาน ASTM D2166-00
การซึมผ่านของน้ำ (Permeability)	Rigid wall compaction-mold permeameter แบบ Falling head ตามมาตรฐาน ASTM D5856-15
การบวมตัว (Swelling)	California bearing ratio test (C.B.R) ตามมาตรฐาน ASTM D1883-16

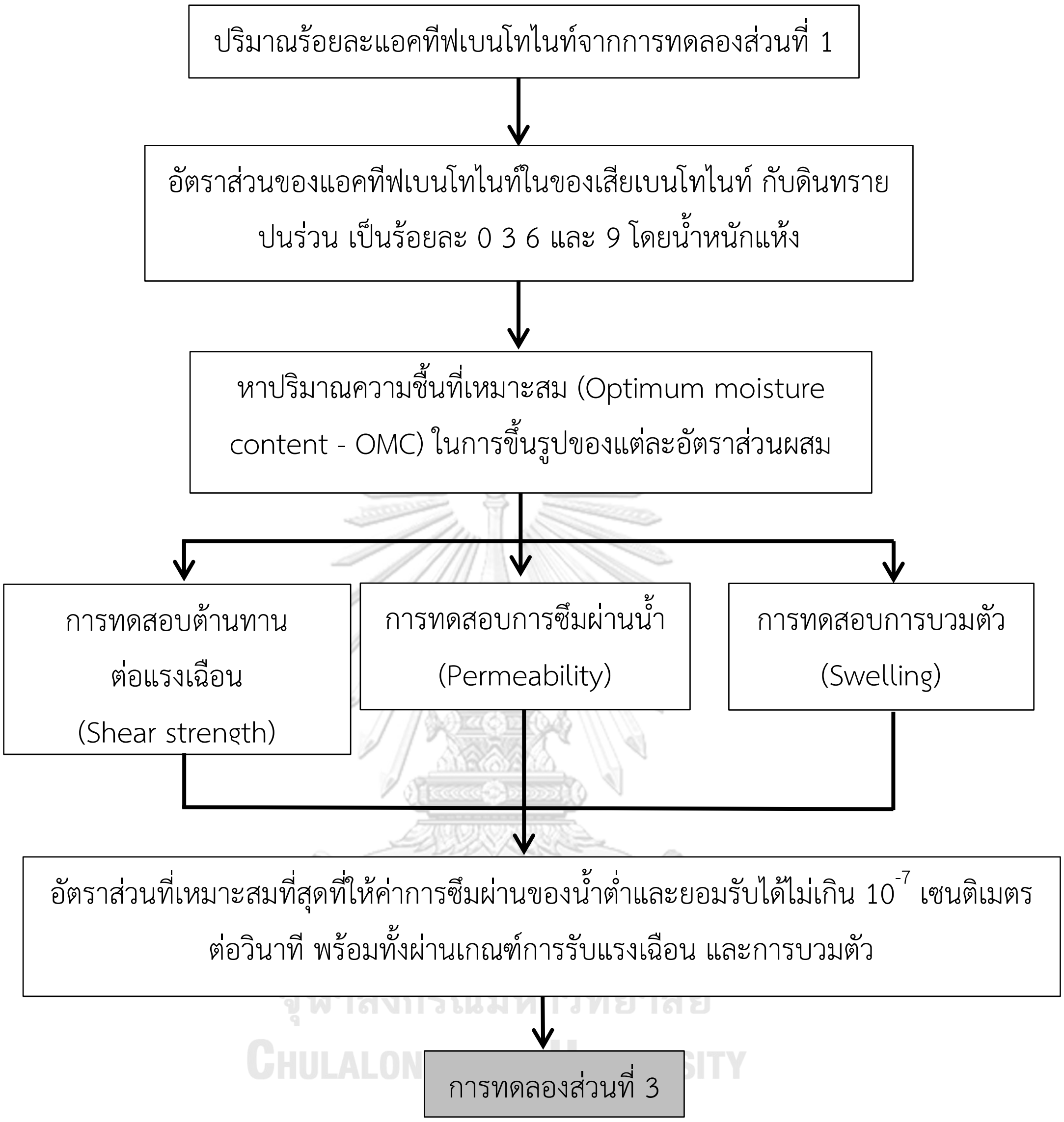
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทดสอบต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) ทดสอบเพื่อหาสมบัติด้านกำลังของชั้นกันซึม การทดลองในส่วนนี้จะขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D698-12e2 โดยใช้ชุดอุปกรณ์ขึ้นรูปตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 70 มิลลิเมตร สูงประมาณ 140 มิลลิเมตร และนำเข้าเครื่องทดสอบ

Unconfined compression test ที่ใช้อัตราในการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยวิธีการทดสอบจะระบุในภาคผนวก ก.4 และผลการทดลองทั้ง 3 ซ้ำจะระบุในภาคผนวก ข.3 โดยกำหนดค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินบดอัดสำหรับเป็นวัสดุกันซึมไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (Daniel และ Wu, 1993)

การทดสอบการซึมผ่านน้ำ (Permeability) ทดสอบเพื่อดูความสามารถด้านการซึมผ่านน้ำของวัสดุกันซึม การทดลองในส่วนนี้จะมีการขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D698-12e2 โดยใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านน้ำแบบความดันน้ำเปลี่ยน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 10 เซนติเมตร และสูง 12 เซนติเมตร จากนั้นทำการทดลองโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (De – ionized water) เป็นน้ำชะไหลลงมา จดบันทึกระดับของเหลวในหลอดควบคุมระดับความสูง ทดสอบจนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าคงที่ ทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยผลการทดลองทั้ง 3 ซ้ำจะระบุในภาคผนวก ข.4 ในการทดลองมีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที (US Environmental Protection Agency, 1993; กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

การทดสอบการบวมตัว (Swelling) ทดสอบเพื่อหาอัตราการขยายตัวเชิงปริมาตรของวัสดุกันซึม ตามมาตรฐาน ASTM D1883-16 การทดลองในส่วนนี้จะมีการขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D698-12e2 โดยใช้กระบอกบดอัดโลหะทรงกระบอกกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) สูง 177.8 มิลลิเมตร (7 นิ้ว) และแท่นโลหะตันสูง 61.4 มิลลิเมตร รองด้านล่างกระบอกบดอัดเพื่อให้ได้ตัวอย่างสูง 116.4 มิลลิเมตร การทดลองในส่วนนี้จะใช้แผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก 4.4 กิโลกรัม จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำเพื่อให้มีการบวมตัวในแนวดิ่ง บันทึกค่าความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลา 6 12 30 วินาที 1 2 4 8 15 30 นาที และ 1 2 4 8 24 48 72 96 ชั่วโมง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าการบวมตัว (%Swell) ทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยวิธีการทดสอบจะระบุในภาคผนวก ก.5 และผลการทดลองทั้ง 3 ซ้ำจะระบุในภาคผนวก ข.5 ในการทดลองมีการกำหนดค่าการบวมตัวไม่ควรมีค่าสูงกว่าร้อยละ 4 (กรมทางหลวง, 2532)



ภาพที่ 3. 12 แผนผังการทดลองส่วนที่ 2

จากการทดลองในส่วนที่ 2 จะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำและยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที พร้อมทั้งผ่านเกณฑ์การรับแรงเฉือน และการบวมตัว ให้นำอัตราส่วนดังกล่าวไปทดลองต่อในการทดลองส่วนที่ 3

3.5.3. การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของวัสดุกันซึมภายใต้สภาพสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อทราบถึงพฤติกรรมด้านการซึมผ่านของวัสดุกันซึมจากของเสียเบนโทไนท์เมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ โดยจะนำอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองส่วนที่ 2 มาทดสอบการซึมผ่านน้ำในการทดลองส่วนที่ 3 การทดลองในส่วนนี้จะมีการขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) ตามมาตรฐาน ASTM D698-12e2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 120 มิลลิเมตร จากนั้นทำการทดลองโดยใช้ของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะเป็นน้ำชะไหลลงมา ซึ่งของเหลวที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3 มีดังนี้

(1) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 0.5 โมลาร์

(2) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.0 โมลาร์

(3) สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้น 0.5 โมลาร์

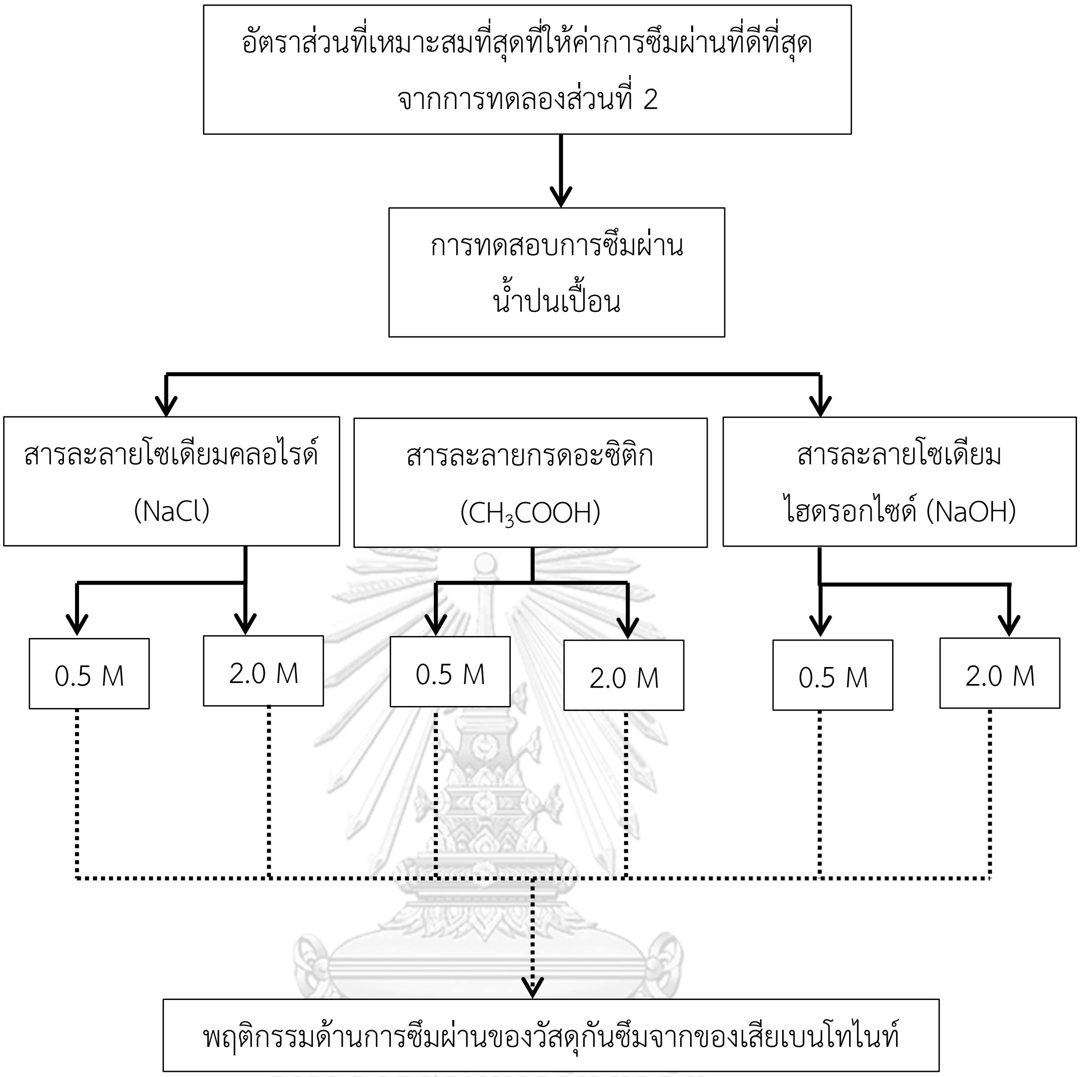
(4) สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้น 2.0 โมลาร์

(5) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5 โมลาร์

(6) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 2.0 โมลาร์

จดบันทึกระดับของเหลวในหลอดควบคุมระดับความสูง ทดสอบจนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าคงที่ ทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยผลการทดลองทั้ง 3 ซ้ำจะระบุในภาคผนวก ข.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 3. 13 แผนผังการทดลองส่วนที่ 3

3.6. ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ในงานวิจัยจะทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การทดลองส่วนที่ 1 เพื่อศึกษาสมบัติของของเสียเบนโทไนท์ทางด้านความเป็นพิษ สมบัติทางกายภาพของของเสียเบนโทไนท์และดินทรายปนร่วนด้วยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analysis) และสมบัติทางเคมีของของเสียเบนโทไนท์ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ การทดลองส่วนที่ 2 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำและยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และการทดลองที่ 3 เพื่อทราบถึงพฤติกรรม

ด้านการซึมผ่านของวัสดุกันซึมจากของเสียเบนโทไนท์เมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3 - 3 ตัวแปรของการทดลองในการทำวิจัย

การทดลองที่	**2**	**3**
วัตถุประสงค์	เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำและยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที พร้อมทั้งผ่านเกณฑ์การรับแรงเฉือน และการบวมตัว	เพื่อทราบถึงพฤติกรรมด้านการซึมผ่านของวัสดุกันซึมจากของเสียเบนโทไนท์เมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ
ตัวแปรต้น	อัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 0 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง	ชนิดของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบ
ตัวแปรตาม	- กำลังต้านทานต่อแรงเฉือน - ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ - ค่าการบวมตัว	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ
ตัวแปรควบคุม	- ปริมาณรวมของตัวอย่างที่ใช้การทดลองแต่ละครั้ง - อัตราการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของ Unconfined compression test - ชนิดของน้ำชะในการทดสอบการซึมผ่าน - ระยะเวลาในการทดสอบการบวมตัว	- ปริมาณรวมของตัวอย่างที่ใช้การทดลองแต่ละครั้ง - อัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ โดยของเสียเบนโทไนท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากการขุดเจาะวางท่อบริเวณ พื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา สามารถนำเสนอผลการทำงานได้ ดังนี้

(1) ผลการวิเคราะห์ความเป็นพิษของของเสียเบนโทไนท์
(2) ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของของเสียเบนโทไนท์และดินทรายปนร่วน
(3) ผลของอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน ต่อสมบัติของวัสดุกันซึม
(4) ผลของของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึม
(5) การประเมินต้นทุนเชิงวิศวกรรม และการประยุกต์ใช้งานจริง

4.1. การทดลองที่ 1. 1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นพิษของของเสียเบนโทไนท์

องค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์จะประกอบไปด้วยเบนโทไนท์ เศษหิน ดิน ทราย และน้ำ ทั้งนี้เบนโทไนท์เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มสินแร่สเมคไตต์ (Smectite) ซึ่งพบได้ตามธรรมชาติ จึงควรมีความเป็นพิษต่ำ หรือไม่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามจากคู่มือการกำหนดรหัสสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่าของเสียเบนโทไนท์จากการขุดเจาะที่นำมาศึกษาอยู่ในกลุ่มของเสียจากการสำรวจ (Wastes resulting from exploration) ประเภทโคลนและของเสียอื่นๆ จากการขุดเจาะ (Drilling muds and other drilling wastes) ที่มีรหัสของเสีย คือ 01 05 04 ของเสียและโคลนจากการขุดเจาะที่ใช้โคลนน้ำจืด (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549) จึงจำเป็นต้องนำของเสียเบนโทไนท์มาวิเคราะห์ความเป็นพิษเสียก่อนที่จะนำไปพิจารณาการใช้ประโยชน์ต่อไป

4.1.1. การชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

การชะละลายโลหะหนักด้วยวิธีนี้เป็นไปตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมประเทศไทย พ.ศ. 2548 เพื่อประเมินความเป็นพิษของของเสียที่อาจจะชะล้างออกมา และปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน โดยข้อมูลน้ำชะละลายโลหะหนักจากของเสียเบนโทไนท์แสดงดังตารางที่ 4-1 และการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย พ.ศ. 2548 แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4 - 1 การชะละลายของโลหะหนักของของเสียเบนโทไนท์ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) เทียบกับค่ามาตรฐาน

โลหะหนัก	ตัวอย่างที่ 1 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่างที่ 1 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตัวอย่างที่ 3 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าเฉลี่ย
โครเมียม (Cr)	0.172	0.162	0.161	0.165 ± 0.006
นิกเกิล (Ni)	0.093	0.071	0.067	0.077 ± 0.014
สารหนู (As)	0.062	0.069	0.057	0.063 ± 0.006
แคดเมียม (Cd)	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025
ตะกั่ว (Pb)	< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.025

ตารางที่ 4 - 2 เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย พ.ศ. 2548

โลหะหนัก	ของเสียเบนโทไนท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (มิลลิกรัมต่อลิตร) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549)
โครเมียม (Cr)	0.165 ± 0.006	5.0
นิกเกิล (Ni)	0.077 ± 0.014	20.0
สารหนู (As)	0.063 ± 0.006	5.0
แคดเมียม (Cd)	< 0.025	1.0
ตะกั่ว (Pb)	< 0.025	5.0

จากตารางที่ 4-2 พบว่าของเสียเบนโทไนท์มีปริมาณของโครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ag) สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) เท่ากับ 0.165 ± 0.006, 0.077 ± 0.014, 0.063 ± 0.006, น้อยกว่า 0.025 และน้อยกว่า 0.025 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปริมาณโลหะหนักทุกชนิดมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

