



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง
เพื่อเป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ

Application of dredged marine sediments from Laemchabang Port
as a landfill compacted clay line

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 256101A1080021

สัญญาเลขที่ 45/2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง

เพื่อเป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ

Application of dredged marine sediments from Laemchabang Port
as a landfill compacted clay line

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 45/2561

บทคัดย่อ

ชั้นดินกันซึมบดอัดในบ่อฝังกลบถูกใช้เพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติข้างเคียง ดินที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่เกิน 1×10^{-9} m/s ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่า 4% งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ โดยแปรผันอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยโดยน้ำหนักแห้งต่างๆ ได้แก่ 100:0 และ 80:20 และแปรผันระยะเวลาการบ่ม 0, 7, และ 28 วัน และแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ทดสอบหาคคุณสมบัติทางดัชนี ได้แก่ ชีตพิกัตเหลว, ชีตพิกัตพลาสติก, ขนาดคละ, ความถ่วงจำเพาะ, และองค์ประกอบทางเคมีโดยการทดสอบ XRF ของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย (2) ทดสอบหาคคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย ได้แก่ การบดอัด, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ, ค่ากำลังอัดแกนเดียว, และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (3) สร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด จากผลการศึกษาพบว่าดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ โดยอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดคือ 80:20 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

คำสำคัญ: ดินที่ถูกขุดลอก, ชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด, บ่อฝังกลบขยะอย่างถูกหลักสุขาภิบาล, ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

Abstract

Landfill compacted soil liners are used to prevent leachate leaks into the groundwater and surrounding water. A suitable soil to be used as the landfill liner must have hydraulic conductivity not more than 1×10^{-9} m/s, unconfined compressive strength greater than 200 kPa, and volumetric shrinkage less than 4%. This research aimed to study the improvement of dredged soil from Laemchabang Port for an application as a landfill compacted clay liner. The ratios of dredged soil-fly ash mixture were 0 and 20% by total dry weight and 0, 7, and 28 days curing time. The investigation were 3 parts include (1) index and chemical properties of dredged soil and fly ash (liquid limit, plastic limit, particle size analysis, specific gravity, and X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)) (2) engineering properties of dredged soil-fly ash mixture (compaction, permeability, unconfined compressive strength, and volumetric shrinkage) and (3) plots of overall acceptable zone of compacted dredged soil liner. Experimental results showed that the dredged soil can be used as a landfill liner if it was mixed 20% fly ash at 28 days curing time.

Keywords: Dredged soil, Compacted clay liner, Sanitary landfill, Hydraulic conductivity

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1/1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1/5
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1/5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1/6

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill)	2/1
2.2 วิธีและรูปแบบของการฝังกลบขยะมูลฝอย	2/2
2.2.1 การฝังกลบแบบพื้นราบหรือกลบบนพื้นที่ (Area method)	2/2
2.2.2 การฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method)	2/3
2.2.3 การฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่อง (Area and Trench method)	2/3
2.2.4 การฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon method)	2/4
2.3 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill components)	2/4
2.3.1 ระบบชั้นกันซึม (Liner system)	2/5
2.3.2 ระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate Collection and Removal System)	2/7
2.3.3 ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซ (Gas collection and control system)	2/8
2.3.4 ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final Cover System)	2/9
2.4 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted Clay Liner)	2/10
2.4.1 การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดในอดีต	2/10
2.4.2 การพิจารณาการบดอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	2/13
2.4.3 การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Design of compacted clay liners)	2/18

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	3/1
3.2 รายละเอียดการทดสอบ	3/2
3.2.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction)	3/2
3.2.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity)	3/3
3.2.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)	3/3
3.2.4 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage)	3/3
3.2.5 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone)	3/4

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติดัชนีของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย	4/1
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินตะกอนและเถ้าลอย	4/3
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลผสมเถ้าลอย	4/3
4.3.1 ผลการทดสอบการบดอัด	4/4
4.3.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity)	4/5
4.3.3 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)	4/8
4.3.4 ผลการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage)	4/10
4.4 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone)	4/13

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย	5/1
ผลงานตีพิมพ์	
บรรณานุกรม	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 ประเภท	2/14
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติชั้นของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย	4/1
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย	4/3
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน	4/4
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสัดส่วนผสมน้ำของดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอย	4/7
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของสัดส่วนผสมดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอย	4/9
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของสัดส่วนผสมดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอย	4/12

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	การทำงานของระบบการฝังกลบในบ่อฝังกลบ	2/1
รูปที่ 2.2	การฝังกลบแบบพื้นราบหรือกลบบนพื้นที่ (Area method)	2/2
รูปที่ 2.3	การฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method)	2/3
รูปที่ 2.4	การฝังกลบแบบ พื้นราบและขุดร่อง (Area and Trench method)	2/3
รูปที่ 2.5	การฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon method)	2/4
รูปที่ 2.6	ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย	2/4
รูปที่ 2.7	ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดชั้นเดียว (Single Compacted Clay Liner)	2/5
รูปที่ 2.8	ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนชั้นเดียว (Single Geomembrane liner)	2/5
รูปที่ 2.9	ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนสองชั้น (Double Geomembrane Liner)	2/6
รูปที่ 2.10	ชั้นกันซึมผสมชั้นเดียว (Single Composite Liner)	2/6
รูปที่ 2.11	ชั้นกันซึมผสมสองชั้น (Double Composite Liner)	2/7
รูปที่ 2.12 ก)	ระบบรวบรวมน้ำชะขยะ และ (ข) รายละเอียดของท่อรวบรวมน้ำชะขยะ	2/8
รูปที่ 2.13	ตัวอย่างท่อระบายก๊าซจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย	2/8
รูปที่ 2.14	รายละเอียดของระบบปิดทับชั้นสุดท้าย	2/9
รูปที่ 2.15	ขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมสำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด	2/11
รูปที่ 2.16	ผลกระทบของพลังงานการบดอัดต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน	2/11
รูปที่ 2.17	กราฟการบดอัดใหม่โดยใช้สัญลักษณ์ที่บ่งชี้ตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้	2/12
รูปที่ 2.18	เส้นชั้นความสูงสำหรับค่าคงที่ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm/sec) และกำลังรับแรงเฉือน (kPa)	2/12
รูปที่ 2.19	กราฟการบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, การบดอัดแบบมาตรฐาน และการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน	2/15
รูปที่ 2.20	ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็ง	2/16
รูปที่ 2.21	ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่น	2/17
รูปที่ 2.22	กราฟการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน	2/18
รูปที่ 2.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและปริมาณความชื้น	2/19
รูปที่ 2.24	ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	2/19
รูปที่ 2.25	ปรับแก้ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	2/20
รูปที่ 2.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้น	2/20
รูปที่ 2.27	ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียว	2/21

รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรและปริมาณความชื้น	2/21
รูปที่ 2.29 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร	2/22
รูปที่ 2.30 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone)	2/22
รูปที่ 3.1 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	3/3
รูปที่ 3.2 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร	3/4
รูปที่ 3.3 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด	3/4
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดผละของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย	4/2
รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	4/5
รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	4/6
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	4/10
รูปที่ 4.5 ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	4/11
รูปที่ 4.6 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	4/13
รูปที่ 4.7 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดที่ถูกปรับแก้ตามคำแนะนำของ Benson et al. (1999) (เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน)	4/14

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของจำนวนประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจและมาตรฐานการครองชีพในปัจจุบันส่งผลให้ปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกผลิตขึ้นทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นหลายเท่าตัวและกลายเป็นหนึ่งในปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่ควรได้รับการแก้ไขโดยเร่งด่วนทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนาซึ่งรวมไปถึงประเทศไทยด้วย จากการสำรวจของกรมควบคุมมลพิษ (2556) พบว่าในปี พ.ศ.2556 ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยทั่วประเทศไทยมีปริมาณมากถึง 26.8 ล้านตัน โดยในจำนวนนี้มีการเก็บขนและนำไปกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลประมาณ 7.2 ล้านตัน และถูกนำกลับไปใช้ประโยชน์ประมาณ 5.1 ล้านตัน ส่วนที่เหลือกว่า 14.5 ล้านตันยังคงถูกกำจัดทิ้งอย่างไม่ถูกสุขลักษณะและหลักสุขาภิบาลด้วยวิธีการเทกองกลางแจ้ง (Open dumping) ซึ่งทำให้เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของพาหะนำโรคต่างๆ เช่น หนู แมลงวัน ฯลฯ และอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำเสียจากกองขยะลงสู่น้ำใต้ดินและแหล่งน้ำใกล้เคียงได้ และนอกจากวิธีการเทกองกลางแจ้งดังกล่าวแล้วยังพบว่ากองขยะเหล่านี้ อาจถูกกำจัดโดยการเผาในที่โล่ง (Open burning) ควันไฟและเศษขี้เถ้าจากการเผาขยะนี้ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพพลานามัยของประชาชน จากปัญหาดังกล่าวรัฐบาลจึงให้ความสำคัญและหามาตรการในการแก้ไขปัญหาโดยกำหนดไว้ในนโยบายที่รัฐบาลจะต้องดำเนินการโดยเร่งด่วน คือการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีระบบการกำจัดขยะมูลฝอยชุมชนแบบครบวงจรและถูกต้องตามหลักวิชาการ โดยจะสังเกตเห็นได้จากงบประมาณมหาศาลที่ถูกจัดสรรเพื่อสนับสนุนองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการจัดหาระบบดังกล่าวในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ปิยชาติ, 2557)

ตามมาตรฐานการกำจัดขยะของ US EPA (1998) กล่าวว่า การลดและการกำจัดขยะมูลฝอยจากชุมชน (Municipal Solid Waste, MSW) อย่างถูกสุขลักษณะและหลักสุขาภิบาลสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้ (i) การลดปริมาณขยะโดยการใช้จ่ายและนำกลับมาใช้ประโยชน์ (Re-use and Recycle) (ii) การเผาในเตาเผา (Incineration) และ (iii) การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) โดยการฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลถือเป็นวิธีการกำจัดขยะที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น (Rowe et al., 1995; Qian et al., 2002 และ Dutta and Mishra, 2015) เพราะแม้ว่าจะมีความพยายามรณรงค์เพื่อลดปริมาณขยะเพียงใด แต่มีเพียงประมาณ 20% ของปริมาณขยะทั้งหมดเท่านั้นที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ (Qian et al., 2002) นอกจากนี้การฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลนี้ถือเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการน้อยกว่าวิธีอื่น สามารถกำจัดขยะมูลฝอยได้ทุกประเภท ทุกขนาด (ยกเว้นขยะอันตราย (Hazardous Waste) ต้องฝังกลบโดยวิธีพิเศษ (Secured landfill)) สามารถนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้ และเป็นระบบกำจัดขั้นสุดท้ายคือ

ไม่มีเศษเหลือตกค้างที่ต้องนำไปกำจัดอีก ในขณะที่ภายหลังการกำจัดขยะโดยการเผาในเตาเผายังคงเหลือเศษซีเมนต์ที่ต้องถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบด้วย

สิ่งสำคัญที่สุดสำหรับระบบฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาลที่มีประสิทธิภาพคือ จะต้องสามารถรองรับปริมาณขยะฝังกลบเพื่อกำจัดตามทีออกแบบไว้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำเสียหรือน้ำชะขยะ (Leachates) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของชั้นดิน น้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติจากน้ำชะขยะที่รั่วซึมจากบ่อฝังกลบดังกล่าว ชั้นวัสดุกันซึมใต้บ่อฝังกลบ (Liner) จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ทนน้ำสูง มาตรฐานการออกแบบหรือข้อกำหนดของระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลส่วนใหญ่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุด (Hydraulic conductivity) ของดินเหนียวที่ใช้ทำชั้นวัสดุกันซึม (Compacted clay liner) น้อยกว่า 1×10^{-9} เมตร/วินาที และมีการกำหนดความหนาของชั้นดินเหนียวกันซึมบ่ออัดน้อยที่สุดแตกต่างกัน ระหว่าง 60-100 เซนติเมตร (โดยส่วนใหญ่ไม่น้อยกว่า 60 เซนติเมตร) (กรมควบคุมมลพิษ, 2554; European Commission, 1999; US EPA, 1998; ISWA, 2010 และ Environmental Protection Agency, 2000) นอกจากนี้ชั้นดินเหนียวกันซึมใต้บ่อฝังกลบนี้ยังจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านอื่นที่เหมาะสมด้วย เช่น มีกำลังรับแรงอัดและแรงดึงสูง (High compressive and tensile strength) เพื่อให้มีเสถียรภาพในการรองรับน้ำหนักของขยะปริมาณมาก มีการหดตัวและบวมตัวต่ำ (Low shrink/swell potential) มีความฝืดที่ผิวสัมผัสกับวัสดุสังเคราะห์สูง (High interfacial friction with geomembrane) มีความยืดหยุ่นสูง (High flexibility) สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีจากการสัมผัสกับน้ำชะขยะ (Chemical compatibility) และง่ายต่อการก่อสร้าง (Workability) เป็นต้น (เช่น Danial and Benson, 1990; Brandl, 1992; Kayabali, 1997; Cokca and Yilmaz, 2004; Czurda, 2006 และ Roberts and Shimaoka, 2008)

จากคุณสมบัติตามข้อกำหนดที่ซับซ้อนของชั้นวัสดุกันซึมดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ส่งผลให้ยากต่อการแสวงหาวัสดุที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างสำหรับชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้โดยเฉพาะในเขตภาคตะวันออกซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นดินทราย จึงอาจมีความจำเป็นต้องสรรหาแหล่งดินเหนียวที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมจากแหล่งพื้นที่อื่นที่ไกลออกไป ซึ่งส่งผลทำให้มีต้นทุนในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากค่าขนส่งวัสดุจำนวนมากจากแหล่งอื่น ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาเชิงอุตสาหกรรมการก่อสร้างดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาวิจัยและพัฒนาคุณสมบัติของดินในบริเวณพื้นที่ภาคตะวันออกที่อาจมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมให้สามารถนำมาใช้งานได้

ปัจจุบันพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกเป็นฐานการผลิตอุตสาหกรรมหลักของประเทศ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี พลังงาน และยานยนต์ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์มวลรวมคิดเป็นสัดส่วน 1 ใน 5 ของประเทศ อีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางการขนส่งทางเรือของอาเซียนจึงทำให้มีการก่อสร้างท่าเรือพาณิชย์ทั้งขนาดใหญ่และขนาดกลางจำนวนมาก นอกจากนี้ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2559 ที่ผ่านมารัฐบาลได้ริเริ่มโครงการ

พัฒนาระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor Development) เพื่อพัฒนาพื้นที่ภาคตะวันออกให้เป็นเขตเศรษฐกิจชั้นนำของอาเซียน โดยได้อนุมัติแผนลงทุนพัฒนาโครงข่ายคมนาคมขนส่งในพื้นที่ภาคตะวันออกครั้งใหญ่ ประกอบด้วย (i) ทางอากาศ (ii) ทางราง (iii) ทางถนน และ (iv) ทางเรือ และคาดว่าจะใช้งบประมาณจำนวน 3 แสนล้านบาท สำหรับโครงการสำคัญในการพัฒนาโครงข่ายคมนาคมขนส่งทางเรือ เช่น โครงการท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง เฟส 3 ให้สามารถรองรับตู้สินค้าได้สูงถึง 8 ล้านทีอียูต่อปี เพื่อลดปัญหาความแออัดของการจราจรหน้าท่า และขยายขีดความสามารถของท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังให้เป็นประตูการค้าหลักของประเทศที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงเพื่ออำนวยความสะดวกการขนส่งสินค้าของท่าเรือ โดยปัจจุบันท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเป็นท่าเรือหลักของประเทศไทยในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ มีพื้นที่ประมาณ 6,340 ไร่ เริ่มเปิดใช้เมื่อ พ.ศ. 2534 โดยมีความลึกของพื้นน้ำ 18 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ปัจจุบันได้พัฒนาไป 2 เฟสและสามารถรองรับปริมาณตู้สินค้าได้ 10-11 ล้าน ทีอียูต่อปี (54% ของการส่งออกและนำเข้าของประเทศไทย) ซึ่งถือเป็นอันดับที่ 23 ของโลก โดยแผนการก่อสร้างเฟส 3 ตั้งเป้าหมายให้ท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังติดอันดับท่าเรือที่ทันสมัย 1 ใน 10 ของโลก แผนที่ของบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังได้แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนที่ของบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง

ท่าเรือต้องมีการบำรุงรักษาด้วยการขุดลอกอย่างสม่ำเสมอ (เรียกว่า maintenance dredging) เพื่อรักษาความลึกของท่าเทียบและร่องน้ำให้เรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่สามารถเข้าจอดเทียบท่าเพื่อขนส่งสินค้าได้ โดยวัสดุขุดลอก (dredged material) เกิดจากการสะสมของวัสดุต้นกำเนิดบริเวณชายฝั่งที่ทับถมกันเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามปริมาณดินตะกอนทะเลจำนวนมากที่ได้จากการขุดลอกนี้สามารถก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมาอัน

เนื่องมาจากการหาวิธีกำจัดวัสดุตั้งกล่าวที่เหมาะสม ทั้งนี้เพราะดินตะกอนทะเลภายหลังการขุดลอกถือเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่ไม่มีประโยชน์และอาจเรียกได้ว่าเป็น “ขยะทางสิ่งแวดล้อม” และวิธีการกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมแบบดั้งเดิม เช่น การทิ้งในทะเลลึก ปัจจุบันถือว่ามีข้อจำกัดทางกฎหมายทั้งในและระหว่างประเทศ นอกจากนี้วิธีการกำจัดแบบอื่น เช่น การทิ้งบนบก ก็ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านค่าดำเนินการ ตลอดจนปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับขยะจำนวนมาก (Dubois et al., 2009) ดังนั้นการจัดการขยะทางสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ สำหรับแผนการขยายท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังนั้นจะทำให้มีการขุดลอกดินตะกอนทะเลชายฝั่งเพิ่มขึ้นแต่จะมีสถานที่ในการทิ้งตะกอนดังกล่าวลดลง (ปัจจุบันทั้งในพื้นที่ที่จะก่อสร้าง เฟส 3) ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญและแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเร่งด่วน ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันผลกระทบด้านอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นตามมาในอนาคต

ดินตะกอนทะเล คือ ดินเนื้อละเอียด ซึ่งอาจเป็นทรายถึงทรายปนซิลิกาขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำกร (ขุดลอกที่เกิดจากการสะสมบริเวณชายฝั่งของวัตถุต้นกำเนิดจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเป็นสาเหตุให้บริเวณชายฝั่งตื้นเขินซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเข้าเทียบเรือของเรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่และมีความจำเป็นต้องขุดลอกดินตะกอนทะเลบริเวณท่าเทียบเรือนี้ ออกเป็นระยะๆ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ปัจจุบันมีงานวิจัยให้ความสนใจในการนำเอาดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลมาใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมโยธา เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมมากขึ้น เช่น การนำมาใช้เป็นวัสดุในงานคอนกรีต (Chapman, 1968; Limeira et al., 2010) การนำมาใช้ผลิตอิฐ (Ulbricht, 2002) และการนำมาใช้เป็นวัสดุในงานทาง (Zentar et al., 2008; Siham et al., 2008; Dubois et al., 2009) แต่ยังคงมีการนำมาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะน้อย ดังนั้นเพื่อช่วยลดปัญหาการจัดการทางธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังและแก้ไขปัญหาเชิงอุตสาหกรรมการก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะอย่างถูกหลักสุขาภิบาลในเขตภาคตะวันออกจึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ การศึกษาความเป็นไปได้และการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลชายฝั่งที่ถูกขุดลอกเพื่อแก้ไขปัญหาการเข้าเทียบเรือของเรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่บริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี มาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาลเพื่อทดแทนวัสดุ (ดินเหนียวกันซึมบดอัด) จากแหล่งวัสดุที่อยู่ห่างไกล ตลอดจนเพิ่มมูลค่าของ “ขยะทางสิ่งแวดล้อม” หรือวัสดุดินเหลือใช้ในพื้นที่ โดยมุ่งเน้นให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างและหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม คือการลดต้นทุนการก่อสร้างโครงสร้างบ่อฝังกลบขยะ ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาการจัดการและกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลชายฝั่งที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง เพื่อใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาลเพื่อทดแทนวัสดุก่อสร้างในพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยมุ่งเน้นให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างและหลักเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