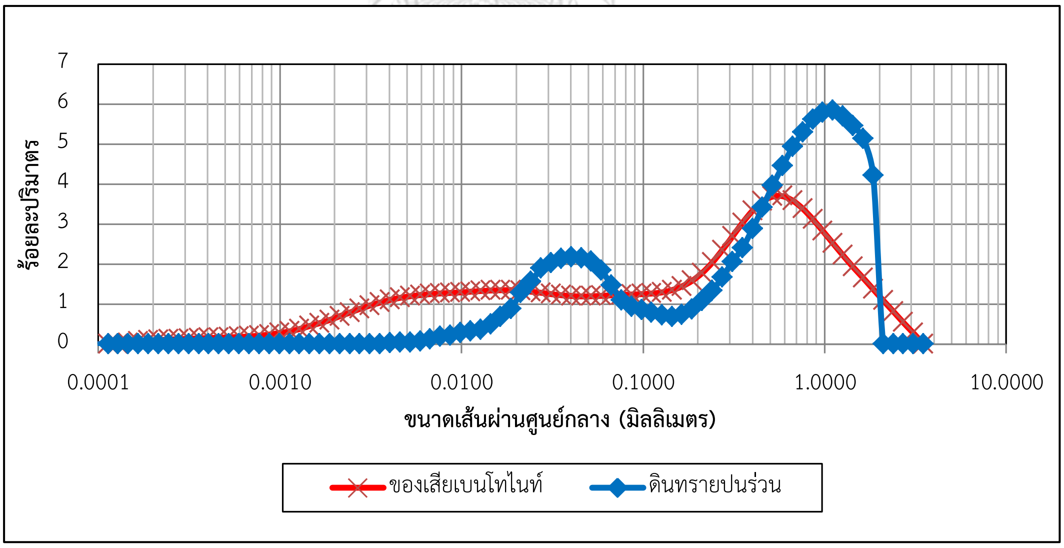
วัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549) จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่างของเสียเบนโทไนท์ที่นำมาศึกษา เป็นของเสียไม่อันตราย (Non-hazardous waste) ดังนั้นจึงสามารถนำของเสียเบนโทไนท์ที่เกิดจากการขุดเจาะวางท่อในบริเวณพื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ไปใช้เป็นสารปรับปรุงสภาพดินทรายปนร่วนเพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมได้ โดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4.2. การทดลองที่ 1. 2 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของของเสียเบนโทไนท์และดินทรายปนร่วน

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ทำเพื่อตรวจสอบลักษณะของของของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วนที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analysis) ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer

4.2.1. ขนาดอนุภาค

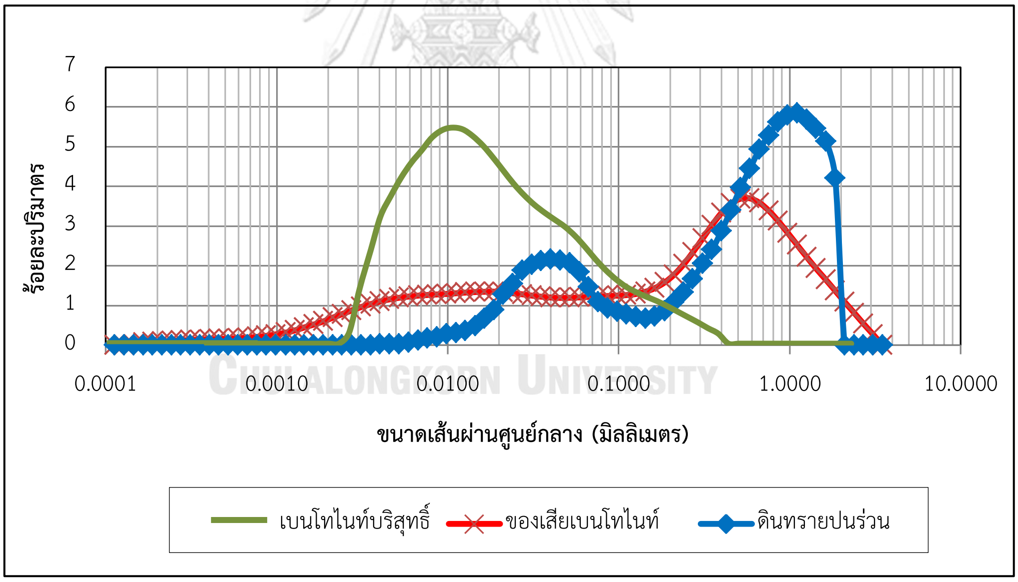
การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคถูกทดสอบเพื่อใช้เปรียบเทียบขนาดของของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4. 1 ขนาดอนุภาคของของของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วน

จากภาพที่ 4.1 พบว่ากราฟแสดงขนาดอนุภาคของของเสียเบนโทไนท์ปรากฏ peak ฐานกว้าง 1 จุด และฐานแคบ 1 จุด เนื่องจากองค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์ประกอบไปด้วยเบนโทไนท์ และเศษดินที่มาจากแนวการขุดเจาะใต้ผิวดิน โดยขนาดอนุภาคของของเสีย

เบนโทไนท์อยู่ในช่วง 0.00015 – 3.08 มิลลิเมตร (0.146 – 3080 ไมครอน) และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 0.2110 มิลลิเมตร และกราฟแสดงขนาดอนุภาคของดินทรายปนร่วนปรากฏ peak ฐานแคบขึ้น 2 จุด หมายถึง ดินทรายปนร่วนมีการกระจายขนาดของเม็ดดินไม่สม่ำเสมอ มีขนาดเม็ดขาดช่วง (Gap graded) เนื่องจากดินที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดินที่เกิดจากการผสมระหว่างดินทราย และทรายแป้งเพื่อจำลองสภาพดินให้คล้ายคลึงภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จึงทำให้ดินมีขนาดคละกันไม่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคของดินทรายปนร่วนอยู่ในช่วง 0.004 – 2 มิลลิเมตร (4.03 – 2,000 ไมครอน) และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 0.58 มิลลิเมตร (580 ไมครอน) จากผลการทดลองเพื่อหาขนาดของดินทรายปนร่วน และของเสียเบนโทไนท์พบว่าของเสียเบนโทไนท์มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 0.2110 มิลลิเมตร (211 ไมครอน) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าดินทรายปนร่วนที่มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 0.58 มิลลิเมตร (580 ไมครอน) ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอนุภาคของของเสียเบนโทไนท์จะสามารถเข้าไปในแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดินทรายปนร่วน และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคเบนโทไนท์บริสุทธิ์ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4. 2 ขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์บริสุทธิ์ ของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วน

จากภาพที่ 4.2 พบว่าเบนโทไนท์บริสุทธิ์มีขนาดอนุภาคที่เล็ก และขนาดสม่ำเสมอมากกว่าของเสียเบนโทไนท์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น โดยอนุภาคของเบนโทไนท์บริสุทธิ์จะสามารถแทรก

เข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้มากกว่าของเสียเบนโทไนท์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ไม่สามารถลงไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดินและบวมตัวได้อย่างเต็มที่

4.2.2. ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์

แอคทีฟเบนโทไนท์ (Active bentonite) คือ เบนโทไนท์ที่สามารถดูดซับน้ำได้ภายในชั้นอินเทอร์เลเยอร์เกิดเป็นความสามารถในการบวมตัว และสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเม็ดทรายด้วยการเกาะติดบนพื้นผิวของเม็ดทรายทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างเม็ดทรายส่งผลให้ทรายมีความแข็งแรง (สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2520)

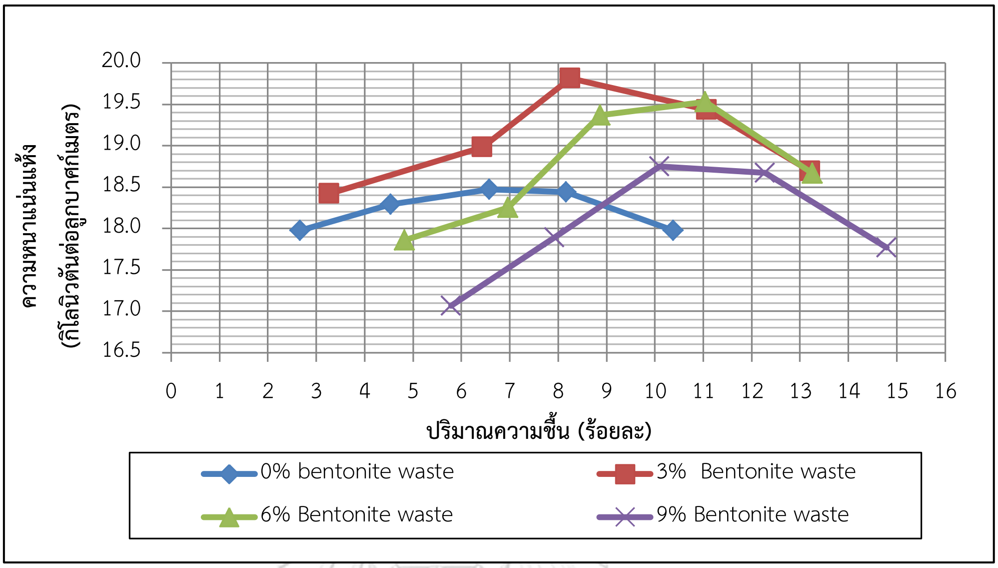
การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ ทดสอบเพื่อให้ทราบถึงปริมาณเบนโทไนท์ที่สามารถดูดซับน้ำได้ภายในชั้นอินเทอร์เลเยอร์เกิดเป็นความสามารถในการบวมตัว ซึ่งการบวมตัวเป็นสมบัติสำคัญของเบนโทไนท์ในการผลิตวัสดุกันซึม จากการทดลองพบว่าในของเสียเบนโทไนท์มีแอคทีฟเบนโทไนท์อยู่ร้อยละ 9.16 ± 0.23 โดยน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้จะนำปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ไปใช้ต่อในการทดลองต่อในส่วนที่ 2

จากการทดลองส่วนที่ 1 ทำให้ทราบว่าของเสียเบนโทไนท์ที่เกิดจากการขุดเจาะวางท่อในบริเวณพื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา เป็นของเสียไม่อันตราย(Non-hazardous waste) สามารถนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงสภาพดินทรายปนร่วนเพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมได้ และของเสียเบนโทไนท์มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าดินทรายปนร่วนทำให้สามารถแทรกไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน อีกทั้งในของเสียเบนโทไนท์มีแอคทีฟเบนโทไนท์ซึ่งเมื่อได้รับความชื้นจะสามารถบวมตัวอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน

4.3. การทดลองที่ 2 ผลของอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน ต่อสมบัติของวัสดุกันซึม

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำและยอมรับได้ ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที สามารถรับแรงเฉือนมากกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และมีการบวมตัวที่ต่ำกว่าร้อยละ 4 ของความสูงเดิม โดยก่อนที่จะทำการทดลองในส่วนที่ 2 นั้น จะต้องทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor) เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum

moisture content - OMC) ของแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน โดยจะนำค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength) ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และทดสอบการบวมตัว (Swelling) ในหัวข้อถัดไป โดยผลการทดลองการบดอัดแบบมาตรฐานแสดงดังภาพที่ 4.3 และตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และความหนาแน่นแห้งของอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และความหนาแน่นแห้งในภาพที่ 4.3 จะพบว่ากราฟของแต่ละอัตราส่วนผสมมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ เนื่องจากที่ปริมาณความชื้นต่ำโครงสร้างของดินจะจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก ความหนาแน่นแห้งของดินจึงมีค่าต่ำ การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทนที่ส่วนที่เป็นอากาศภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินและทำหน้าเป็นสารหล่อลื่น เพื่อให้เม็ดดินมีการเลื่อนตัวเข้ามาชิดกันและจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นเป็นผลทำให้การบดอัดดินทำได้ง่าย ความหนาแน่นแห้งจึงมีแนวโน้มที่สูงขึ้น และเมื่อโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างเม็ดดินจนเต็มจะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) โดยปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินมีความหนาแน่นสูงสุด คือ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นมากยิ่งขึ้น โมเลกุลของน้ำจะไปเคลือบรอบๆ เม็ดดิน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างเม็ดดินลดลงส่งผลให้เม็ดดินแยกตัวห่างจากกัน อีกทั้งการเพิ่มปริมาณความชื้นก็เป็นการเพิ่มสัดส่วนของน้ำในระบบรวมของดินและน้ำ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าที่ลดต่ำลง (มณเฑียร กังศศิเทียม, 2529a; มานิต ช่วยงาน, 2552b)

ตารางที่ 4 - 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม

อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน (ร้อยละ)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)
0	7.4 ± 0.4	18.50 ± 0.26
3	8.5 ± 0.3	19.85 ± 0.23
6	10.3 ± 0.7	19.65 ± 0.13
9	11.0 ± 0.3	18.88 ± 0.30

จากตารางที่ 4 - 3 พบว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.4 ± 0.4, 8.5 ± 0.3, 10.3 ± 0.7 และ 11.0 ± 0.3 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์จากร้อยละ 0 เป็น 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ เนื่องจากเบนโทไนท์มีสมบัติด้านการดูดซับที่ดีจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นผลึกเป็นแรงแวนเดอวาลส์ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นได้ ดังนั้นยิ่งเพิ่มอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์จะทำให้วัสดุกันซึมสามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rakshit และ Pal (2015) ที่นำเบนโทไนท์บริสุทธิ์มาปรับปรุงสภาพดินเหนียวปนทรายแป้งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์จากร้อยละ 60 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นร้อยละ 70 , 80 , 90 และ 100 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 21.0 เป็น 23.1 , 29.0 , 32.4 และ 33.5 ตามลำดับ และงานวิจัยของ Sobti และ Singh (2017) ที่นำเบนโทไนท์บริสุทธิ์มาปรับปรุงดินทรายพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนท์จากร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นร้อยละ 10 , 15 , 20 และ 25 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.40 เป็น 15.32 , 15.36 , 15.60 และ 15.80 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในแต่ละอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองมีค่าต่างกันถึงแม้จะต่างกันไม่มาก แต่ในการใช้งานภาคสนามจริงอาจจะมีการใช้น้ำที่มากหากปริมาณดินในพื้นที่ก่อสร้างมีมาก

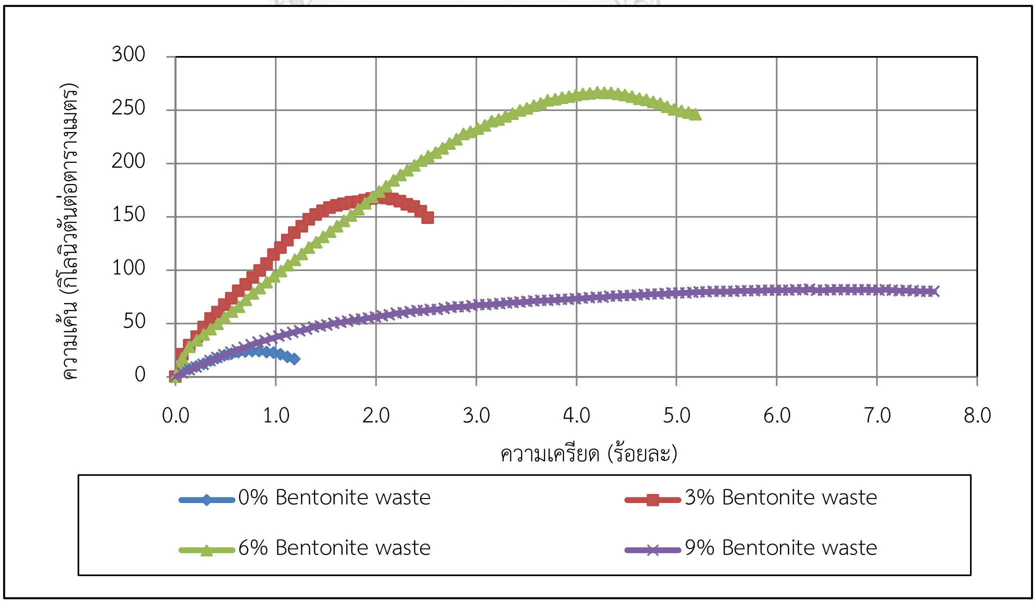
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density) จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจาก 18.50 ± 0.26 เป็น 19.85 ± 0.23 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากเบนโทไนท์มีสมบัติเป็นตัวประสาน (Binder) ทำหน้าที่เป็นกาวประสานให้อนุภาคของเม็ดดินทรายปนร่วนชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของดินบดอัดมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ใน

ของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าลดลงเป็น 19.65 ± 0.13 และ 18.88 ± 0.30 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เนื่องจากเบนโทไนท์มีสมบัติการดูดซับที่ดี ดังนั้นเมื่อมีปริมาณของเบนโทไนท์เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้มีการดูดซับน้ำไปแทรกในของผสมมากเกินไป ปริมาณของดินแห้งต่อปริมาตรจึงมีค่าที่ลดลง ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจึงมีค่าที่ลดต่ำลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Proia และคณะ, 2016; Shaker และ Elkady, 2016; Srikanth และ Mishra, 2016)

จากการทดสอบการบดอัดจะได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในของแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างต่อไป

4.3.1. กำลังต้านทานต่อแรงเฉือน

การทดสอบกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนมีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาสมบัติด้านกำลังของวัสดุกันซึม เนื่องจากในขั้นตอนการก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะจะมีการใช้รถบรรทุก และรถบดดินในการขนย้ายอุปกรณ์ และบดอัดดินให้แน่น ดังนั้นวัสดุกันซึมที่ใช้ในหลุมฝังกลบจะต้องสามารถรับน้ำหนักที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ในขั้นตอนการก่อสร้าง โดยกำหนดค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินบดอัดสำหรับเป็นวัสดุกันซึมไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (Daniel และ Wu, 1993) ซึ่งผลการทดสอบกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนแสดงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4. 4 กำลังต้านทานแรงเฉือนของแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