2. เพื่อแก้ไขปัญหาการจัดการทางธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยการนำ “ขยะทางสิ่งแวดล้อมหรือดินตะกอนทะเลภายหลังจากการขุดลอก” มาประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาลเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างและวิศวกรรม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยออกแบบขอบเขตของโครงการวิจัยโดยเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาความเป็นไปได้และการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลชายฝั่งที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง มาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล และสามารถแบ่งงานได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าพิกัตชั้นเหลว จำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS) ขนาดคละของมวลดิน และค่าดัชนีบวมตัวอิสระ

ส่วนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลผสมเถ้าลอย โดยแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งระหว่างดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอย คือ 0% และ 20% และระยะเวลาการบ่มที่ 0 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐานการออกแบบหรือข้อกำหนดของกรมควบคุมมลพิษ (2544) Daniel and Benson (1990) และ Daniel and Wu (1993) โดยครอบคลุมการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่างๆ

ส่วนที่ 3 ประมวลผลการทดสอบที่ได้จากส่วนที่ 1 และ 2 เพื่อพิจารณาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนทะเลมาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล โดยการสร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินตะกอนทะเลกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone for compacted clay liner) เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างชั้นวัสดุกันซึมโดยเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนทะเลชายฝั่งที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง มาประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมทางเลือกในการก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล และกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพดินตะกอนทะเล

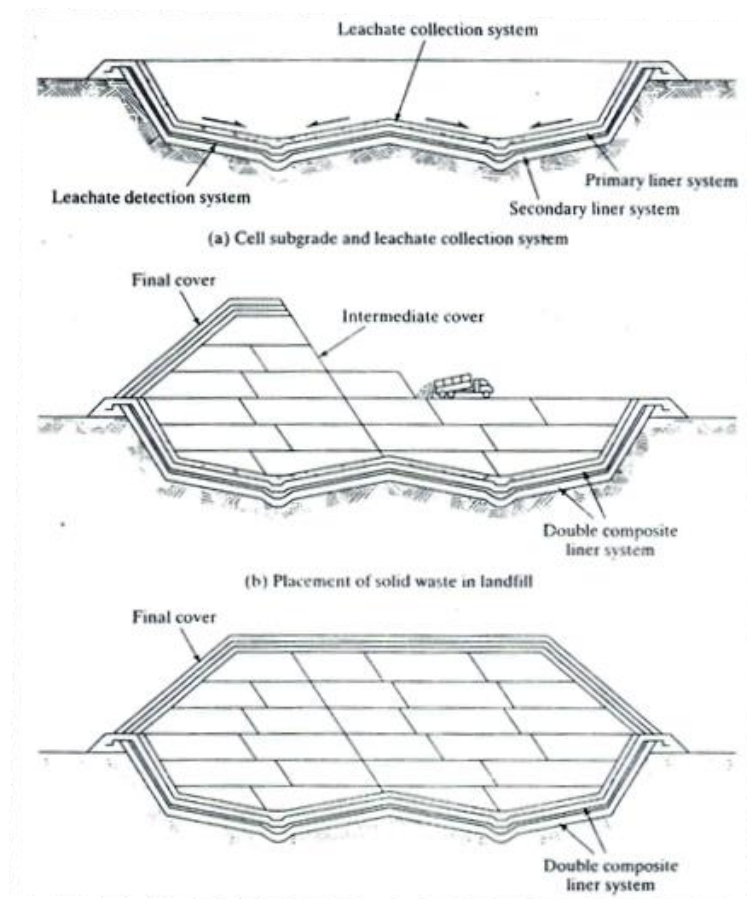
2. สามารถแก้ไขปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรหรือวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะในภาคตะวันออก

3. สามารถเพิ่มมูลค่าดินตะกอนทะเลที่ไม่มีประโยชน์และถือเป็นขยะทางสิ่งแวดล้อม โดยประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางด้านอุตสาหกรรมก่อสร้าง วิศวกรรม และการจัดการทรัพยากร

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill)

การกำจัดขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในชุมชนท้องถิ่นที่เหมาะสมและถูกหลักสุขาภิบาล คือ การฝังกลบในบ่อฝังกลบ (Sanitary landfill) ทั้งนี้เพราะเป็นระบบที่มีความสามารถในการรองรับขยะได้ในปริมาณมาก มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น การทำงานง่าย สะดวก และไม่ต้องใช้เทคโนโลยีระดับสูงเข้าช่วย การทำงานของระบบจะเริ่มต้นโดยขยะมูลฝอยจะถูกรวบรวมและลำเลียงไปเทกองไว้ในบ่อฝังกลบ จากนั้นจะถูกเกลี่ยและบดอัดขยะมูลฝอยให้ยุบตัวลงโดยใช้เครื่องจักรกลหนักแล้วปิดทับด้วยวัสดุปิดทับ เพื่อป้องกันปัญหาในด้านกลิ่น รวมทั้งแมลงหรือสัตว์ที่เป็นพาหะนำโรคมาคู่ยเชื้อหรือรบกวน ป้องกันปัญหาน้ำฝนชะล้างและเหตุรำคาญอื่นๆ เป็นต้น ขยะมูลฝอยในบ่อฝังกลบจะถูกบดอัดและปิดทับด้วยวัสดุปิดทับเป็นชั้นๆ จนได้ความสูงหรือปริมาณตามที่ออกแบบไว้จึงทำการปิดทับชั้นสุดท้าย ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของระบบการฝังกลบในบ่อฝังกลบ (Qian et al., 2002)

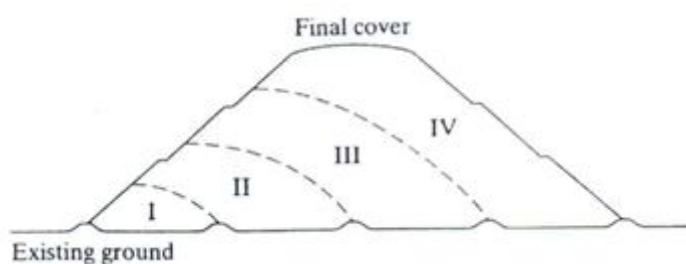
บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่ถูกหลักสุขาภิบาล จะมีระบบป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะมูลฝอยลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินซึ่งเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อินทรีย์สารที่มีอยู่ในกองขยะมูลฝอยจะถูกย่อยด้วยกระบวนการย่อยสลายชนิดไร้อากาศ (Anaerobic Decomposition) โดยจุลินทรีย์ ทำให้ขยะมูลฝอยยุบตัวและเกิดก๊าซมีเทนและน้ำเสียขึ้นในชั้นของขยะมูลฝอย เมื่อมีการไหลซึมของน้ำฝนผ่านชั้นขยะมูลฝอยจะทำให้เกิดน้ำชะขยะมูลฝอย ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนของมลสาร เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค เป็นต้น ดังนั้นหากน้ำชะขยะมูลฝอยดังกล่าวนี้ไหลซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำผิวดินแล้วเกิดการปนเปื้อน เมื่อมีการนำน้ำปนเปื้อนนี้ไปใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ ดังนั้นการดำเนินการฝังกลบขยะมูลฝอยจะต้องมีมาตรการในการป้องกันหรือบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น และมีการระบายก๊าซออกจากบริเวณฝังกลบด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วพื้นที่ที่จะใช้ในการฝังกลบจะต้องเป็นพื้นที่ว่างไม่ได้ใช้ประโยชน์หรือเป็นที่ต่อคุณค่าทางการเกษตร ไม่เป็นที่ลุ่มหรือน้ำท่วมขัง เป็นต้น

2.2 วิธีและรูปแบบของการฝังกลบขยะมูลฝอย

วิธีและรูปแบบของการฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล มี 4 แบบ คือ

2.2.1 การฝังกลบแบบพื้นราบหรือกลบบนพื้นที่ (Area method)

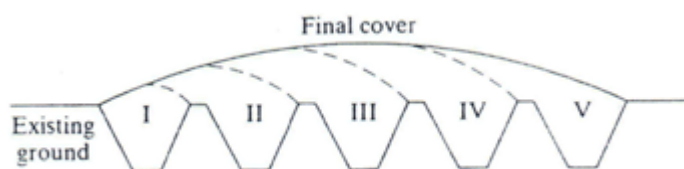
เป็นวิธีฝังกลบจากระดับดินเดิมโดยไม่มีการขุดดิน ขยะมูลฝอยจะถูกลำเลียงไปเทกองและเกลี่ยไว้เป็นชั้นในบ่อฝังกลบ จากนั้นทำการบดอัดขยะมูลฝอยตามแนวราบก่อนและบดอัดทับในชั้นถัดไปสูงขึ้นเรื่อยๆ จนได้ปริมาณขยะหรือระดับตามที่กำหนดแล้วจึงปิดทับด้วยวัสดุปิดทับ การฝังกลบขยะมูลฝอยโดยวิธีนี้จำเป็นต้องทำคันดิน (Embankment หรือ Beam) ตามแนวขอบพื้นที่ฝังกลบ เพื่อทำหน้าที่เป็นผนังในการบดอัดขยะมูลฝอยและป้องกันน้ำเสียที่เกิดจากการย่อยสลายของขยะมูลฝอยที่บดอัดและฝังกลบแล้วไม่ให้ซึมออกมาด้านนอก ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ที่จำเป็นต้องใช้วิธีนี้คือพื้นที่ราบลุ่มหรือที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินเล็กน้อย (ไม่เกิน 1 เมตร) ซึ่งทำให้ไม่สามารถขุดดินเพื่อฝังกลบด้วยวิธีฝังกลบแบบขุดร่องได้ เพราะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำเสียจากขยะมูลฝอยลงสู่น้ำใต้ดินได้ การฝังกลบด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องจัดหาดินมาจากที่อื่นเพื่อมาทำคันดินส่งผลทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2544) ลักษณะการฝังกลบแบบพื้นราบแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การฝังกลบแบบพื้นราบหรือกลบบนพื้นที่ (Area method) (Qian et al., 2002)

2.2.2 การฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method)

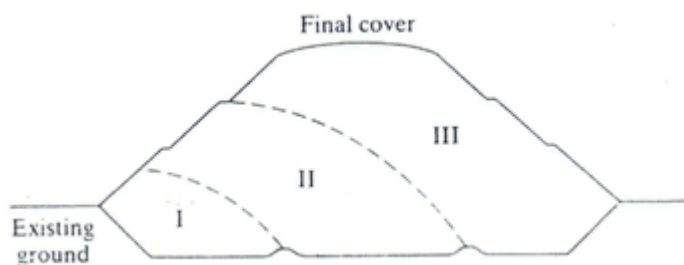
เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับที่ต่ำกว่าระดับดินเดิม โดยทำการขุดดินลึกลงไปให้ได้ระดับตามที่กำหนด แล้วจึงเริ่มบดอัดขยะมูลฝอยให้เป็นชั้นบางๆ ทับกันหนาขึ้นเรื่อยๆ จนได้ระดับของขยะมูลฝอยบดอัดแต่ละชั้นตามที่กำหนด โดยทั่วไปความลึกของการขุดร่องจะถูกกำหนดด้วยระดับน้ำใต้ดินคืออย่างน้อยระดับกันร่องควรอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 1 เมตร โดยยึดระดับน้ำในฤดูฝนเป็นเกณฑ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำชะขยะต่อน้ำใต้ดิน การฝังกลบแบบขุดร่องไม่จำเป็นต้องทำคันดิน เพราะสามารถใช้ผนังของร่องขุดเป็นกำแพงยันขยะมูลฝอยที่จะบดอัดได้ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องขุดดินจากนอกพื้นที่ฝังกลบและสามารถใช้ดินที่ขุดออกแล้วนั้นกลับมาใช้กลบขยะมูลฝอยได้อีก (กรมควบคุมมลพิษ, 2544) ลักษณะการฝังกลบแบบขุดร่อง แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method) (Qian et al., 2002)

2.2.3 การฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่อง (Area and Trench method)

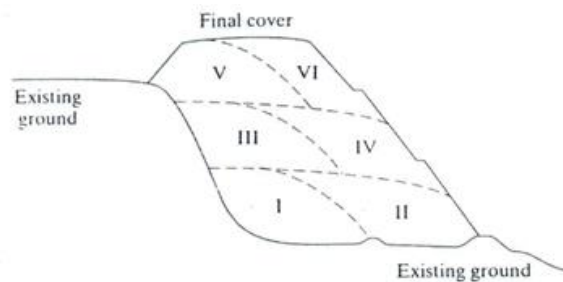
เป็นวิธีฝังกลบที่รวมการฝังกลบแบบพื้นราบและแบบขุดร่องเข้าด้วยกัน โดยการขุดดินนั้นจะขุดพื้นที่ขนาดใหญ่กว่าการฝังกลบแบบขุดร่อง แล้วจึงเริ่มบดอัดขยะมูลฝอยให้เป็นชั้นบางๆ ทับกันหนาขึ้นเรื่อยๆ จนได้ระดับของขยะมูลฝอยบดอัดแต่ละชั้นตามที่กำหนด โดยทั่วไปความลึกของการขุดพื้นที่จะขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นดินเหนียวธรรมชาติและระดับน้ำใต้ดิน สำหรับการฝังกลบไม่จำเป็นต้องทำคันดิน เพราะสามารถใช้ผนังของร่องขุดเป็นกำแพงยันขยะมูลฝอยที่จะบดอัดได้ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องขุดดินจากนอกพื้นที่ฝังกลบและสามารถใช้ดินที่ขุดออกกลับมาใช้กลบขยะมูลฝอยได้อีก ลักษณะการฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่องแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่อง (Area and Trench method) (Qian et al., 2002)