จากภาพที่ 4.4 แสดงกำลังต้านทานแรงเฉือนของแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน โดยแกน x เป็นค่าความเค้น หรือกำลังต้านทานต่อแรงเฉือน และแกน y เป็นค่าค่าความเครียด หรือ การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ พบว่าค่าความเค้นหรือกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 26.10 $\pm$ 2.28 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เนื่องจากดินทรายปนร่วนไม่มีแรงยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน จึงทำให้มีกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 3 และ 6 โดยน้ำหนักแห้งจะพบว่าวัสดุมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเป็น 171.58 $\pm$ 13.78 และ 269.69 $\pm$ 27.31 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของเบนโทไนท์ซึ่งมีขนาดเล็กจะไปแทรกเติมเต็มในช่องว่างระหว่างเม็ดดินทรายปนร่วนทำให้ปริมาตรของอากาศในช่องว่างลดลง และอนุภาคเบนโทไนท์ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้อนุภาคเม็ดดินเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกัน ดังนั้นเมื่อนำมาบดอัดดินจึงมีลักษณะที่แน่นขึ้นส่งผลให้ค่าความเค้นมีแนวโน้มที่สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ค่าความเค้นจะลดลงเป็น 83.02 $\pm$ 3.37 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เนื่องจากภายในของผสมมีอนุภาคเบนโทไนท์อยู่มาก ทำให้มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงซึ่งโมเลกุลของน้ำจะเป็นสารหล่อลื่นระหว่างเม็ดดิน ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินลดลง ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือนจึงมีค่าที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Vangpaisal และ Sangtian, 2010) และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chalermyanont และ Arrykul (2005) ที่มีการใช้เบนโทไนท์บริสุทธิ์มาปรับสภาพดินทรายพบว่าเมื่อผสมเบนโทไนท์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าที่ลดลงจาก 19.47 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เป็น 19.35 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการใช้ของเสียเบนโทไนท์ปรับปรุงดินทรายปนร่วนที่อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากองค์ประกอบของของเสียเบนโทไนท์จะประกอบไปด้วยเบนโทไนท์ เศษหิน ดิน ทราย ที่มีขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันจะสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเม็ดดินทรายปนร่วนทำให้เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุ

ค่าความเครียด หรือการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุกันซึมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากอนุภาคเบนโทไนท์มีสภาพเป็นพลาสติก (Plasticity) คือ มีความยืดหยุ่น และความเหนียวภายตัวเอง ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์จะเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่น และ

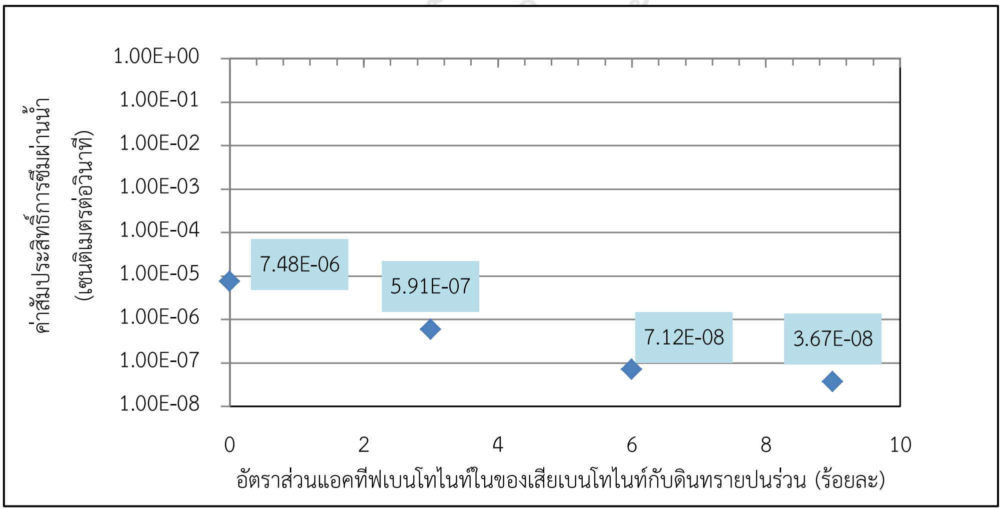
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความเหนียวให้กับวัสดุ ทำให้วัสดุกันซึมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่อการให้แรงที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Chalermyanont และ Arrykul, 2005)

จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนพบว่าอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ผ่านเกณฑ์ด้านกำลังรับแรงเฉือน ที่กำหนดค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินบดอัดสำหรับเป็นวัสดุกันซึมไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (Daniel และ Wu, 1993)

4.3.2. ความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำ

การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านน้ำ มีจุดประสงค์เพื่อหาความสามารถด้านกันซึมของวัสดุกันซึมในแต่ละอัตราส่วนผสม ซึ่งเป็นสมบัติที่มีความสำคัญที่สุดของการผลิตวัสดุกันซึม โดยการทดลองนี้จะสอดคล้องกับขั้นตอนการดำเนินงานของหลุมฝังกลบขยะที่วัสดุกันซึมต้องสัมผัสกับของเหลว โดยในหัวข้อการทดลองนี้จะใช้น้ำปราศจากไอออน (DI water) อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวที่ใช้ในการทดลอง เพื่อนำค่าที่ได้มาเป็นค่าอ้างอิงและเปรียบเทียบกับสมบัติกันซึมของวัสดุเมื่อสัมผัสของเหลวแบบอื่นๆ ซึ่งจะทำการทดลองในตอนที่ 3 โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่ได้ของแต่ละอัตราส่วนผสมวัสดุกันซึมจะเป็นค่าคงที่สุดท้ายของแต่ละการทดลอง ทั้งนี้ผลการทดลองความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำโดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำชะ แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ และอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

จากภาพที่ 4.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ และอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนจากร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้งเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีอัตราการลดลงอย่างชัดเจน จาก 7.48×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที เป็น 5.91×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที เนื่องจากเบนโทไนท์เป็นอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และมีสมบัติการบวมตัวหลังจากได้รับความชื้น เบนโทไนท์จึงสามารถเข้าไปอุดช่องว่างภายในระหว่างเม็ดดินทรายปนร่วน ทำให้ลดเส้นทางการไหลของน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจึงมีค่าที่ต่ำลง แต่ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำยังมีค่าที่มากกว่ามาตรฐานของ U.S.EPA และกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดช่วงยอมรับได้ไม่เกิน 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าที่ต่ำลง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 7.12×10^{-8} และ 3.67×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของแอคทีฟเบนโทไนท์ที่ไปอุดช่องว่างภายในระหว่างเม็ดดินทรายปนร่วนมีเพียงพอต่อการบวมตัวเพื่อลดเส้นทางการไหลของน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Gueddouda และคณะ, 2008; Ojuri และ Oluwatuyi, 2017; Rakshit และ Pal, 2015) และอัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแต่ละอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4 - 4 อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในแต่ละอัตราส่วน

อัตราส่วนผสมเดิม	อัตราส่วนผสมใหม่	อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เท่า)
อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง	อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง	12.65
อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง	อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง	8.30
อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง	อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง	1.94

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4 - 4 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนจากร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีอัตราการลดลง 12.65 เท่า แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนเป็นร้อยละ 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีอัตราการลดลง 8.30 และ 1.94 เท่า ตามลำดับ จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนที่มากขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมีอัตราการลดที่ต่ำลง เนื่องจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีเบนโทไนท์เพียงพอสำหรับการอุดช่องว่าง ดังนั้นการใส่เบนโทไนท์ที่มากเกินไปจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านกันซึมที่จะสูงขึ้น และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chalermyanont และ Arrykul (2005) ที่มีการใช้เบนโทไนท์บริสุทธิ์มาปรับสภาพดินทรายพบว่าเมื่อผสมเบนโทไนท์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะลดลงจาก 3.6×10^{-5} เซนติเมตรต่อ เป็น 5.13×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที โดยอัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านลดลงเป็น 700 เท่า ซึ่งมีค่ามากกว่าการใช้ของเสียเบนโทไนท์ปรับปรุงดินทรายปนร่วนที่อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากเบนโทไนท์บริสุทธิ์มีขนาดอนุภาคแอคทีฟเบนโทไนท์ที่เล็ก และขนาดสม่ำเสมอมากกว่าในของเสียเบนโทไนท์ที่มีลักษณะแอคทีฟเบนโทไนท์เป็นแผ่น โดยอนุภาคของแอคทีฟเบนโทไนท์ในเบนโทไนท์บริสุทธิ์จะสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้มากกว่าแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ไม่สามารถลงไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และด้วยสมบัติการบวมตัวของเบนโทไนท์ทำให้เบนโทไนท์บริสุทธิ์มีประสิทธิภาพการบวมตัวในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้เต็มที่มากกว่าของเสียเบนโทไนท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

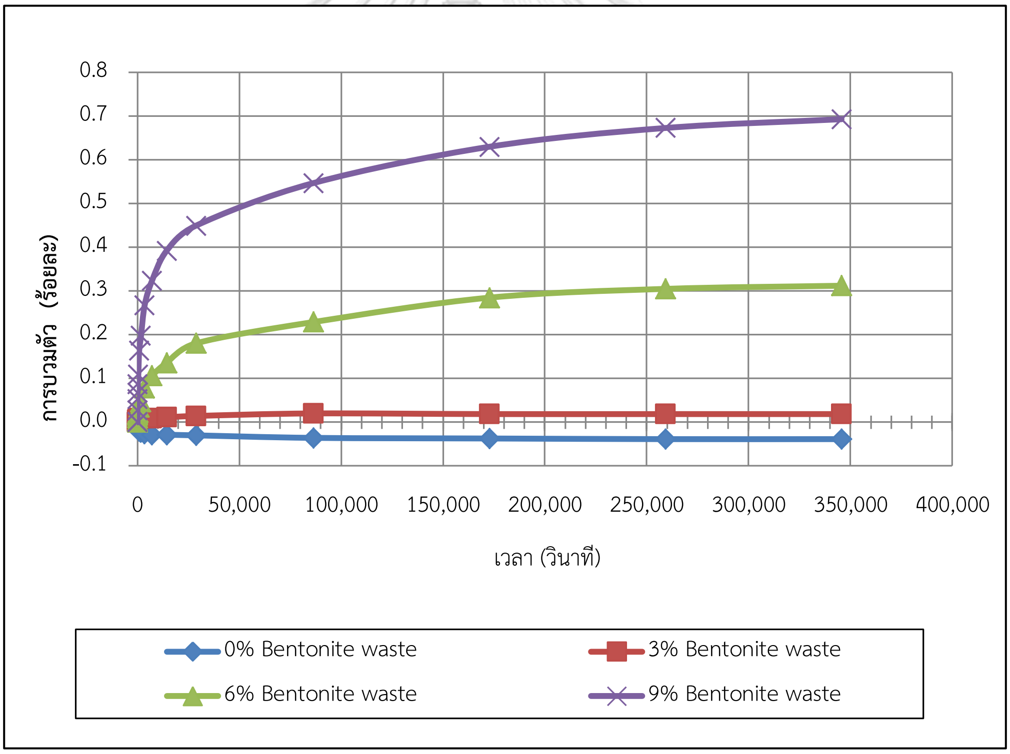
ถ้าในกรณีที่ดินเดิมมีการซึมผ่านสูงกว่าดินทรายปนร่วนที่ใช้ในงานวิจัย จะต้องมีการเติมเบนโทไนท์บริสุทธิ์เข้าไปผสมเพื่อช่วยสมบัติด้านการซึมผ่าน แต่หากมีของเสียเบนโทไนท์อยู่ก็จะเป็นการลดปริมาณเบนโทไนท์บริสุทธิ์ ทั้งนี้ถ้าการซึมผ่านของดินเดิมสูงกว่าทราย ($k= 10^{-1}$ ถึง 10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที) (Geotechnical Engineering Laboratory - University of at Arlington, 2008) ไม่ควรที่จะใช้พื้นที่นั้นทำหลุมฝังกลบขยะให้เปลี่ยนพื้นที่ที่จะใช้ในการก่อสร้าง

จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านพบว่าอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ผ่านเกณฑ์ มาตรฐานการออกแบบวัสดุกันซึมของ U.S.EPA ค.ศ. 1993 และมาตรฐานการจัดการ

ขยะมูลฝอยชุมชนที่จัดทำโดยกรมควบคุมมลพิษ พ.ศ. 2544 ที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำยอมรับได้ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที

4.3.3. การบวมตัว

การทดสอบการบวมตัวมีจุดประสงค์เพื่อดูการขยายตัวเชิงปริมาตรของวัสดุกันซึมเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ถูกแช่ในน้ำ ซึ่งเป็นสภาวะที่จะพบได้ในหลุมฝังกลบที่ดำเนินงานแล้ว โดยกำหนดค่าการบวมตัวไม่ควรมีค่าสูงกว่าร้อยละ 4 ของความสูงเดิม (กรมทางหลวง, 2532) เนื่องจากการบวมตัวของดินจะส่งผลกระทบต่อการวางระบบท่อในหลุมฝังกลบ สามารถทำให้ระบบท่อรวบรวมก๊าซ และน้ำชะขยะแตกหักจนทำให้หลุมฝังกลบขยะไม่สามารถดำเนินการได้อย่างถูกหลักวิชาการ โดยผลการทดสอบการบวมตัวแสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4. 6 การบวมตัวของดินแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

จากภาพที่ 4.6 พบว่ากราฟการบวมตัวของอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้งมีการหดตัวของตัวอย่างดินอยู่ที่ร้อยละ 0.039 $\pm$ 0.004 ของความสูงเดิม เนื่องจากดินทรายปนร่วนไม่มีแรงยึดเกาะกันระหว่างเม็ดดิน (Cohesionless soils ทำให้เมื่อนำตัวอย่างดินไปทดสอบด้วยการแช่น้ำและวางแผ่นถ่วงน้ำหนัก 4.4 กิโลกรัม ไว้ด้านบน ตัวอย่างดินจะเกิดการทรุดตัว แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์เป็นร้อยละ 3 6 และ 9 โดยน้ำหนัก การบวมตัวของดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.019 $\pm$ 0.002, 0.312 $\pm$ 0.021 และ 0.693 $\pm$ 0.022 ของความสูงเดิม ตามลำดับ เนื่องจากเบนโทไนท์มีลักษณะเป็นผลึกแผ่นเล็กบาง มีพื้นที่ผิวมากซึ่งที่บริเวณพื้นผิวของเบนโทไนท์จะมีแรงดึงดูดระหว่างประจุลบของเบนโทไนท์ และประจุบวกต่างๆ เช่นโมเลกุลของน้ำ เข้าไปแทรกระหว่างชั้นผลึกจนเกิดการบวมตัวของผลึก ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์จะทำให้วัสดุกันซึมมีการบวมตัวที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Chalermyanont และ Arrykul, 2005; Fattah และ Lame, 2016; Sudjianto และคณะ, 2011)

จากการทดสอบการบวมตัวพบว่าอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 0 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ผ่านเกณฑ์ด้านการบวมตัวที่กำหนดค่าการบวมตัวไม่ควรมีค่าสูงกว่าร้อยละ 4 (กรมทางหลวง, 2532)

ในการทดลองส่วนที่ 2 มีการทดสอบสมบัติต่างๆ ของวัสดุกันซึม คือ การทดสอบกำลังต้านทานต่อแรงเฉือน ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ และทดสอบการบวมตัว แต่สมบัติที่มีความสำคัญที่สุดของการผลิตวัสดุกันซึม คือ สมบัติด้านกันซึม เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการใช้งานวัสดุกันซึม คือ ชะลอการไหลซึมของน้ำชะขยะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ดังนั้นจากผลการทดลองในส่วนที่ 2 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า อัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตวัสดุกันซึม เนื่องจากค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำและยอมรับได้ ไม่เกิน 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที สามารถรับแรงเฉือนมากกว่า 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และมีการบวมตัวที่ต่ำกว่าร้อยละ 4 ของความสูงเดิม ทั้งนี้จะนำอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ไปทดลองต่อในส่วนการทดลองที่ 3

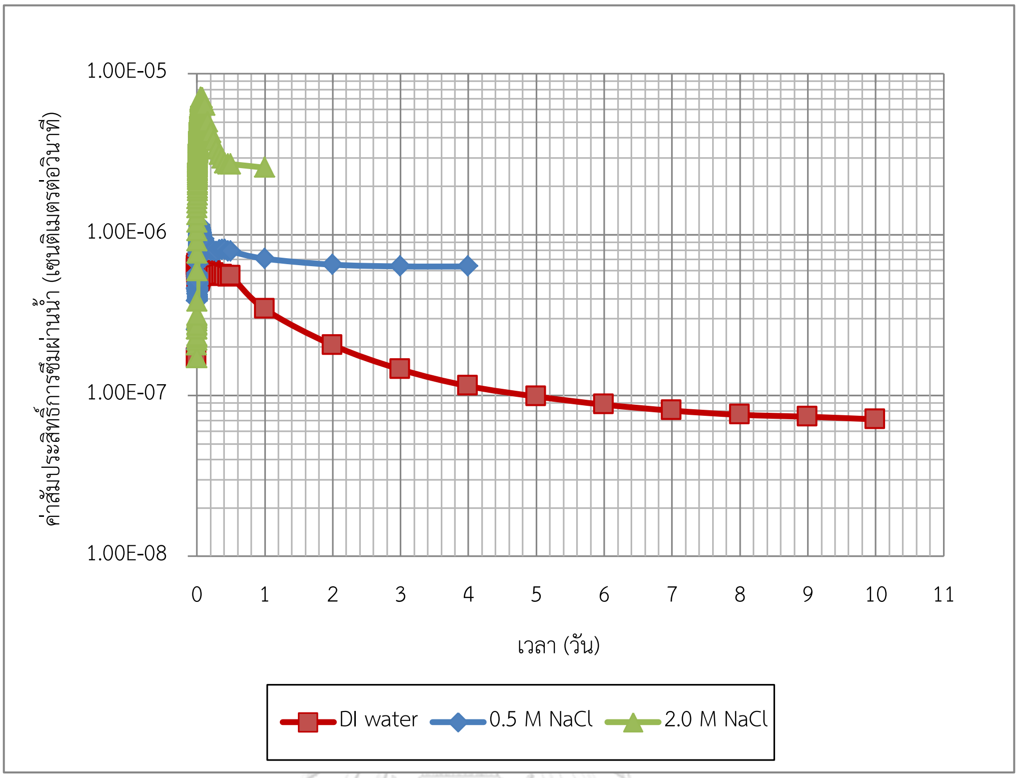
4.4. การทดลองที่ 3 ผลของของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะต่อค่าสัมประสิทธ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึม

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อทราบถึงพฤติกรรมด้านการซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ของเหลวในการทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่าน 3 ประเภท คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นจะนำค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำชะละลาย

4.4.1. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

การทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นน้ำชะละลาย ใช้เป็นตัวแทนของเกลืออนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่พบได้ในน้ำชะขยะชุมชน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่กล่าวไว้ว่าน้ำชะขยะชุมชนโดยทั่วไปไม่ได้มีองค์ประกอบเฉพาะอินทรีย์วัตถุ แต่ยังประกอบไปด้วยเกลืออนินทรีย์ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการทางชีวภาพ เช่น กระบวนการย่อยโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ทั้งนี้เกลือที่พบจะมีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียม 10,930 มิลลิกรัมต่อลิตร โพแทสเซียม 2,243 มิลลิกรัมต่อลิตร และแอมโมเนียม 13,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น (Ogata และคณะ, 2016) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ ซึ่งเท่ากับ 29,220 และ 116,880 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรดและด่างเท่ากับ 7.57 $\pm$ 0.02 และ 7.43 $\pm$ 0.02 ตามลำดับ มาใช้ทดลองการไหลซึมผ่านวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4. 7 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นน้ำชะละลาย

จากภาพที่ 4.7 เป็นกราฟแบบ semi log-scale แสดงถึงความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส เป็นน้ำชะละลาย เปรียบเทียบกับการใช้น้ำปราศจากไอออน (DI water) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส เป็นน้ำชะละลาย พบว่าในช่วงเริ่มต้นการทดลองประมาณ 0 – 10 ชั่วโมง วัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออน และวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างจากวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในช่วงการทดลองเริ่มต้นที่สูง และเมื่อระยะเวลาการทดลองผ่านไปวัสดุกันซึมในแต่สภาวะการทดลองจะมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดต่ำลง จนถึงช่วงระยะเวลาหนึ่งที่วัสดุกันซึมทั้ง 3 สภาวะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่โดยวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ และน้ำปราศจากไอออน จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป 1 , 4 และ 8 วัน ตามลำดับ

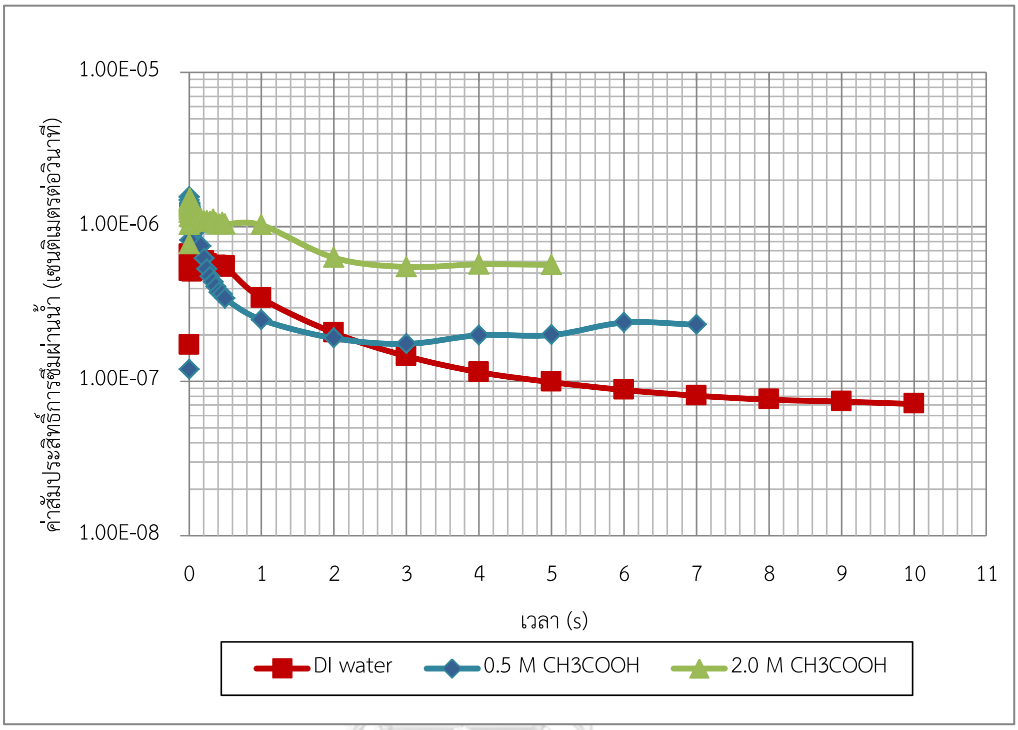
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อไหลผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออนจะมีค่าเท่ากับ 7.12×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที แต่เมื่อมีการไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นเป็น 6.35×10^{-7} และ 2.61×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงชนิดของเหลวภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดิน เมื่อเปรียบเทียบค่าความแรงไอออน (Ionic strength) ของน้ำปราศจากไอออน กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าน้ำปราศจากไอออนมีค่าความแรงไอออนต่ำจนไม่สามารถวัดได้ (Halis และคณะ, 2014) ส่วนสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ มีค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.5 และ 2.0 โมลาร์ ตามลำดับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนโซเดียม (Na^{+}) ที่ละลายในของเหลวมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่ผิวของอนุภาคเบนโทไนท์มีประจุลบจึงดึงดูดประจุบวกที่ละลายอยู่ในของเหลวให้เข้าใกล้บริเวณผิวของอนุภาค ยิ่งสารละลายมีประจุบวกมากจะยิ่งเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุลบที่บริเวณผิวกับประจุบวกในสารละลายมาก ส่งผลให้ความหนาชั้นน้ำรอบอนุภาค (Diffuse double layer) ลดลง อนุภาคของเบนโทไนท์จะจับตัวกันเป็นก้อน (Flocculation) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ลดต่ำลงอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว (Diffuse double layer) จะลดต่ำลงมากกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Shariatmadari และคณะ, 2011; SHIRAZI และคณะ, 2011; Yılmaz และคณะ, 2008)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.2. สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH)

การทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมโดยใช้สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) เป็นน้ำชะละลาย เป็นการจำลองกรดอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำชะขยะชุมชนจากงานวิจัยของ Umar และคณะ (2010) พบว่าค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของน้ำชะของขยะใหม่มีค่าน้อยกว่า 6.5 เนื่องจากความเข้มข้นของกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile fatty acids - VFAs) ที่มีค่าสูง และค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) น้ำชะของขยะเก่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 7.5 – 9 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) ที่มีความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ ซึ่งเท่ากับ 30,000 และ 120,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเป็นกรด และด่างเท่ากับ 2.78 ± 0.02 และ 2.53 ± 0.02 ตามลำดับ เพื่อเป็นตัวแทนของน้ำชะของขยะใหม่นำมาใช้ทดลอง

การไหลซึมผ่านวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4. 8 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกเป็นน้ำชะละลาย

จากภาพที่ 4.8 เป็นกราฟแบบ semi log-scale แสดงถึงความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส เป็นน้ำชะละลายเปรียบเทียบกับการใช้น้ำปราศจากไอออน (DI water) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส เป็นน้ำชะละลาย พบว่าในช่วงระยะการทดลอง 0 – 15 ชั่วโมง วัสดุกันซึมที่อยู่ใน 3 สภาวะการทดลอง คือ วัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออน วัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ จะยังมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่แปรปรวนอยู่ ในช่วงการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป 15 ชั่วโมง – 3 วัน จะเป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละสภาวะมีการลดลงอย่างชัดเจน อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส จนถึงช่วงระยะเวลาหนึ่งที่วัสดุกันซึมทั้ง 3 สภาวะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่โดยวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 2.0 โมลาร์ สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และน้ำปราศจากไอออน จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงการทดลองเมื่อเวลา

ผ่านไป 3 , 4 และ 8 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มการใช้เวลาในการทดลองเพื่อให้ได้ค่าคงที่ที่นานกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์

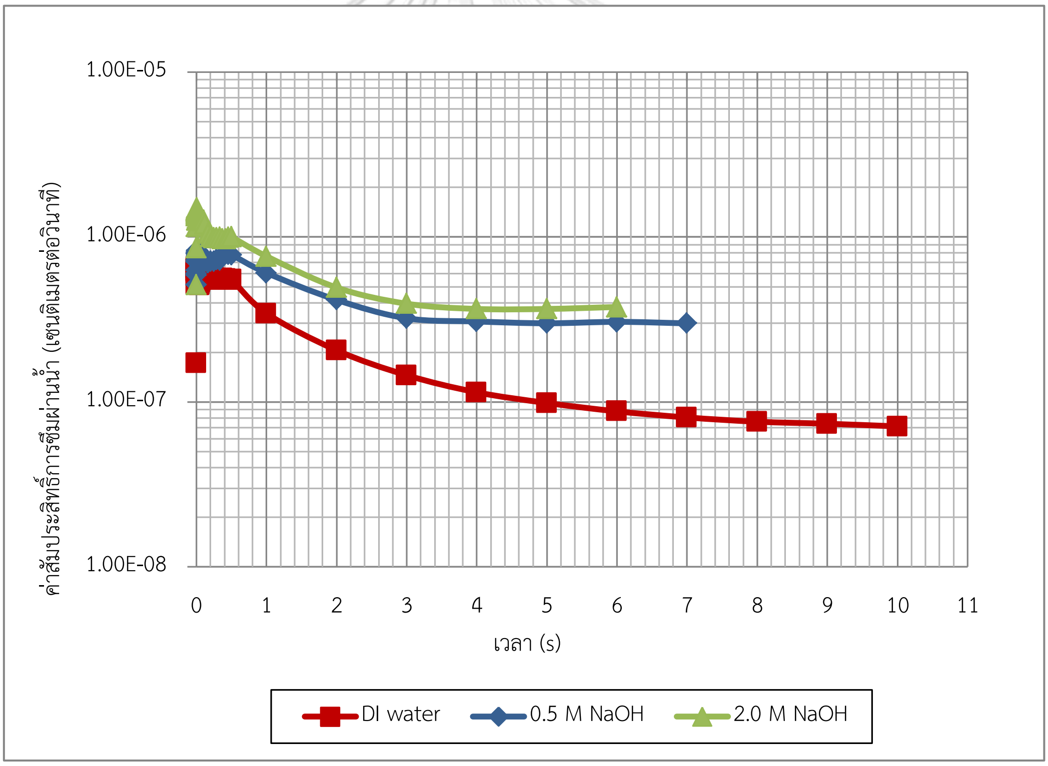
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อไหลผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออนจะมีค่าเท่ากับ 7.12 $\times 10^{-8}$ เซนติเมตรต่อวินาที แต่เมื่อมีการไหลผ่านด้วยสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นเป็น 2.32 $\times 10^{-7}$ และ 5.68 $\times 10^{-7}$ เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายกรดอะซิติกเป็นกรดสามารถแตกตัวให้โปรตอน (H^{+}) ซึ่งเป็นประจุบวกละลายในของเหลวได้ เนื่องจากที่ผิวของอนุภาคเบนโทไนท์มีประจุลบจึงดึงดูดประจุบวกที่ละลายอยู่ในของเหลวให้เข้าใกล้บริเวณผิวของอนุภาค ส่งผลให้ความหนาชั้นน้ำรอบอนุภาค (Diffuse double layer) ลดลง อนุภาคของเบนโทไนท์จะจับตัวกันเป็นก้อน (Flocculation) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการใช้สารละลายกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่ลดต่ำลงอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว (Diffuse double layer) จะลดต่ำลงมากกว่าการใช้สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Aldaeef และ Rayhani, 2014; Hamdi และ Srasra, 2013)

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายกรดอะซิติกมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากกรดอะซิติกเป็นกรดอ่อนไม่สามารถแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ สามารถแตกตัวได้เป็นไอออนแค่บางส่วน โดยสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ สามารถแตกตัวให้โปรตอน (H^{+}) ที่มีความเข้มข้น 0.003 และ 0.006 โมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าที่น้อยกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ดังนั้นการใช้สารละลายกรดอะซิติกจะให้ความหนาชั้นน้ำรอบอนุภาค (Diffuse double layer) ที่สูงกว่า และการหดตัวเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีค่าน้อยกว่าส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าต่ำกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นน้ำชะละลาย เป็นการจำลองน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบที่มีการฝังกลบเถ้าลอย เถ้าหนัก และกากขี้เถ้า ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาไหม้ในโรงไฟฟ้าถ่านหิน และเตาเผาขยะชุมชน จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของน้ำชะละลายเถ้าดังกล่าวมีค่ามากกว่า 12.0 (Keppert และคณะ, 2012; Roy และ Berger, 2011) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ ซึ่งเท่ากับ 20,000 และ 80,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเป็นกรดและด่างเท่ากับ 12.44 $\pm$ 0.01 และ 13.10 $\pm$ 0.02 ตามลำดับ นำมาใช้ทดลองการไหลซึมผ่านวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4. 9 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นน้ำชะละลาย

จากภาพที่ 4.9 เป็นกราฟแบบ semi log-scale แสดงถึงความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส เป็นน้ำชะละลาย เปรียบเทียบกับการใช้น้ำปราศจากไอออน (DI water) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 30 – 31 องศาเซลเซียส เป็นน้ำชะละลาย พบว่าในช่วงระยะการทดลอง 0 – 15 ชั่วโมง วัสดุกันซึมที่อยู่ใน 3 สภาวะการทดลอง คือ วัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออน วัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ และวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ จะยังมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่กวัดแกว่งอยู่ในช่วงการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป 15 ชั่วโมง – 3 วัน จะเป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละสภาวะมีการลดลงอย่างชัดเจน และวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ส่วนวัสดุกันซึมที่ไหลผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออนจะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป 8 วัน ซึ่งมีแนวโน้มการใช้เวลาในการทดลองเพื่อให้ได้ค่าคงที่ใกล้เคียงกับการใช้สารละลายกรดอะซิติก

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อไหลผ่านด้วยน้ำปราศจากไอออนจะมีค่าเท่ากับ 7.12×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที แต่เมื่อมีการไหลผ่านด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 และ 2.0 โมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นเป็น 3.06×10^{-7} และ 3.77×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำปราศจากไอออน เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปละลายแผ่นซิลิกา (Silica tetrahedral - SiO_2) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างเบนโทไนท์ ทำให้โครงสร้างผลึกของเบนโทไนท์เกิดความเสียหาย ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบวมตัวของเบนโทไนท์ที่ไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และลดเส้นทางการไหลของของเหลวมีค่าลดต่ำลง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจึงมีค่าที่เพิ่มที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fernández และคณะ (2009)

เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ มีค่าความเป็นกรดและด่างเท่ากับ 13.10 ± 0.02 และจากงานวิจัยของ Anh และคณะ (2017) กล่าวไว้ว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าความเป็นกรดและด่างมากกว่า 13 จะทำให้โซเดียมเบนโทไนท์เกิดการชะละลายของชั้นซิลิกา และ

ตกตะกอนของแร่ธาตุบางชนิด เช่น Anorthite ร่วมด้วย ดังนั้นเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ในการทดลองจะเกิดการชะละลายของชั้นซิลิกา ร่วมด้วยกับการตกตะกอนของแร่ธาตุบางชนิดไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์

ในการทดลองส่วนที่ 3 ทดสอบเพื่อทราบถึงพฤติกรรมด้านการซึมผ่านของวัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้งเมื่อสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ โดยพบว่าของเหลวที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมากที่สุด โดยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออน คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ รองลงมาเป็น สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ และสารละลายกรดอะซิติก

4.5. การประเมินต้นทุนเชิงวิศวกรรม และการประยุกต์ใช้งานจริง

4.5.1. การประเมินต้นทุนเชิงวิศวกรรม

การกำจัดของเสียเบนโทไนท์ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะนำไปถมในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาตหรือปฏิบัติตามข้อตกลงกับเจ้าของที่ดินที่ยินยอมให้ใช้ ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน เช่น ค่าขนส่งของเสีย และค่าเช่าพื้นที่ถมดิน เป็นต้น

(1) ค่าขนส่งของเสียจากแหล่งกำเนิดของเสียเบนโทไนท์ไปยังพื้นที่ถมดินราคาประมาณ 500 บาทต่อเที่ยวในระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร ซึ่งใน 1 เที่ยวการขนส่งจะสามารถกำจัดของเสียเบนโทไนท์ได้ 7,000 ลิตร หรือเท่ากับ 10 ตันต่อเที่ยว ดังนั้นหน่วยงานขุดเจาะใต้ผิวดินจะเสียค่าขนส่ง 50 บาทต่อตันของเสียเบนโทไนท์

(2) ค่าเช่าพื้นที่ถมดินประมาณ 18,000 บาทต่อปี ซึ่งตามระยะเวลาการขุดเจาะใต้ผิวดินใช้เวลาประมาณ 2 ปี คิดเป็นค่าเช่าพื้นที่ถมดินรวม 36,000 บาทต่อโครงการการขุดเจาะ และปริมาณของเสียเบนโทไนท์ตลอดทั้งโครงการมีประมาณ 900,000 ลิตร หรือเท่ากับ 1,170 ตัน ดังนั้นหน่วยงานขุดเจาะใต้ผิวดินจะเสียค่าเช่าพื้นที่ถมดิน 30.75 บาทต่อตันของเสียเบนโทไนท์