2.2.4 การฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon method)

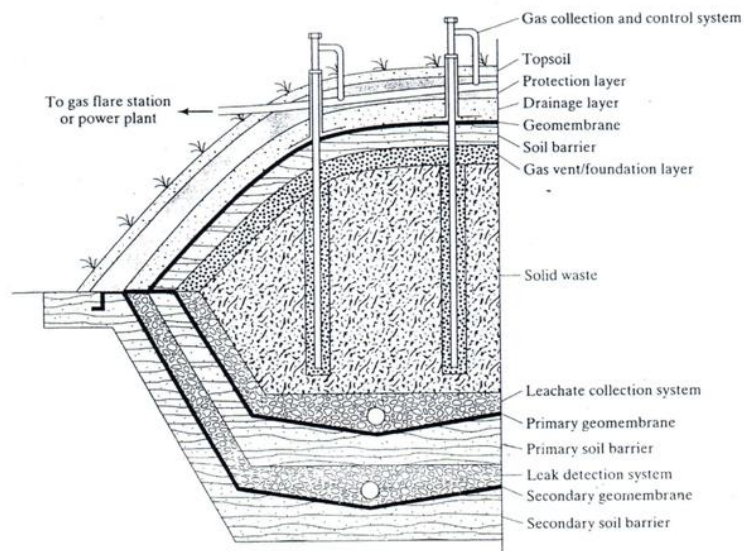
เป็นวิธีฝังกลบบนพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งขนาดใหญ่ซึ่งอาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการขุด เช่น หุบเขา ห้วย บ่อ เหมือง เป็นต้น วิธีการในการฝังกลบและอัดขยะมูลฝอยในบ่อแต่ละแห่งอาจแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศของพื้นที่นั้นๆ เช่น ถ้าพื้นที่ของบ่อมีสภาพค่อนข้างราบอาจใช้วิธีการฝังกลบแบบพื้นราบหรือแบบขุดร่องแล้วแต่กรณี ในการฝังกลบนั้นจะต้องมีการปรับพื้นที่ให้เสมอกันเพื่อให้สามารถปูชั้นกันซึมได้สะดวก และเนื่องจากเป็นบ่อโล่งจึงอาจจำเป็นต้องหาวัสดุดินมาเตรียมไว้เพื่อกลบทับ ลักษณะการฝังกลบแบบหุบเขาแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon method) (Qian et al., 2002)

2.3 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill components)

ในการออกแบบบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยหรือขยะอันตรายนั้นส่วนสำคัญที่จะพิจารณาคือการห่อหุ้มบ่อฝังกลบที่สามารถทำหน้าที่แยกขยะมูลฝอยออกจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบและป้องกันการรั่วไหลของน้ำชะขยะ ป้องกันการแทรกซึมของปริมาณน้ำฝนและควบคุมการเกิดก๊าซได้ ส่วนประกอบที่สำคัญของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยคือระบบชั้นกันซึม (Liner system) ระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate collection and removal system) ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซ (Gas collection and control system) และระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final cover system) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

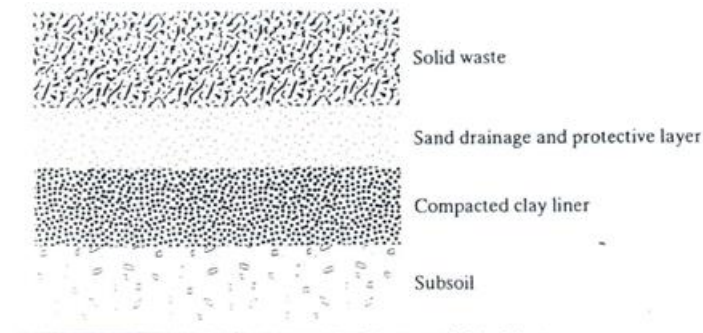


รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Qian et al., 2002)

2.3.1 ระบบชั้นกันซึม (Liner system)

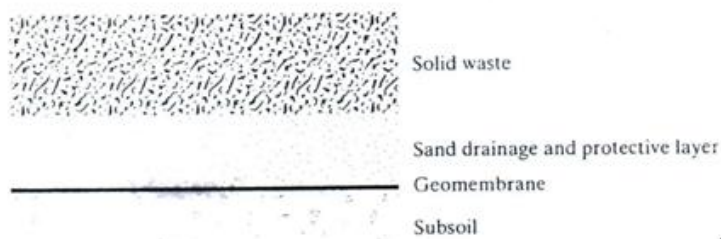
ชั้นกันซึม คือ ส่วนที่อยู่ล่างสุดและส่วนผนังของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ทำหน้าที่เป็นแนวกันเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของน้ำชะขยะลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำใต้ดินโดยรอบทั้งโดยการพา (Advective) และการแพร่ (Diffusive) ดังนั้นชั้นกันซึมต้องสร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม คือ มีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านทานน้ำหนักของขยะมูลฝอยจากการฝังกลบและทนต่อการกัดกร่อนจากการสัมผัสกับน้ำชะขยะมูลฝอยโดยตรง นอกจากนี้ชั้นวัสดุกันซึมนี้ต้องติดตั้งบนพื้นหรือสภาพทางธรณีวิทยาที่สามารถรองรับน้ำหนักกดจากน้ำหนักของขยะมูลฝอย และต้องติดตั้งให้ครอบคลุมพื้นที่โดยรอบทั้งหมดที่จะต้องสัมผัสกับขยะมูลฝอยหรือน้ำชะขยะมูลฝอยด้วย ชั้นกันซึมนี้อาจใช้ดินเหนียวบดอัด (Compacted clay) วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials) ประเภทแผ่นโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) หรือใช้ดินเหนียวร่วมกับวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetic) โดยทั่วไปการปูชั้นวัสดุกันซึมที่ผนังและก้นบ่อฝังกลบจะแบ่งออกเป็น 5 ประเภท (Qian et al., 2002) ดังนี้

1. ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดชั้นเดียว (Single Compacted Clay Liner) ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวบดอัด 1 ชั้นและมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย (Sand drainage and protective layer) อยู่ด้านบน และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไปแสดงดังรูปที่ 2.7



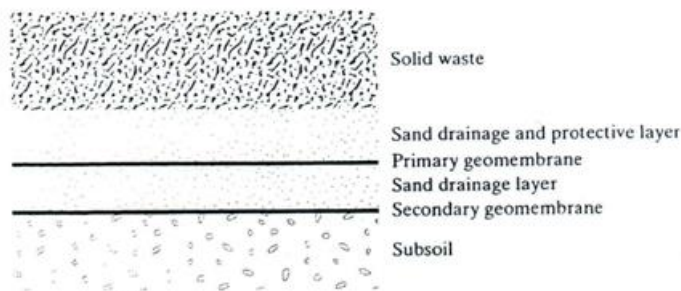
รูปที่ 2.7 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดชั้นเดียว (Single Compacted Clay Liner) (Qian et al., 2002)

2. ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนชั้นเดียว (Single Geomembrane Liner) ประกอบด้วย แผ่นจีโอเมมเบรน 1 แผ่น และมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอยอยู่ด้านบน และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไปแสดงดังรูปที่ 2.8



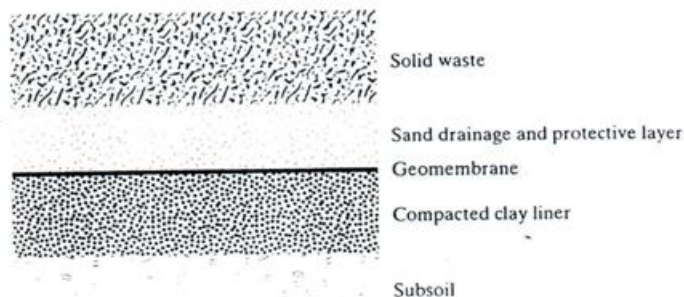
รูปที่ 2.8 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนชั้นเดียว (Single Geomembrane liner) (Qian et al., 2002)

3. ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนสองชั้น (Double Geomembrane Liner) ประกอบด้วย แผ่นจีโอเมมเบรน 2 แผ่น โดยระหว่างแผ่นจีโอเมมเบรนชั้นที่ 1 และ 2 จะถูกแทรกด้วยชั้นทรายระบายและด้านบนของแผ่นจีโอเมมเบรนแผ่นที่ 2 คือ ชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไปแสดงดังรูปที่ 2.9



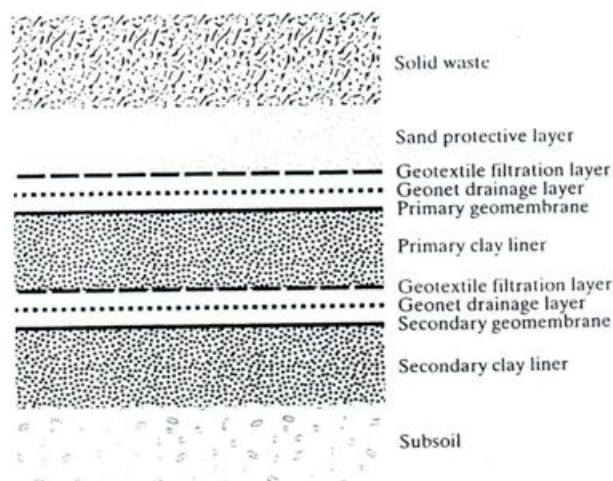
รูปที่ 2.9 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนสองชั้น)Double Geomembrane Liner((Qian et al., 2002)

4. ชั้นกันซึมผสมชั้นเดียว (Single Composite Liner) ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัด 1 ชั้นและปูทับหน้าด้วยแผ่นจีโอเมมเบรน 1 แผ่น ด้านบนของแผ่นจีโอเมมเบรนจะมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไปแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ชั้นกันซึมผสมชั้นเดียว)Single Composite Liner((Qian et al., 2002)

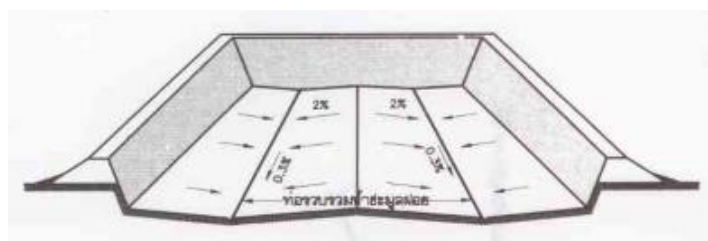
5. ชั้นกันซึมผสมสองชั้น (Double Composite Liner) เริ่มต้นจากด้านล่างในรูปที่ 2.11 ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัดชั้นที่ 2 และแผ่นจีโอเมมเบรนแผ่นที่ 2 ปูทับด้วยแผ่นจีโอเน็ต (Geonet) และแผ่นจีโอเท็กซ์ไทล์ (Geotextile) ทำหน้าที่เป็นชั้นกรอง จากนั้นปูทับด้วยชั้นดินเหนียวบดอัด แผ่นจีโอเน็ต และแผ่นจีโอเท็กซ์ไทล์ (Geotextile) ตามลำดับ และจะมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอยอยู่ด้านบน



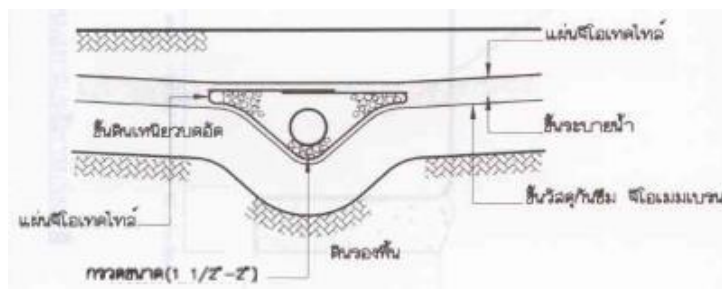
รูปที่ 2.11 ชั้นกันซึมผสมสองชั้น (Double Composite Liner) (Qian et al., 2002)

2.3.2 ระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate Collection and Removal System)

การออกแบบบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่มีชั้นวัสดุกันซึมเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะมูลฝอยไปปนเปื้อนชั้นน้ำใต้ดิน ระบบรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอยจึงต้องสร้างจากวัสดุที่มีความทนทานทางเคมีจากน้ำชะขยะมูลฝอย และแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันการพังทลายภายใต้แรงดันที่เกิดจากการกองทับของขยะมูลฝอย วัสดุกลบทับ และเครื่องจักรกลที่ใช้ในการฝังกลบ ระบบรวบรวมน้ำชะขยะนี้จะวางตัวอยู่เหนือชั้นวัสดุกันซึม ประกอบด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 4 นิ้วเจาะรู หุ้มด้วยแผ่นกรองใยสังเคราะห์และวางในชั้นกรวดหรือชั้นทรายอนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity) ไม่น้อยกว่า 1×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที และมีความหนาไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร ระยะห่างและความลาดเอียงของท่อรวบรวมน้ำชะขยะมูลฝอยนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันน้ำชะขยะมูลฝอยที่ยอมให้เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะไม่เกิน 30 เซนติเมตร นอกจากนี้การออกแบบท่อรวบรวมน้ำชะขยะมูลฝอยจะต้องมีวิธีการทดสอบการอุดตันและวิธีทำความสะอาดท่อ (ดูรูปที่ 2.12)



(ก)