จากข้อมูลข้างต้นถ้านำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุกันซึมแทนการนำไปถมในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาต หน่วยงานขุดเจาะใต้ผิวดินจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเบนโทไนท์ไป 80.36 บาทต่อตันของเสียเบนโทไนท์ ดังนั้นตลอดทั้งโครงการการขุดเจาะใต้ผิวดินจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเบนโทไนท์ 94,477.50 บาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับการนำของเสียเบนโทไนท์ไปใช้ประโยชน์ในหลุมฝังกลบขยะจะต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งจากแหล่งกำเนิดของเสียเบนโทไนท์ไปยังพื้นที่หลุมฝังกลบที่จะทำการก่อสร้าง แต่เนื่องจากของเสียเบนโทไนท์มีน้ำหนักดังนั้นการนำไปใช้จะต้องอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงจึงควรใช้ระยะเดียวกันกับค่าขนส่งของเสียจากแหล่งกำเนิดของเสียเบนโทไนท์ไปยังพื้นที่ถมดิน ดังนั้นหน่วยงานที่ก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะจะเสียค่าขนส่งของเสียเบนโทไนท์มายังพื้นที่หลุมฝังกลบขยะ 50 บาทต่อตันของเสียเบนโทไนท์

4.5.2. การประยุกต์ใช้งานจริง

งานวิจัยนี้เป็นการดำเนินการระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นเมื่อนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุกันซึมสำหรับพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นดินทรายปนร่วนในระดับการใช้งานจริง จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมของเสียเบนโทไนท์

หลังจากการขุดเจาะใต้ผิวดินจะเกิดของเสียเบนโทไนท์ ให้นำของเสียเบนโทไนท์ไปรีดน้ำ (Dewatering) ด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้เครื่องอัดกรอง (Filter press) เครื่องกรองหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) และการผึ่งให้แห้งในอากาศ (Air dry) เพื่อแยกน้ำออกไปจากของเสียเบนโทไนท์ให้ได้มากที่สุด แต่ในการทำงานภาคสนามจริงจะต้องคำนึงถึงต้นทุนในการใช้งานโดยถ้านำของเสียเบนโทไนท์มาอบด้วยการใช้ความร้อน บดให้ของเสียเบนโทไนท์มีขนาดเล็ก และแยกเบนโทไนท์ออกจากเศษหิน ดิน และทรายด้วยการร่อนผ่านตะแกรงจะเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมาก ดังนั้นควรที่จะนำของเสียเบนโทไนท์มาผึ่งให้แห้งในอากาศโดยจะนำของเสียเบนโทไนท์มาวางผึ่งในบริเวณด้านข้างของพื้นที่หลุมฝังกลบขยะเพื่อเตรียมพร้อมในการผสมของผสม

(2) ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมพื้นที่สำหรับบ่อฝังกลบขยะ

การเตรียมพื้นที่สำหรับก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะจะเริ่มจากการขุดเปิดหน้าดินให้มีความลึกตามที่ออกแบบไว้ โดยใช้รถขุดดิน (Backhoe) หลุมฝังกลบที่ขุดนั้นต้องมีขนาดพื้นที่และปริมาตรเพียงพอสำหรับรองรับปริมาณขยะมูลฝอยที่ต้องการจะฝังกลบ (ประมาณ 10 – 20 ปี) มีลักษณะพื้นที่บ่อฝังกลบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความลาดชันด้านข้าง 1:3

(3) ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมของผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

ในการเตรียมของผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนจะนำของเสียเบนโทไนท์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 มาผสมกับดินทรายปนร่วนที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินในขั้นตอนที่ 2 โดยในการผสมจะเริ่มต้นด้วยการวัดความชื้นของของเสียเบนโทไนท์ และผสมของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนด้วยการใช้รถแทรกเตอร์ แสดงดังภาพที่ 4.10 เพื่อให้ได้วัสดุกันซึมที่มีอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง

ภาพที่ 4. 10 รถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการผสมของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน

(1) ขั้นตอนที่ 4 การบดอัด

ก่อนที่จะทำการบดอัดต้องทำการสุ่มวัดปริมาณความชื้นของของผสมระหว่างของเสียเบนโทไนท์ และดินทรายปนร่วนในพื้นที่ให้มีปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC) เท่ากับค่าที่ทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ ถ้าของผสมมีปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมให้นำของผสมนั้นตากให้แห้งด้วยวิธีผึ่งให้แห้งในอากาศ (Air dry) แต่ถ้าของผสมมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะต้องฉีดพรมน้ำลงบนของผสมนั้นเพื่อให้ได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจากนั้นจะนำของผสมมาเทกองแล้วเกลี่ยให้เป็นชั้นๆ จำนวน 3 ชั้น ชั้นละประมาณ 15 – 20 เซนติเมตร โดยในแต่ละชั้นจะบดอัดด้วยรถบดล้อหนามขนาดใหญ่ (Sheepfoot Roller) แสดงดังภาพที่ 4.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4. 11 รถบดล้อหนามขนาดใหญ่ใช้สำหรับบดอัดดิน
(กรมชลประทาน, 2557)

จากนั้นจะใช้รถปาดเกลี่ย (Motor Grader) แสดงดังภาพที่ 4.12 ปาดหน้าดินในหลุมฝังกลบขยะให้เรียบ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการการทำท่อรวบรวมน้ำชะขยะต่อไป

ภาพที่ 4. 12 รถปาดเกลี่ยใช้ปาดหน้าดินในหลุมฝังกลบขยะให้เรียบ
(Equipmentworld, 2016)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษาในการนำของเสียเบนโทไนท์ที่เกิดจากการขุดเจาะวางท่อบริเวณพื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา มาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ สำหรับพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นดินทรายปนร่วน ซึ่งจะเป็นแนวทางขั้นตอนในการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้งานจริงเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ โดยเริ่มจากการประเมินความเป็นพิษของของเสียเบนโทไนท์ที่จะนำมาใช้งาน ประเมินกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของวัสดุกันซึม ประเมินการซึมผ่านน้ำของวัสดุกันซึม และประเมินการบวมตัวของวัสดุกันซึม ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) จากการทดลองที่ 1 การศึกษาสมบัติของของเสียเบนโทไนท์ พบว่าของเสียเบนโทไนท์ที่นำมาศึกษาเป็นของเสียไม่อันตราย (Non-hazardous waste) มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าดินทรายปนร่วนทำให้สามารถแทรกไปในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และมีปริมาณแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9.16 $\pm$ 0.23 โดยน้ำหนักแห้ง

(2) จากการทดลองที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน พบว่าอัตราส่วนของแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตวัสดุกันซึม เพราะให้ค่าการซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 7.12×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบวัสดุกันซึมของ U.S.EPA และมาตรฐานการจัดการขยะมูลฝอยที่จัดทำโดยกรมควบคุมมลพิษ พร้อมทั้งมีค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือน 269.69 $\pm$ 27.31 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และค่าการบวมตัวร้อยละ 0.312 $\pm$ 0.021 ของความสูงเดิม ซึ่งผ่านเกณฑ์ด้านการก่อสร้างที่จะไม่สร้างความเสียหายแก่หลุมฝังกลบขยะ

(3) จากการทดลองที่ 3 การศึกษาสมบัติการซึมผ่านของวัสดุกันซึมภายใต้สภาพสัมผัสกับของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ พบว่าเมื่อทดสอบการซึมผ่านด้วยของเหลวแบบต่างๆ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมจะมีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยพบว่าของเหลวที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมากที่สุด โดยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าที่สูงขึ้น คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ รองลงมาเป็น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายกรดอะซิติก

(4) การประเมินต้นทุนเชิงวิศวกรรมพบว่าการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุกันซึมแทนการนำไปถมในพื้นที่ที่ได้รับอนุญาต หน่วยงานขุดเจาะใต้ผิวดินจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียเบนโทไนท์ไป 80.36 บาทต่อตันของเสียเบนโทไนท์ และหน่วยงานที่ก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะจะเสียค่าขนส่งของเสียเบนโทไนท์มายังพื้นที่หลุมฝังกลบขยะ 50 บาทต่อตันของเสียเบนโทไนท์

5.2. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ และทดสอบพฤติกรรมด้านการซึมผ่านโดยการใช้ของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ สำหรับข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตมีดังนี้

(1) งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการตรวจสอบร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในชุดการทดลองที่คำนวณมาผสม ดังนั้นควรที่จะตรวจสอบร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์เพื่อยืนยันร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในการทดลองจริงเท่ากับร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละอัตราส่วน

(2) งานวิจัยนี้ใช้ของเหลวสังเคราะห์เป็นน้ำชะในการทดลอง ดังนั้นควรที่จะศึกษากับน้ำชะขยะมูลฝอยชุมชนจริงๆ

(3) งานวิจัยนี้มีการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับขั้นตอนการก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะซึ่งเป็นช่วงเวลารับแรงระยะสั้น ดังนั้นควรที่จะศึกษากำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับขั้นตอนการดำเนินการซึ่งเป็นช่วงเวลารับแรงระยะยาว

(4) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นควรที่จะมีการศึกษาในระดับปฏิบัติงานจริงในสนาม

Chulalongkorn University

(5) งานวิจัยนี้มีการประเมินแค่ต้นทุนเชิงวิศวกรรมในการนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะ ดังนั้นควรที่จะมีการศึกษาค่าสินไหมทดแทนความเสียหายที่เกิดต่อทรัพยากรธรรมชาติจากการทิ้งของเสียเบนโทไนท์ในธรรมชาติ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. (2544). เกณฑ์ มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน. กรุงเทพมหานคร.

กรมควบคุมมลพิษ. (2558). รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ. ศ. 2557. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2559). รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ. ศ. *2558*. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2560). รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ. ศ. 2559. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม.

กรมชลประทาน. (2557). การจัดการก่อสร้างทำนบดิน.

กรมทรัพยากรธรณี. (2553). งานสำรวจแหล่งวัสดุทางธรณีวิทยาที่ใช้ปรับปรุงพื้นที่ดินเค็มในพื้นที่เลือกสรร. Retrieved 1 มีนาคม, 2559, from http://www.dmr.go.th/download/Alkaline_soil/53.pdf

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2520). พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. ๒๕๒๐.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2557). โครงการผลิตและเผยแพร่สื่อประชาสัมพันธ์ภารกิจกองทุนพัฒนาน้ำบาดาล ตามโครงการรณรงค์เสริมสร้างความรู้เรื่องน้ำบาดาล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการน้ำบาดาลและสิ่งแวดล้อม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557. from http://www.pr-gwaterfund.com/

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2560). ข้อมูลบ่อน้ำบาดาลทั่วประเทศ. Retrieved 10 กันยายน, 2560, from http://www.dgr.go.th/well_web/WellWEB/Well_web.html

กรมทางหลวง. (2532). มาตรฐานดินถม. Retrieved 3 มีนาคม, 2559, from http://mai.doh.go.th/BL1/DocLib1/Forms/AllItems.aspx

กรมทางหลวงชนบท. (2558a). การควบคุมคุณภาพของวัสดุก่อสร้าง ตามมาตรฐาน มทช. การหาค่าซี.บี.อาร์. (*CALIFORNIA BEARING RATIO)* (pp. 80-88).

กรมทางหลวงชนบท. (2558b). การควบคุมคุณภาพของวัสดุก่อสร้าง ตามมาตรฐาน มทช. การบดอัดดิน (*Compaction)* (pp. 68-79).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กระทรวงพลังงาน. (2556). การกำหนดประเภทและขนาดของระบบการขนส่งก๊าซธรรมชาติทางท่อและหลักเกณฑ์ วิธีการ ระเบียบปฏิบัติ และแนวทางในการจัดทำรายงานด้านสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2556. ราชกิจจานุเบกษา, *130*, 1-87.

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2549). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. ๒๕๔๘ ราชกิจจานุเบกษา เล่ม *123* ตอนพิเศษ *11* ง (pp. 50-60). กรุงเทพมหานคร.

เกรียงไกร ศิรนานนท์. (2557). การศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติเส้นที่ *4 (*ระยอง - แก่งคอย) ด้วยวิธีเจาะลอด. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

คชินท์ สายอินทวงศ์. (2551). เบนโทไนท์ Bentonite. Retrieved 19 มกราคม, 2559, from http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_bentonite.php

ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน. (2555). Nanoclay. Retrieved 24 มกราคม, 2559, from http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info_index.php?cat_id=15

ทีฆรัต ชวาลวิวัฒน์, ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์, สุชา ดลพนิต and วรรณสิริ พันธุ์อุไร. (2544). การพัฒนาของเหลวพยุงเสถียรภาพของหลุมเจาะแบบเปียกชนิดสารละลายเบนโทไนตผสมด้วยสารละลายโพลีเมอร์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่. มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

เทศบาลนครภูเก็ต. (2553). เทคโนโลยีการกำจัดมูลฝอยที่เหมาะสมสำหรับศูนย์กำจัดขยะจังหวัดภูเก็ต รายงานการศึกษาความเหมาะสมและแบบรายละเอียดในการลงทุนและดำเนินการฝังกลบขยะมูลฝอยด้วยกระบวนการชีวภาพ-กล. ภูเก็ต.

ธนิต เฉลิมยานนท์. (2552). การใช้ทรายผสมเบนโทไนต์และดินเหนียวในชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบมูลฝอย. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธเรศ ศรีสถิตย์. (2558). วิศวกรรมการจัดการมูลฝอยชุมชน กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชินูปถัมภ์.

นิวัติ อนงค์รักษ์. (2554). สมบัติทางเคมีของดิน. Retrieved 12 กุมภาพันธ์, 2559, from http://mis.agri.cmu.ac.th/course/course_lecture_download.asp?CourseNO=361212&CID=1125

บุญชุม เปียแดง, วรรณา จันทร์คง, นารี สุทธปรีดา and เกษมศรี ซับซ้อน. (2526). สมบัติกายภาพของดิน. ปฐพีวิทยา. Retrieved 2 กรกฎาคม, 2559, from http://elearning.nsru.ac.th/web_elearning/soil/lesson_3_6.php

พรชัย อัศวชินโชติ. (2558). รายละเอียดของเบนโทไนท์และวิธีการจำกัด: บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พัลลภ วิสุทธิ์เมธานุกูล. (2558). คู่มือวิศวกรรมฐานราก. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2549). ผลกระทบของโซเดียมเบนทอไนต์ และแนวทางการจัดการโคลนเบนทอไนต์: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภิรส เจนวิทยะเวชกุล. (2543). การปรับปรุงคุณภาพวัสดุกันซึมดินเหนียวบดอัดผสมปูนขาวและเถ้าลอย. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.

มณเฑียร กังศศิเทียม. (2529a). การบดอัดดิน กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม (pp. 346-366). สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์: กรุงเทพมหานคร.

มณเฑียร กังศศิเทียม. (2529b). กำลังต้านทานต่อแรงเฉือนของดิน กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม (pp. 205-231). กรุงเทพมหานคร: สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์.

มานิต ช่วยงาน. (2552a). การจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification). Retrieved 1 กรกฎาคม, 2559, from http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/6.pdf

มานิต ช่วยงาน. (2552b). การทดลองการบดอัดดิน (Compaction Test). Retrieved 2 พฤศจิกายน, 2560, from http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/7.pdf

มานิต ช่วยงาน. (2552c). การทดลองแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test). Retrieved 3 กุมภาพันธ์, 2559, from http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/14.pdf

วันชัย ยอดฤทธิ์. (2552). การรับกำลังของดิน. Retrieved 5 มีนาคม, 2559, from http://slideplayer.in.th/slide/4118255/

ศูนย์วิจัย และจัดการคุณภาพอากาศ. (2554). รายงานการเผาขยะในที่โล่งแจ้ง และการจัดการ. Retrieved 20 มีนาคม, 2559, from http://www3.med.cmu.ac.th/etc/smog/modules/article/upload/attach_file/11-06-22-555d6.pdf

สรินทร ลิ่นปนาทธ. (2545). ดินเบนโทไนต์. Retrieved 19 มกราคม, 2559, from http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/June/radio6-2.htm

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (2520). การวิเคราะห์ปริมาณ Active Clay และการศึกษาบทบาทของดินเหนียวต่อสมบัติของทรายแบบ ปฏิบัติการทางโลหการ. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำนักข่าวอิศรา. (2558). เหตุโคลนเทียมผุด อภัยภูเบศรสรุปสมุนไพรเสียหายกว่า 80 ชนิด. Retrieved 27 มิถุนายน, 2559, from http://www.isranews.org/thaireform-doc-environment/item/36199-ptt_36199.html

สุขสันต์ หอพิบูลสุข. (2557). เทคนิคการปรับปรุงพื้นดิน. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ภาษาอังกฤษ

Aldaeef, A. and Rayhani, M. (2014). Hydraulic performance of Compacted Clay Liners (CCLs) under combined temperature and leachate exposures. *Waste Management, 34*, 2548-2560.

Anh, H. N., Ahn, H., Jo, H. Y. and Kim, G.-Y. (2017). Effect of alkaline solutions on bentonite properties. *Environ Earth Sci, 76*(374).

ASTM C837-09. (2009). Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay American Society for Testing and Materials.

ASTM D698-12e2. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)) (ASTM D698-12e2): American Society for Testing and Materials.

ASTM D1883-16. (2016). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils: American Society for Testing and Materials.

ASTM D2166-00. (2000). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil: American Society for Testing and Materials.

ASTM D5856-15. (2015). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter American Society for Testing and Materials.

Bhalla, B., Saini, M. S. and Jha, M. K. (2013). Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill. *International Journal of Research in Engineering and Technology, 2*(8), 223-232.

Biswas, R. and Krishna, N. V. S. R. (2008). *EFFECT OF FLY ASH ON STRENGTH AND SWELLING ASPECT OF AN EXPANSIVE SOIL.* National Institute of Technology Rourkela, India.

Brunner, D. R. and Keller, D. J. (1972). Sanitary Landfill Design and Operation: United States Environmental Protection Agency.

Chalermyanont, T. and Arrykul, S. (2005). Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakarin J. Sci. Technol, 27*(2), 313-323.

Challcharoenwattana, A. and Pharino, C. (2015). Co-Benefits of Household Waste Recycling for Local Community's Sustainable Waste Management in Thailand. *Sustainability, 7*(6), 7417-7437.

Choo, K. Y. and Bai, K. (2016). The effect of the mineralogical composition of various bentonites on CEC values determined by three different analytical methods. *Applied Clay Science, 126*, 153–159.

Daniel, D. E. and Wu, Y. K. (1993). Compacted Clay Liners and Covers for Arid Sites. *Journal of Geotechnical Engineering, 120*(8), 1461-1461.

Das, B. M. (2001). Permeability *Principles of Geotechnical Engineering 5th Edition* (pp. 139-177). United States of America: California State University, Sacramento.

Digdon, W. T. (2009). Increasing the efficiency of combustion processes. Retrieved 10 March, 2016, from https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US8408148.pdf

Equipmentworld. (2016). Motor graders have gotten better at one thing. Retrieved 5 November, 2017, from https://www.equipmentworld.com/motor-graders-have-gotten-better-at-one-thing/

Fattah, M. Y. and Lame, M. H. A. (2016). Behavior and characteristics of compacted expansive unsaturated bentonite-sand mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8*(5), 629-639.

Federation of Piling Specialists. (2006). BENTONITE SUPPORT FLUIDS (Vol. 2016). United Kingdom: Federation of Piling Specialists.

Fernández, R., Mäder, U. K., Rodríguez, M., Villa, R. V. D. L. and Cuevas, J. (2009). Alteration of compacted bentonite by diffusion of highly alkaline solutions. *European Journal of Mineralogy, 21*(4), 725-735.

Fredlund, D. (1975). ENGINEERING PROPERTIES OF EXPANSIVE CLAYS. Saskatchewan, Canada.

Geotechnical Engineering Laboratory - University of at Arlington. (2008). Constant Head Permeability Test in Sand. United States of America: University of Texas at Arlington.

Greer, B. and Welch, V. (2012). Yuma Area Water Management System (YAWMS) GROUNDWATER BASICS. Retrieved 25 January, 2016, from http://www.usbr.gov/lc/yuma/programs/YAWMS/GROUNDWATER.html

Gueddouda, M. K., Lamara, M., Aboubaker, N. and Taibi, S. (2008). Hydraulic Conductivity and Shear Strength of Dune Sand–Bentonite Mixtures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13*(H).

Halis, Y., Benhaddya, M. L., Bachi, O. E., Lahcini, A. and Belhamra, M. (2014). Can pit conductance be blocked under low ionic strength? Effect of deionized water on intervessel connectivity in a halophytic desert shrub (Tamarix gallica L.). *Acta Physiologiae Plantarum, 36*(4), 1045–1050.

Hamdi, N. and Srasra, E. (2013). Hydraulic conductivity study of compacted clay soils used as landfill liners for an acidic waste. *Waste Management, 33*(1), 60–66.

Han, D., Tong, X., Currell, M. J., Cao, G., Jin, M. and Tong, C. (2014). Evaluation of the impact of an uncontrolled landfill on surrounding groundwater quality, Zhoukou, China. *Journal of Geochemical Exploration, 136*, 24-39.

Harraz, H. (2016). Beneficiation and mineral processing of clay minerals. Retrieved 8 November, 2017, from https://www.slideshare.net/hzharraz/beneficiation-and-mineral-processing-of-clay-minerals

Hassan, A. A. (2014). *HYDRAULIC PERFORMANCE OF COMPACTED CLAY LINERS (CCLS) UNDER SIMULATED LANDFILL CONDITIONS.* (post-doctoral), Carleton University, Canada.

Hongchao, L. (2014). OGEM Solids Control Drilling Fluid Dewatering System. Retrieved 15 February, 2016, from http://chinesesolidscontrol.blogspot.com/2014/03/ogem-solids-control-drilling-fluid.html

Integrated solid waste management. (2004). Compacted soil liners. Retrieved 27 January, 2016, from http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-

engineering/1-34-waste-containment-and-remediation-technology-spring-2004/lecture-notes/lecture21.pdf

Kant, R. (2015). Public Private Partnership in Municipal Solid Waste - Experience & Key Issues. Retrieved 22 March, 2016, from http://www.slideshare.net/RaviKant33/msw-making-ppp-work-ravi-kant-48575688

Kelly, R. L. (2002). Clay platelet structure. Retrieved 10 February, 2016, from http://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/resources/soils/structure/cec

Keppert, M., Pavlík, Z., Tydlitát, V., Volfová, P., Švarcová, S., Šyc, M. and Cˇerný, R. (2012). Properties of municipal solid waste incineration ashes with respect to their separation temperature. *Waste Management & Research, 30*(10), 1041–1048.

Klinck, B. A. and Stuart, M. E. (1999). Human health risk in relation to landfill leachate quality England: British Geological Survey

Liu, Y., Gates, W. P. and Bouazza, A. (2013). Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes, 36*, 71-80.

Mojid, M. A. (2014). Diffuse Double Layer (DDL) *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (pp. 213-214).

Ogata, Y., Ishigaki, T., Nakagawa, M. and Yamada, M. (2016). Effect of increasing salinity on biogas production in waste landfills with leachate recirculation: A lab-scale model study. *Biotechnology Reports, 10*, 111-116.

Ojuri, O. and Oluwatuyi, O. (2017). Strength and Hydraulic Conductivity Characteristics of Sand-Bentonite Mixtures Designed As a Landfill Liner *Jordan Journal of Civil Engineering, 11*(4), 614-622.

Pendowshi, J. J. (2003). An Assessment of Laboratory Leaching Tests for Predicting the Impacts of Fill Material on Ground Water and Surface Water Quality. Washington, DC, United States of America: Department of Ecology

Proia, R., Croce, P. and Modoni, G. (2016). Experimental Investigation of Compacted Sand-bentonite Mixtures. *Procedia Engineering, 158*, 51-56.

Rakshit, S. and Pal, S. K. (2015). Compaction and Hydraulic Conductivity Characteristics of Bentonite Mixed with Local Soil. *International Journal of Engineering Research & Technology, 4*(2).

Reeves, G. M., Sims, I. and Cripps, J. C. (2006). The composition of clay materials *Clay Materials Used in Construction* (pp. 13-27). London, England: Geological Society

Richard, A. and Cyrus, D. (2012). Identification of Expansive Soils Using Remote Sensing and In-Situ Field Measurements – Phase I Department of Homeland Security Science and Technology Center of Excellence.

Rinaldo, A. (2005). FIELD AND LABORATORY TESTS. Retrieved 15 January, 2016, from http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_3/chapt_8/main.htm

Rogers, J. D., Olshansky, R. and Rogers, R. B. (1993). DAMAGE TO FOUNDATIONS FROM EXPANSIVE SOILS. *Claims People, 3*(4), 1-4.

Roy, W. R. and Berger, P. M. (2011). Geochemical Controls of Coal Fly Ash Leachate pH. *Coal Combustion and Gasification Products, 3*, 63-66.

Sangburarn, T. and Lerdlum, S. (2011). *SURFACE MODIFICATION OF BENTONITE CLAY TO IMPROVE IT ADSORPTION CAPACITY OF DYE.* (Bachelor of Engineering), Khon Kaen University, Khon Kaen.

Shaker, A. A. and Elkady, T. Y. (2016). INVESTIGATION OF THE HYDRAULIC EFFICIENCY OF SAND-NATURAL EXPANSIVE CLAY MIXTURES. *International Journal of GEOMATE, 2*(3).

Shariatmadari, N., Salami, M. and Fard, M. K. (2011). Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers. *International Journal of Civil Engineering, 9*(2).

SHIRAZI, S. M., WIWAT, S., KAZAMA, H., KUWANO, J. and SHAABAN, M. G. (2011). SALINITY EFFECT ON SWELLING CHARACTERISTICS OF COMPACTED BENTONITE *Environment Protection Engineering, 37*(2), 65-74.

Sizirici, B. and Tansel, B. (2015). Parametric fate and transport profiling for selective groundwater monitoring at closed landfills: A case study. *Waste Management, 38*, 263–270.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Sobti, J. and Singh, S. K. (2017). Hydraulic conductivity and compressibility characteristics of bentonite enriched soils as a barrier material for landfills. *Innovative Infrastructure Solutions, 2*(12).

Srikanth, V. and Mishra, A. K. (2016). A Laboratory Study on the Geotechnical Characteristics of Sand–Bentonite Mixtures and the Role of Particle Size of Sand. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2*(3).

Sudjianto, A. T., Suryolelono, K. B., Rifa, A. and Mochtar, I. B. (2011). The Effect of Water Content Change and Variation Suction in Behavior Swelling of Expansive Soil *International Journal of Civil & Environmental Engineering, 11*(3).

Tang, Q., Wang, H., Chen, H. and Tang, X. (2015). Long-term hydraulic conductivity of compacted clay permeated with landfill leachates. *Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2*(53), 1845-1848.

The United States Geological Survey. (2015). Groundwater quality; Contaminants can be natural or human-induced. Retrieved 25 January, 2016, from http://water.usgs.gov/edu/earthgwquality.html

Tossiri, K. (2001). *FLOW OF CONTAMINATED FLUID THROUGH COMPACTED SAND-BENTONITE MIXTURE.* (Master. Engineering), Chulalongkorn University, Bangkok.

Tyagi, B., Chudasama, C. D. and Jasra, R. V. (2006). Determination of structural modification in acid activated montmorillonite clay by FT-IR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 64*(2), 273–278.

Umar, M., Aziz, H. A. and Yusoff, M. S. (2010). Variability of Parameters Involved in Leachate Pollution Index and Determination of LPI from Four Landfills in Malaysia. *International Journal of Chemical Engineering, 2010*.

United Nations Environment Programme (2013). Municipal Solid Waste Composition Analysis Study Juba, South Sudan. Retrieved 28 February, 2016, from http://postconflict.unep.ch/publications/UNEP_South_Sudan_Juba_Waste_composition_2013.pdf

US Environmental Protection Agency. (1992). TOXICITY CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE *Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods,* . Washington, D.C.

US Environmental Protection Agency. (1993). Criteria for Solid Waste Disposal Facilities ; A Guide for Owners/Operators. Retrieved 3 March, 2016, from https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/landbig.pdf

Vangpaisal, T. and Sangtian, N. (2010). Properties of Silty Sand Mixed with Bentonite for Hydraulic Barrier Construction *UBU Engineering Journal*(1), 19-29.

Wachirawongsakorn, P. (2013). Assessment of Heavy Metal Distribution in Soil and Groundwater Surrounding Municipal Solid Waste Dumpsite in Nai Muang Subdistrict Administrative Organization, Amphur Phichai, Uttaradi. *NU. International Journal of Science, 10*(1), 18 - 29.

Wayal, A. S. and Ameta, N. K. (2008). Effect of Bentonite on Permeability of Dune Sand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13*(A).

Wijnen, M., Augeard, B., Hiller, B., Ward, C. and Huntjens, P. (2012). Managing the invisible : Understanding and Improving Groundwater Governance Washington D.C.: The World Bank.

Yılmaz, G., Yetimoglu, T. and Arasan, S. (2008). Hydraulic conductivity of compacted clay liners permeated with inorganic salt solutions. *Waste Management and Research, 26*(5), 464-473.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

วิธีการการทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.1

การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้วโดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และน้ำสกัด

(1) ในกรณีที่สิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว มีลักษณะเป็นกากตะกอน (Sludge) หรือของเหลวข้น (Slurry) ที่ไม่สามารถกรองหรือบดได้ ให้นำตัวอย่างไปอบให้แห้ง บันทึกค่าน้ำหนักที่หายไป

(2) บดตัวอย่างให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 10 เมช (2.00 มิลลิเมตร)

(3) ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรต (Sodium citrate) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอช 5.0 $\pm$ 0.1 เป็นน้ำสกัดในวิธี WET

ขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

(1) นำตัวอย่าง 50 กรัมมาใส่ในภาชนะที่ทำจากแก้ว หรือพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน

(2) เติมสารละลายโซเดียมซิเตรต (Sodium citrate) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ลงไปในตัวอย่าง

(3) นำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัด และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงไปในตัวอย่าง

(4) นำของผสมไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าที่สามารถกวนของผสมอยู่ตลอดเวลา นาน 48 ชั่วโมง

(5) จากนั้นนำของผสมไปกรองผ่านแผ่นกรองเมนเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

(6) ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะต้องปรับสภาพสารละลายที่กรองได้ในข้อ 5 ด้วยกรดไนตริกเป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ต้องปรับสภาพเป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง

(7) นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometer (ICP)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.2

วิธีวิเคราะห์ Methylene blue procedure

การทดสอบหาร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ ตามมาตรฐาน ASTM C837-09

(ASTM C837-09, 2009; สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2520)

ขั้นตอนการสร้างกราฟมาตรฐาน

(1) เตรียมส่วนผสมที่มีเบนโทไนท์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และทรายแก้วร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก โดยชั่งเบนโทไนท์ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ปริมาณ 0.5 กรัม และชั่งทรายแก้วที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness number) เท่ากับ 60-90 และผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จำนวน 4.5 กรัม ผสมเบนโทไนท์และทรายแก้วให้เข้ากัน

(2) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ แล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบใช้แกนแม่เหล็กหมุน จนกระทั่งเบนโทไนท์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

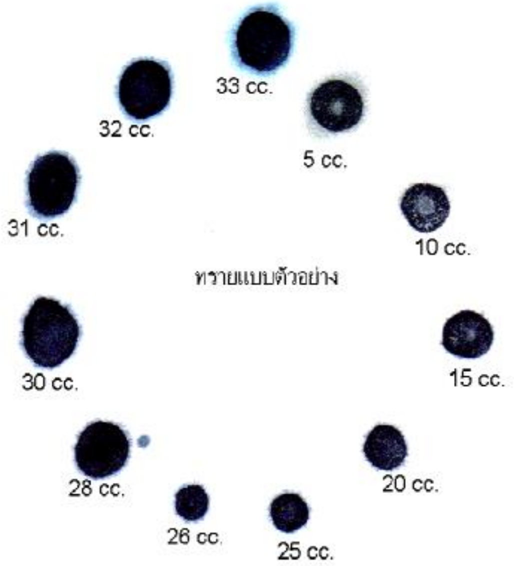
(3) วัดค่าพีเอชของสารละลายเบนโทไนท์ แล้วเติมกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล เพื่อปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 2.5 – 3.8 ปั่นกวนต่ออีก 10 – 15 นาที จนได้ค่าพีเอชตามช่วงที่กำหนด

(4) เติมสารละลาย Methylene blue ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร กวนผสมส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 2 นาที

(5) นำแท่งแก้วจุ่มในส่วนผสม แล้วหยดลงบนกระดาษกรอง สังเกตดูรัศมีเป็นวงสีฟ้า (Blue halo) แสดงดังภาพที่ ก.1 การเกิดวงสีฟ้าอ่อนๆ รอบหยดน้ำสารละลายเบนโทไนท์ แสดงถึงจุดสิ้นสุด (End point) การทำปฏิกิริยาของแอคทีฟเบนโทไนท์ หากยังไม่ปรากฏวงสีฟ้าให้หยดสารละลาย Methylene blue เพิ่มลงไปครั้งละ 1 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 2 นาที จนปรากฏวงสีฟ้าอ่อนๆ จดบันทึกปริมาณของสารละลาย Methylene blue ที่ทำให้เกิดวงสีฟ้าชัดเจนที่สุด

(6) ทำการทดลองในลักษณะเดิมโดยเปลี่ยนปริมาณของเบนโทไนท์เป็น 0.25 กรัม : ทรายแก้ว 4.75 กรัม จดบันทึกปริมาณของสารละลาย Methylene blue ที่ทำให้เกิดวงสีฟ้าชัดเจนที่สุด ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จะได้กราฟมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ ก. 1 วงสีฟ้า (Blue halo)
(สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2520)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ขั้นตอนการหาปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์

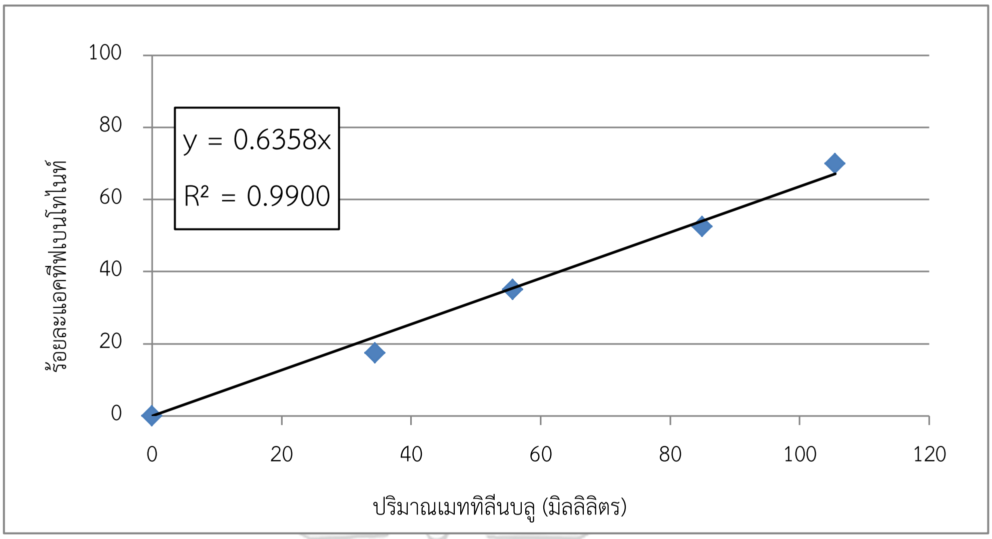
(1) ชั่งเบนโทไนท์ 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

(2) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ แล้วปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบใช้แกนแม่เหล็กหมุน จนกระทั่งเบนโทไนท์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

(3) วัดค่าพีเอชของสารละลายเบนโทไนท์ แล้วเติมกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล เพื่อปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 2.5 – 3.8 ปั่นกวนต่ออีก 10 –15 นาที จนได้ค่าพีเอชตามช่วงที่กำหนด