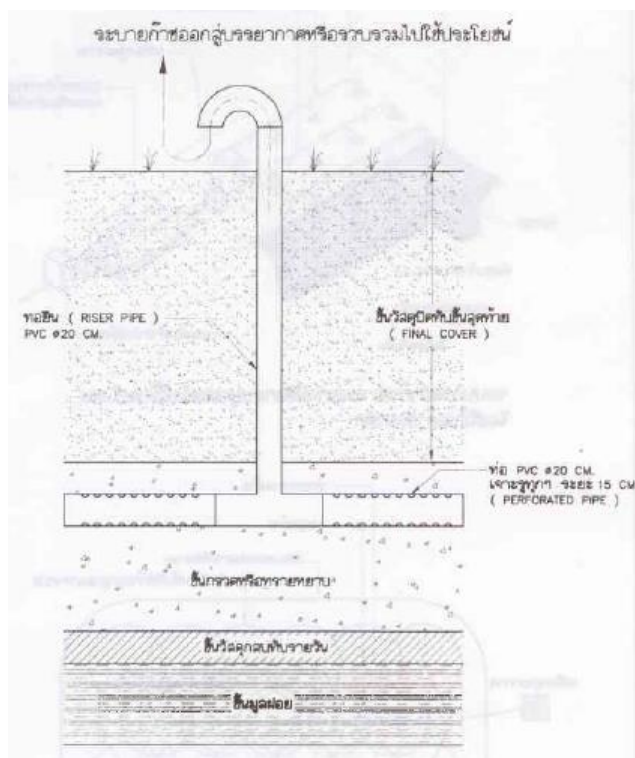
(ข)

รูปที่ 2.12 (ก) ระบบรวบรวมน้ำชะขยะ และ (ข) รายละเอียดของท่อรวบรวมน้ำชะขยะ

(กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

2.3.3 ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซ (Gas collection and control system)

การเน่าเปื่อยของขยะมูลฝอยสามารถทำให้เกิดก๊าซปริมาณมาก ก๊าซที่เกิดขึ้นในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 2 ชนิดที่สำคัญ คือ ก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซจะถูกใช้เพื่อเก็บรวบรวมก๊าซในบ่อฝังกลบในระหว่างการเน่าเปื่อยของขยะมูลฝอยที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังป้องกันการระเบิดและไฟไหม้และป้องกันกลิ่นเหม็นรบกวน ก๊าซในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยสามารถใช้ในการสร้างพลังงานหรือเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้ ตัวอย่างท่อระบายก๊าซจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยแสดงดังรูปที่ 2.13 ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซจากบ่อฝังกลบ แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ



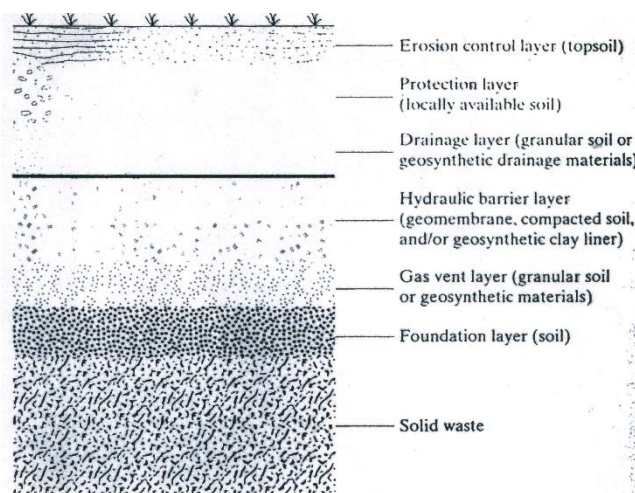
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างท่อระบายก๊าซจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

1. การวางท่อหรือบ่อระบายก๊าซในแนวนอนหรือแนวตั้งของบ่อฝังกลบเพื่อลดแรงดันของก๊าซและระบายสู่บรรยากาศโดยธรรมชาติเรียกว่า Passive control ซึ่งการวางตำแหน่งระยะห่างของท่อหรือท่อในแนวตั้งโดยทั่วไปใช้ระยะประมาณ 30-40 เมตร

2. การวางท่อในแนวตั้งและติดตั้งอุปกรณ์ดูดก๊าซจากบ่อฝังกลบเรียกว่า Active control การวางท่อโดยวิธีนี้มักมีจุดมุ่งหมายที่จะนำก๊าซที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่มีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นมากหรือใช้กำจัดก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการเผาไหม้ (Flaring) ทั้งนี้ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศด้วย

2.3.4 ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final Cover System)

ระบบปิดทับชั้นสุดท้ายซึ่งถูกสร้างโดยตรงที่ด้านบนของขยะมูลฝอยที่ถูกถม รายละเอียดของระบบปิดทับชั้นสุดท้ายแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยทั่วไปส่วนประกอบภายในระบบปิดทับชั้นสุดท้ายประกอบด้วยชั้นป้องกันการกัดเซาะ (Erosion control layer) ชั้นป้องกัน (Protection layer) ชั้นระบาย (Drainage layer) ชั้นกันซึม (Hydraulic barrier layer) ชั้นระบายก๊าซ (Gas vent layer) และชั้นดินกลบทับ (Foundation layer) ส่วนประกอบดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องอยู่ในระบบปิดทับสุดท้ายทั้งหมด เช่น ชั้นระบายก๊าซอาจต้องการสำหรับบางระบบปิดทับชั้นสุดท้ายเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าขยะมูลฝอยนั้นต้องการผลิตก๊าซหรือรวบรวมและกำจัด



รูปที่ 2.14 รายละเอียดของระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Qian et al., 2002)

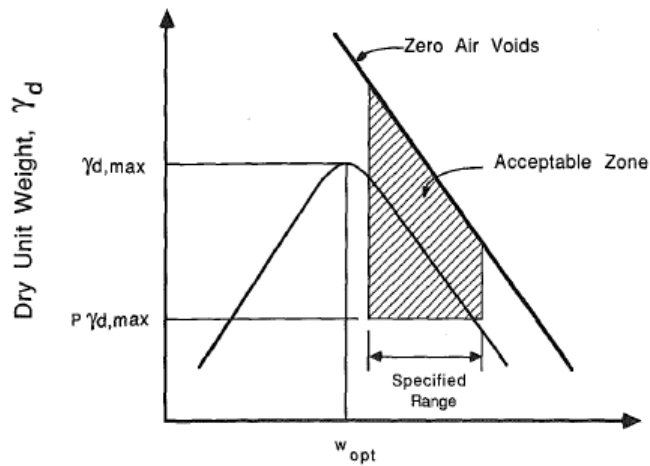
2.4 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted Clay Liner)

ชั้นกันซึม (Liner) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างสุดของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะมูลฝอยลงสู่ใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติใกล้เคียง ดินเหนียวบดอัดมักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยและกักเก็บของเสีย ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวมีคุณสมบัติในการระบายน้ำต่ำ นอกจากนี้ประจุลบที่อยู่ในอนุภาคของดินเหนียวยังสามารถห่อหุ้มประจุบวกของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำชะขยะได้ หน่วยงานที่ควบคุมดูแลส่วนใหญ่ต้องการออกแบบให้ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted clay liner) และชั้นปิดทับ (Cover) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที เพื่อกักเก็บของเสียอันตราย (Hazardous waste) ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial waste