(4) เติมสารละลาย Methylene blue ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร กวนผสมส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 2 นาที

(5) นำแท่งแก้วจุ่มในส่วนผสม แล้วหยดลงบนกระดาษกรอง สังเกตดูรัศมีเป็นวงสีฟ้า (Blue halo) หากยังไม่ปรากฏวงสีฟ้าให้หยดสารละลาย Methylene blue เพิ่มลงไปครั้งละ 1 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 2 นาที จนปรากฏวงสีฟ้าอ่อนๆ จดบันทึกปริมาณของสารละลาย Methylene blue ที่ทำให้เกิดวงสีฟ้าชัดเจนที่สุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละเบนโทไนท์จากกราฟมาตรฐาน โดยกราฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ ก.2



ภาพที่ ก. 2 กราฟมาตรฐานของเบนโทไนท์บริสุทธิ์สำหรับวิเคราะห์เบนโทไนท์ที่ใช้งานได้

การคำนวณ

ร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ = 0.6358 × ปริมาณเมททิลีนบลู (มิลลิลิตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.3

การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor)

ตามมาตรฐาน ASTM D698-12e2 (ASTM D698-12e2, 2012; กรมทางหลวงชนบท, 2558b)

ขั้นตอนการทดลอง

(1) เตรียมตัวอย่างดินมาประมาณ 6 กิโลกรัมต่อตัวอย่าง

(2) นำตัวอย่างดินมาทำให้แห้งโดยวิธีผึ่งให้แห้งในอากาศ (Air dry) ถ้าเม็ดดินมีการจับตัวเป็นก้อนใหญ่ให้ใช้ค้อนยางทุบให้เม็ดดินแยกออกจากกัน และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร)

(3) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของกระบอกบดอัด เพื่อหาปริมาตรของดินที่อยู่ในกระบอกบดอัดดิน

(4) ประกอบตัวกระบอกบดอัดดินกับฐาน และนำไปชั่งน้ำหนัก พร้อมจดบันทึกค่าไว้

(5) ในกรณีนี้จะกล่าวถึงการบดอัดแบบมาตรฐานโดยใช้กระบอกบดอัดโลหะทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.4 มิลลิเมตร (4.5 นิ้ว) จึงต้องแบ่งตัวอย่างในข้อที่ 2 ด้วยวิธี Quartering จนได้ตัวอย่างประมาณ 3 กิโลกรัม กรณีอื่นแสดงดังตารางที่ ก-1

ตาราง ก - 1 การทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน

ขนาดของแบบ (เส้นผ่านศูนย์กลางของโมล)	พลังงานที่ตัวอย่างดินได้รับ (กิโลนิวตันเมตร/ลูกบาศก์เมตร)	น้ำหนักตุ้ม (กิโลกรัม)	ระยะยกตุ้ม (เซนติเมตร)	จำนวนชั้นการบดอัด (ชั้น)	ปริมาณดินที่ใช้ในการทดสอบ (กิโลกรัม/ตัวอย่าง)
101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว)	600	2.5	30.5	25	3
152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว)	2,700	2.5	45.2	56	6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(6) ค่อยๆ พรมน้ำลงบนตัวอย่างดินร้อยละ 2 โดยน้ำหนักดินทั้งหมด จากนั้นคลุกเคล้าตัวอย่างดินผสมกันให้ทั่วเพื่อให้ความชื้นกระจายไปทั่วตัวอย่างดินใช้เวลาประมาณ 2 นาที

(7) แบ่งตัวอย่างดินใส่ลงไปในกระบอกบดอัด โดยให้ดินแต่ละชั้นเมื่อบดอัดแล้วควรมีความสูง $\frac{1}{3}$ ของความสูงกระบอกบดอัด

(8) กรณีใช้กระบอกบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 101.6 มิลลิเมตรจะต้องบดอัด 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง กรณีอื่นแสดงดังตาราง ก-1 จากนั้นถอดปลอกออกและใช้เหล็กปาดแต่งหน้าดินให้เรียบเสมอขอบ

(9) นำกระบอกบดอัดที่ใส่ดิน และฐานไปชั่งน้ำหนัก และจดค่าไว้

(10) ค่อยๆ ดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกบดอัด และเก็บตัวอย่างดินนั้นประมาณ 150 กรัม นำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณความชื้น

(11) นำตัวอย่างดินที่ดันออกมาในข้อที่ 10 มาทดลองต่อ โดยทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 6 – 10 โดยแต่ละรอบที่ทำจะต้องเติมน้ำลงไปในดินร้อยละ 2 โดยน้ำหนักดินทั้งหมด ทำการทดลองจนกระทั่งน้ำหนักดินในกระบอกบดอัดลดต่ำลง

(12) คำนวณปริมาณน้ำในดิน (Water content) และความหนาแน่นแห้ง (Dry density) แล้วนำไปวาดกราฟเพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC)

การคำนวณ

$$\text{ความชื้น (W) (ร้อยละ)} = \frac{\text{มวลดินเปียก (กรัม) - มวลดินอบแห้ง (กรัม)}}{\text{มวลดินอบแห้ง (กรัม)}} \times 100$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\text{ความหนาแน่นเปียก } (\rho_t) \left(\frac{\text{กรัม}}{\text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}\right) = \frac{\text{มวลดินเปียกที่อยู่ในโมล (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของโมล (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

$$\text{ความหนาแน่นแห้ง } (\rho_d) \left(\frac{\text{กรัม}}{\text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}\right) = \frac{\rho_t}{1+\frac{W}{100}}$$

ภาคผนวก ก.4

การวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานต่อแรงเฉือน (Shear strength)

ตามมาตรฐาน ASTM D2166-00 (ASTM D2166-00, 2000; มานิต ช่วยงาน, 2552c)

ขั้นตอนการทดลอง

(1) เตรียมตัวอย่างดินประมาณ 2 กิโลกรัม โดยมีความชื้นเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC)

(2) ขึ้นรูปตัวอย่างโดยการบดอัดแบบมาตรฐาน ให้ได้ตัวอย่างดินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 มิลลิเมตร สูงประมาณ 140 มิลลิเมตร (อัตราส่วนระหว่างความสูงของตัวอย่างดินต่อเส้นผ่านศูนย์กลางควรมีค่าเท่ากับ 2)

(3) ชั่งน้ำหนัก วัดความสูง และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างหลังจากขึ้นรูปเสร็จ

(4) วางตัวอย่างดินในตำแหน่งตรงกลางของฐานอุปกรณ์ แสดงดังภาพที่ ก.3

ภาพที่ ก. 3 การวางตัวอย่างดินบนแท่นทดสอบ

(5) เริ่มทดลองกดตัวอย่าง โดยใช้อัตราในการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

(6) เมื่อกดตัวอย่าง ต้องบันทึกค่าแรงกดทุกๆ 0.1 มิลลิเมตรของการหดตัว

(7) ทำการทดลองจนแรงในวงแหวนวัดแรงเริ่มมีค่าลดลง แสดงถึงจุดสูงสุดการรับน้ำหนักของดิน

(8) คำนวณหาสามารถรับแรงเฉือน (ความเค้น) ของแต่ละตัวอย่างดิน

การคำนวณ

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{ระยะการหดตัว (เมตร)}}{\text{ความสูงของตัวอย่างดิน (เมตร)}}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดแก้ไข (ตารางเมตร)} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง (ตารางเมตร)}}{\text{1-ความเครียด}}$$

$$\text{ความเค้น} \left(\frac{\text{กิโลนิวตัน}}{\text{ตารางเมตร}}\right) = \frac{\text{ค่าที่อ่านได้จาก Proving ring (กิโลนิวตัน)} \times \text{(ค่าคงที่ Proving ring)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดแก้ไข (ตารางเมตร)}}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.5

การวิเคราะห์ค่าการบวมตัว (Swelling)

ซึ่งสามารถวัดได้ตามวิธี California bearing ratio test (C.B.R) ตามมาตรฐาน ASTM D1883-16 (ASTM D1883-16, 2016; กรมทางหลวงชนบท, 2558a)

ขั้นตอนการทดลอง

(1) เตรียมตัวอย่างดินประมาณ 6 กิโลกรัม โดยมีความชื้นเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC)

(2) ประกอบอุปกรณ์การทดสอบการบวมตัว โดยเริ่มจากวางแท่นโลหะรองบริเวณด้านล่าง การทดลองนี้จะใช้กระบอกโลหะบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว)

(3) ทำการบดอัดแบบมาตรฐานโดยใช้ตุ้มหนัก 2.5 กิโลกรัม บดอัด 3 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง

(4) วางแผ่นวัดการบวมตัว แผ่นถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 อัน หนักแผ่นละ 2.2 กิโลกรัม ลงไปตามลำดับ โดยแผ่นวัดการบวมตัวแสดงดังภาพที่ ก.4

(5) นำลงไปแช่ในน้ำให้ท่วมแผ่นน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว แสดงดังภาพที่ ก.5 เพื่อให้มีการบวมตัวในแนวดิ่ง และวางก้านสามขาของ Dial gauge ไว้ เพื่ออ่านค่าความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลา 6 12 30 วินาที 1 2 4 8 15 30 นาที และ 1 2 4 8 24 48 72 96 ชั่วโมง นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าการบวมตัว (%Swell)

ภาพที่ ก. 5 แผ่นวัดการบวมตัว

ภาพที่ ก. 4 การนำตัวอย่างไปแช่

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละการบวมตัว} = \frac{\text{ผลต่างการอ่านค่าครั้งแรก และครั้งสุดท้าย (มิลลิเมตร)}}{\text{ความสูงเริ่มต้น (มิลลิเมตร)}} \times 100$$

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลดิบจากการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข.1
ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์

จากกราฟมาตรฐานของเบนโทไนท์บริสุทธิ์สำหรับวิเคราะห์เบนโทไนท์ที่ใช้งานได้ (แอคทีฟเบนโทไนท์) ในภาพที่ ก.2 จะได้สมการคำนวณหาร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ ดังนี้

การคำนวณ

ร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ = 0.6358 × ปริมาณเมททิลีนบลู (มิลลิลิตร)

ตาราง ข - 1 ปริมาณร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่าง	น้ำหนักของเสียเบนโทไนท์	ปริมาณเมททิลีนบลู (มิลลิลิตร)	ร้อยละแอคทีฟเบนโทไนท์	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	2.0002	14.30	9.09		
2	2.0001	14.10	8.96	9.16	0.23
3	2.0004	14.80	9.41		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ดังนั้น ปริมาณแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ร้อยละ 9.16 ± 0.23 โดยน้ำหนักแห้ง

ภาคผนวก ข.2
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content - OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density)

(1) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	202.27	200.91	196.12	242.64	240.7
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	197.66	193.71	186.1	226.71	220.93
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	4.61	7.2	10.02	15.93	19.77
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	24.92	33.10	33.09	24.80	24.54
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	177.35	167.81	163.03	217.84	216.16
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	172.74	160.61	153.01	201.91	196.39
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3735	3775	3835	3870	3862
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1820	1860	1920	1955	1947
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	2.67	4.48	6.55	7.89	10.07
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.93	1.97	2.03	2.07	2.06
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.88	1.89	1.91	1.92	1.87
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	18.4	18.5	18.7	18.8	18.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	218.80	197.62	211.75	388.7	303.73
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	213.34	189.49	198.92	359.53	274.32
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	5.46	8.13	12.83	29.17	29.41
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	24.60	24.15	24.22	38.87	24.82
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	194.20	173.47	187.53	349.83	278.91
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	188.74	165.34	174.7	320.66	249.5
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3713	3766	3814	3807	3793
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1798	1851	1899	1892	1878
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	2.89	4.92	7.34	9.10	11.79
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.90	1.96	2.01	2.00	1.99
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.85	1.87	1.87	1.84	1.78
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	18.2	18.3	18.4	18.0	17.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข - 4 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	186.45	190.34	191.37	198.06	210.15
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	182.6	183.94	182.61	185.95	194.35
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	3.85	6.4	8.76	12.11	15.8
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	24.03	32.92	32.78	24.75	24.40
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	162.42	157.42	158.59	173.31	185.75
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	158.57	151.02	149.83	161.2	169.95
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3720	3820	3875	3920	3913
น้ำหนักโมล (กรัม)	2010	2010	2010	2010	2010
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1710	1810	1865	1910	1903
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	2.43	4.24	5.85	7.51	9.30
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.81	1.92	1.98	2.02	2.02
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.77	1.84	1.87	1.88	1.84
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	17.3	18.0	18.3	18.5	18.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(2) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 5 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	187.93	184.52	192.14	192.29	222.87
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	182.79	174.61	179.19	176.76	201.63
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	5.1400	9.9100	12.95	15.53	21.24
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	25.35	24.36	24.26	25.02	24.58
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	162.58	160.16	167.88	167.27	198.29
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	157.44	150.25	154.93	151.74	177.05
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3827	3912	4009	4010	3956
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1912	1997	2094	2095	2041
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	3.26	6.60	8.36	10.23	12.00
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	2.03	2.12	2.22	2.22	2.16
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.96	1.98	2.05	2.01	1.93
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	19.2	19.5	20.1	19.7	18.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 6 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	208.90	197.28	205.56	221.69	221.90
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	202.95	186.9	191.03	199.84	195.28
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	5.95	10.38	14.53	21.85	26.62
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	23.37	24.52	24.39	24.16	24.26
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	185.53	172.76	181.17	197.53	197.64
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	179.58	162.38	166.64	175.68	171.02
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3765	3910	4065	4055	3982
น้ำหนักโมล (กรัม)	2010	2010	2010	2010	2010
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1755	1900	2055	2045	1972
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	3.31	6.39	8.72	12.44	15.57
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.86	2.01	2.18	2.17	2.09
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.80	1.89	2.00	1.93	1.81
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	17.7	18.6	19.6	18.9	17.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข - 7 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	211.47	183.05	186.89	197.10	205.42
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	205.62	173.75	175.32	180.58	185.92
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	5.85	9.3	11.57	16.52	19.5
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	24.80	26.99	24.54	24.22	24.34
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	186.67	156.06	162.35	172.88	181.08
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	180.82	146.76	150.78	156.36	161.58
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3740	3850	3959	4005	4007
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1825	1935	2044	2090	2092
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	3.24	6.34	7.67	10.57	12.07
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.93	2.05	2.17	2.21	2.22
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.87	1.93	2.01	2.00	1.98
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	18.4	18.9	19.7	19.6	19.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(3) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 8 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	185.23	200.72	188.1	205.74	186
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	178.09	189.43	175.36	188.77	167.15
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	7.14	11.29	12.74	16.97	18.85
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	24.03	23.54	23.69	24.52	24.8
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	161.20	177.18	164.41	181.22	161.20
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	154.06	165.89	151.67	164.25	142.35
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3720	3803	3947	4005	3935
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1805	1888	2032	2090	2020
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	4.63	6.81	8.40	10.33	13.24
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.91	2.00	2.15	2.21	2.14
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.83	1.87	1.99	2.01	1.89
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	17.9	18.4	19.5	19.7	18.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 9 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	206.51	202.28	203.49	217.78	217.78
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	199.17	191.64	190.37	199.06	197.3
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	7.34	10.64	13.12	18.72	20.48
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	23.83	26.9	33.09	23.69	33.03
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	182.68	175.38	170.40	194.09	184.75
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	175.34	164.74	157.28	175.37	164.27
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3800	3845	4013	4107	4090
น้ำหนักโมล (กรัม)	2010	2010	2010	2010	2010
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1790	1835	2003	2097	2080
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	4.19	6.46	8.34	10.67	12.47
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.90	1.94	2.12	2.22	2.20
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.82	1.83	1.96	2.01	1.96
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	17.9	17.9	19.2	19.7	19.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข - 10 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	165.72	198.68	202.56	203.45	200.2
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	158.1	186.17	187.37	184.46	178.3
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	7.62	12.51	15.19	18.99	21.9
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	23.83	22.01	33.73	27.72	22.73
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	141.89	176.67	168.83	175.73	177.47
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	134.27	164.16	153.64	156.74	155.57
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3820	3924	4063	4084	4012
น้ำหนักโมล (กรัม)	2010	2010	2010	2010	2010
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1810	1914	2053	2074	2002
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	5.68	7.62	9.89	12.12	14.08
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.92	2.03	2.17	2.20	2.12
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.81	1.88	1.98	1.96	1.86
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	17.8	18.5	19.4	19.2	18.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(4) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วนร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 11 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	201.41	186.11	188.25	197.05	181.51
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	191.82	174.76	173.72	179.21	162.4
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	9.59	11.35	14.53	17.84	19.11
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	23.95	26.9	24.42	23.83	24.44
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	177.46	159.21	163.83	173.22	157.07
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	167.87	147.86	149.3	155.38	137.96
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3685	3785	3885	3960	3900
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1770	1870	1970	2045	1985
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	5.71	7.68	9.73	11.48	13.85
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.88	1.98	2.09	2.17	2.10
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.77	1.84	1.90	1.94	1.85
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	17.4	18.0	18.7	19.1	18.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 12 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	173.28	198.92	203.21	178.32	218.2
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	165.23	186.26	187.82	161.21	192.4
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	8.05	12.66	15.39	17.11	25.8
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	23.3	26.42	33.21	21.82	23.83
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	149.98	172.50	170.04	156.50	194.37
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	141.93	159.84	154.61	139.39	168.57
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3668	3759	3915	3960	3933
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1753	1844	2000	2045	2018
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	5.67	7.92	9.95	12.27	15.31
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.86	1.95	2.12	2.17	2.14
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.76	1.81	1.93	1.93	1.85
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	17.2	17.8	18.9	18.9	18.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข - 13 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุกันซึม อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

	จุดที่ 1	**จุดที่ 2**	**จุดที่ 3**	**จุดที่ 4**	**จุดที่ 5**
น้ำหนักกระป๋อง + ดินก่อนอบ (กรัม)	172.82	198.32	200.72	193.93	183.67
น้ำหนักกระป๋อง + ดินหลังอบ (กรัม)	164.38	185.06	183.72	173.96	163.4
น้ำหนักน้ำ (กรัม)	8.44	13.26	17	19.97	20.27
น้ำหนักกระป๋อง (กรัม)	23.43	22.87	23.45	21.31	30.2
น้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)	149.39	175.45	177.27	172.62	153.47
น้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)	140.95	162.19	160.27	152.65	133.2
น้ำหนักดิน + โมล (กรัม)	3604	3775	3905	3876	3800
น้ำหนักโมล (กรัม)	1915	1915	1915	1915	1915
น้ำหนักดินในโมล (กรัม)	1689	1860	1990	1961	1885
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	5.99	8.18	10.61	13.08	15.22
ความหนาแน่นเปียก (กรัม/ลบ.ซม.)	1.79	1.97	2.11	2.08	2.00
ความหนาแน่นแห้ง (กรัม/ลบ.ซม.)	1.69	1.82	1.91	1.84	1.73
ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม.)	16.6	17.9	18.7	18.0	17.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.3
การทดสอบการรับแรงเฉือน

ตาราง ข - 14 การรับแรงเฉือนของวัสดุกันซึมในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน	ค่าที่ได้จากการทดลอง (กิโลนิวตัน/ตารางเมตร)		ค่าเฉลี่ย (กิโลนิวตัน/ตารางเมตร)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	28.38		
ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 2	23.82	26.10	2.28
	ครั้งที่ 3	26.11		
	ครั้งที่ 1	158.91		
ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 2	169.57	171.58	13.78
	ครั้งที่ 3	186.24		
	ครั้งที่ 1	249.04		
ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 2	300.65	269.69	27.31
	ครั้งที่ 3	259.38		
	ครั้งที่ 1	79.15		
ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 2	85.33	83.02	3.37
	ครั้งที่ 3	84.58		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.4
การทดสอบการซึมผ่านโดยใช้น้ำปราศจากไอออน

ตาราง ข - 15 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นน้ำชะละลาย

อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์กับดินทรายปนร่วน	ค่าที่ได้จากการทดลอง (เซนติเมตร/วินาที)		ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร/วินาที)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละค่าคลาดเคลื่อน
ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 1	7.57×10^{-6}	7.48×10^{-6}	1.51×10^{-7}	2.02
	ครั้งที่ 2	7.31×10^{-6}			
	ครั้งที่ 3	7.57×10^{-6}			
ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 1	5.28×10^{-7}	5.91×10^{-7}	6.88×10^{-7}	11.64
	ครั้งที่ 2	5.82×10^{-7}			
	ครั้งที่ 3	6.64×10^{-7}			
ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 1	8.49×10^{-8}	7.12×10^{-8}	1.51×10^{-8}	21.19
	ครั้งที่ 2	7.36×10^{-8}			
	ครั้งที่ 3	5.50×10^{-8}			
ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง	ครั้งที่ 1	5.28×10^{-8}	3.67×10^{-8}	1.41×10^{-8}	38.33
	ครั้งที่ 2	2.68×10^{-8}			
	ครั้งที่ 3	3.05×10^{-8}			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.5
การทดสอบการบวมตัว

(1) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 16 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	0.0	0.00	0.000
1	**นาที**	60	0.0	0.00	0.000
2	**นาที**	120	-1.0	-0.01	-0.009
4	**นาที**	240	-2.0	-0.02	-0.017
8	**นาที**	480	-2.5	-0.03	-0.021
15	**นาที**	900	-3.0	-0.03	-0.026
30	**นาที**	1800	-3.5	-0.04	-0.030
1	**ชั่วโมง**	3600	-4.0	-0.04	-0.034
2	**ชั่วโมง**	7200	-4.0	-0.04	-0.034
4	**ชั่วโมง**	14400	-4.0	-0.04	-0.034
8	**ชั่วโมง**	28800	-4.5	-0.05	-0.039
1	**วัน**	86400	-4.5	-0.05	-0.039
2	**วัน**	172800	-4.5	-0.05	-0.039
3	**วัน**	259200	-5.0	-0.05	-0.043
4	**วัน**	345600	-5.0	-0.05	-0.043

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 17 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	0.0	0.00	0.000
1	**นาที**	60	0.0	0.00	0.000
2	**นาที**	120	0.0	0.00	0.000
4	**นาที**	240	-2.0	-0.02	-0.017
8	**นาที**	480	-2.0	-0.02	-0.017
15	**นาที**	900	-2.0	-0.02	-0.017
30	**นาที**	1800	-2.5	-0.03	-0.021
1	**ชั่วโมง**	3600	-2.5	-0.03	-0.021
2	**ชั่วโมง**	7200	-3.0	-0.03	-0.026
4	**ชั่วโมง**	14400	-3.0	-0.03	-0.026
8	**ชั่วโมง**	28800	-3.0	-0.03	-0.026
1	**วัน**	86400	-4.0	-0.04	-0.034
2	**วัน**	172800	-4.0	-0.04	-0.034
3	**วัน**	259200	-4.0	-0.04	-0.034
4	**วัน**	345600	-4.0	-0.04	-0.034

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 18 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

ระยะเวลา		**ระยะเวลาสะสม (วินาที)**	**อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)**	**มิลลิเมตร**	**การบวมตัว (ร้อยละ)**
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	0.0	0.00	0.000
1	**นาที**	60	0.0	0.00	0.000
2	**นาที**	120	-1.0	-0.01	-0.009
4	**นาที**	240	-1.0	-0.01	-0.009
8	**นาที**	480	-1.0	-0.01	-0.009
15	**นาที**	900	-2.0	-0.02	-0.017
30	**นาที**	1800	-2.0	-0.02	-0.017
1	**ชั่วโมง**	3600	-2.5	-0.03	-0.021
2	**ชั่วโมง**	7200	-3.0	-0.03	-0.026
4	**ชั่วโมง**	14400	-3.0	-0.03	-0.026
8	**ชั่วโมง**	28800	-3.0	-0.03	-0.026
1	**วัน**	86400	-4.0	-0.04	-0.034
2	**วัน**	172800	-4.5	-0.05	-0.039
3	**วัน**	259200	-4.5	-0.05	-0.039
4	**วัน**	345600	-4.5	-0.05	-0.039

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(2) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 19 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	0.0	0.00	0.000
1	**นาที**	60	0.0	0.00	0.000
2	**นาที**	120	0.0	0.00	0.000
4	**นาที**	240	1.0	0.01	0.009
8	**นาที**	480	1.0	0.01	0.009
15	**นาที**	900	1.0	0.01	0.009
30	**นาที**	1800	1.0	0.01	0.009
1	**ชั่วโมง**	3600	1.0	0.01	0.009
2	**ชั่วโมง**	7200	1.0	0.01	0.009
4	**ชั่วโมง**	14400	1.0	0.01	0.009
8	**ชั่วโมง**	28800	1.0	0.01	0.009
1	**วัน**	86400	2.0	0.02	0.017
2	**วัน**	172800	2.0	0.02	0.017
3	**วัน**	259200	2.0	0.02	0.017
4	**วัน**	345600	2.0	0.02	0.017

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข - 20 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	0.0	0.00	0.000
1	**นาที**	60	0.0	0.00	0.000
2	**นาที**	120	0.0	0.00	0.000
4	**นาที**	240	1.0	0.01	0.009
8	**นาที**	480	1.0	0.01	0.009
15	**นาที**	900	1.0	0.01	0.009
30	**นาที**	1800	1.0	0.01	0.009
1	**ชั่วโมง**	3600	1.0	0.01	0.009
2	**ชั่วโมง**	7200	1.0	0.01	0.009
4	**ชั่วโมง**	14400	2.0	0.02	0.017
8	**ชั่วโมง**	28800	2.0	0.02	0.017
1	**วัน**	86400	3.0	0.03	0.026
2	**วัน**	172800	2.0	0.02	0.017
3	**วัน**	259200	2.0	0.02	0.017
4	**วัน**	345600	2.0	0.02	0.017

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 21 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

ระยะเวลา	ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6 วินาที	6	0.0	0.00	0.000
12 วินาที	12	0.0	0.00	0.000
30 วินาที	30	0.0	0.00	0.000
1 นาที	60	0.0	0.00	0.000
2 นาที	120	0.0	0.00	0.000
4 นาที	240	0.0	0.00	0.000
8 นาที	480	0.5	0.01	0.004
15 นาที	900	1.0	0.01	0.009
30 นาที	1800	1.0	0.01	0.009
1 ชั่วโมง	3600	1.0	0.01	0.009
2 ชั่วโมง	7200	1.0	0.01	0.009
4 ชั่วโมง	14400	1.0	0.01	0.009
8 ชั่วโมง	28800	2.0	0.02	0.017
1 วัน	86400	2.0	0.02	0.017
2 วัน	172800	2.5	0.03	0.021
3 วัน	259200	2.5	0.03	0.021
4 วัน	345600	2.5	0.03	0.021

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(3) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 22 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	วินาที	6	0.0	0.00	0.000
12	วินาที	12	0.0	0.00	0.000
30	วินาที	30	0.5	0.01	0.004
1	นาที	60	2.0	0.02	0.017
2	นาที	120	2.5	0.03	0.021
4	นาที	240	3.0	0.03	0.026
8	นาที	480	3.5	0.04	0.030
15	นาที	900	5.0	0.05	0.043
30	นาที	1800	7.0	0.07	0.060
1	ชั่วโมง	3600	10.0	0.10	0.086
2	ชั่วโมง	7200	13.5	0.14	0.116
4	ชั่วโมง	14400	18.0	0.18	0.155
8	ชั่วโมง	28800	24.0	0.24	0.206
1	วัน	86400	30.0	0.30	0.258
2	วัน	172800	36.0	0.36	0.309
3	วัน	259200	38.0	0.38	0.326
4	วัน	345600	39.0	0.39	0.335

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข - 23 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	0.0	0.00	0.000
1	**นาที**	60	0.5	0.01	0.004
2	**นาที**	120	1.0	0.01	0.009
4	**นาที**	240	1.0	0.01	0.009
8	**นาที**	480	1.5	0.02	0.013
15	**นาที**	900	3.0	0.03	0.026
30	**นาที**	1800	5.0	0.05	0.043
1	**ชั่วโมง**	3600	8.5	0.09	0.073
2	**ชั่วโมง**	7200	11.0	0.11	0.094
4	**ชั่วโมง**	14400	14.0	0.14	0.120
8	**ชั่วโมง**	28800	17.5	0.18	0.150
1	**วัน**	86400	23.0	0.23	0.198
2	**วัน**	172800	30.0	0.30	0.258
3	**วัน**	259200	32.0	0.32	0.275
4	**วัน**	345600	33.0	0.33	0.283

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 24 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

ระยะเวลา		**ระยะเวลาสะสม (วินาที)**	**อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)**	**มิลลิเมตร**	**การบวมตัว (ร้อยละ)**
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	0.5	0.01	0.004
1	**นาที**	60	1.0	0.01	0.009
2	**นาที**	120	2.0	0.02	0.017
4	**นาที**	240	2.5	0.03	0.021
8	**นาที**	480	3.0	0.03	0.026
15	**นาที**	900	4.0	0.04	0.034
30	**นาที**	1800	4.5	0.05	0.039
1	**ชั่วโมง**	3600	9.0	0.09	0.077
2	**ชั่วโมง**	7200	12.5	0.13	0.107
4	**ชั่วโมง**	14400	15.5	0.16	0.133
8	**ชั่วโมง**	28800	21.5	0.22	0.185
1	**วัน**	86400	27.0	0.27	0.232
2	**วัน**	172800	33.5	0.34	0.288
3	**วัน**	259200	36.5	0.37	0.313
4	**วัน**	345600	37.0	0.37	0.318

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(4) อัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ในของเสียเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง

ตาราง ข - 25 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 1

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	วินาที	6	0.0	0.00	0.000
12	วินาที	12	0.0	0.00	0.000
30	วินาที	30	1.0	0.01	0.009
1	นาที	60	2.0	0.02	0.017
2	นาที	120	3.0	0.03	0.026
4	นาที	240	4.5	0.05	0.039
8	นาที	480	6.5	0.07	0.056
15	นาที	900	15.0	0.15	0.129
30	นาที	1800	18.5	0.19	0.159
1	ชั่วโมง	3600	31.5	0.32	0.271
2	ชั่วโมง	7200	39.0	0.39	0.335
4	ชั่วโมง	14400	49.0	0.49	0.421
8	ชั่วโมง	28800	53.0	0.53	0.455
1	วัน	86400	63.0	0.63	0.541
2	วัน	172800	71.0	0.71	0.610
3	วัน	259200	78.0	0.78	0.670
4	วัน	345600	81.0	0.81	0.696

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข - 26 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 2

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	วินาที	6	0.0	0.00	0.000
12	วินาที	12	0.0	0.00	0.000
30	วินาที	30	5.0	0.05	0.043
1	นาที	60	10.0	0.10	0.086
2	นาที	120	11.0	0.11	0.094
4	นาที	240	14.0	0.14	0.120
8	นาที	480	17.0	0.17	0.146
15	นาที	900	23.0	0.23	0.198
30	นาที	1800	27.0	0.27	0.232
1	ชั่วโมง	3600	33.0	0.33	0.283
2	ชั่วโมง	7200	38.5	0.39	0.331
4	ชั่วโมง	14400	46.0	0.46	0.395
8	ชั่วโมง	28800	54.0	0.54	0.464
1	วัน	86400	66.0	0.66	0.567
2	วัน	172800	79.0	0.79	0.679
3	วัน	259200	82.0	0.82	0.704
4	วัน	345600	83.0	0.83	0.713

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข - 27 การบวมตัวของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง ครั้งที่ 3

ระยะเวลา		ระยะเวลาสะสม (วินาที)	อ่านมาตรวัด (จำนวนช่อง)	มิลลิเมตร	การบวมตัว (ร้อยละ)
6	**วินาที**	6	0.0	0.00	0.000
12	**วินาที**	12	0.0	0.00	0.000
30	**วินาที**	30	3.5	0.04	0.030
1	**นาที**	60	6.5	0.07	0.056
2	**นาที**	120	9.5	0.10	0.082
4	**นาที**	240	12.0	0.12	0.103
8	**นาที**	480	14.5	0.15	0.125
15	**นาที**	900	19.0	0.19	0.163
30	**นาที**	1800	23.5	0.24	0.202
1	**ชั่วโมง**	3600	29.0	0.29	0.249
2	**ชั่วโมง**	7200	35.5	0.36	0.305
4	**ชั่วโมง**	14400	42.0	0.42	0.361
8	**ชั่วโมง**	28800	50.0	0.50	0.429
1	**วัน**	86400	62.0	0.62	0.533
2	**วัน**	172800	70.0	0.70	0.601
3	**วัน**	259200	75.0	0.75	0.644
4	**วัน**	345600	78.0	0.78	0.670

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข.6

การทดสอบการซึมผ่านโดยใช้ของเหลวแบบต่างๆ ที่อาจพบได้ในหลุมฝังกลบขยะ

(1) ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นน้ำชะละลาย

ตาราง ข - 28 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นน้ำชะละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	ค่าที่ได้จากการทดลอง (เซนติเมตร/วินาที)		ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร/วินาที)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ร้อยละค่าคลาดเคลื่อน
	ครั้งที่ 1	7.09×10^{-7}			
0.5 โมลาร์	ครั้งที่ 2	5.72×10^{-7}	6.35×10^{-7}	6.96×10^{-7}	10.97
	ครั้งที่ 3	6.24×10^{-7}			
	ครั้งที่ 1	2.18×10^{-6}			
2 โมลาร์	ครั้งที่ 2	3.33×10^{-6}	2.61×10^{-6}	6.24×10^{-7}	23.90
	ครั้งที่ 3	2.33×10^{-6}			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(2) ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกเป็นน้ำชะละลาย

ตาราง ข - 29 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายกรดอะซิติกเป็นน้ำชะละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก	**ค่าที่ได้จากการทดลอง (เซนติเมตร/วินาที)**		**ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร/วินาที)**	**ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน**	**ร้อยละค่าคลาดเคลื่อน**
	ครั้งที่ 1	2.19×10^{-7}			
0.5 โมลาร์	ครั้งที่ 2	2.52×10^{-7}	2.32×10^{-7}	1.77×10^{-8}	7.63
	ครั้งที่ 3	2.25×10^{-7}			
	ครั้งที่ 1	4.14×10^{-7}			
2 โมลาร์	ครั้งที่ 2	6.64×10^{-7}	5.67×10^{-7}	1.34×10^{-7}	23.67
	ครั้งที่ 3	6.22×10^{-7}			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(3) ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นน้ำชะละลาย

ตาราง ข - 30 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของวัสดุกันซึมอัตราส่วนแอคทีฟเบนโทไนท์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้ง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นน้ำชะละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	**ค่าที่ได้จากการทดลอง (เซนติเมตร/วินาที)**		**ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร/วินาที)**	**ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน**	**ร้อยละค่าคลาดเคลื่อน**
0.5 โมลาร์	ครั้งที่ 1	3.74×10^{-7}	3.06×10^{-7}	7.35×10^{-7}	24.04
	ครั้งที่ 2	3.16×10^{-7}			
	ครั้งที่ 3	2.28×10^{-7}			
2 โมลาร์	ครั้งที่ 1	4.31×10^{-7}	3.77×10^{-7}	1.32×10^{-7}	34.98
	ครั้งที่ 2	4.73×10^{-7}			
	ครั้งที่ 3	2.27×10^{-7}			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐวรรณ สมรรคนัฏ เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนโพธิสารพิทยากร ปีการศึกษา 2552 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอบทความแบบบรรยายในหัวข้อเรื่อง " การนำของเสียเบนโทไนท์มาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นวัสดุกันซึม (Utilization of Bentonite Waste for Liner Material) " รหัสบทความ 18R2-01 ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 17 - 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพมหานคร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY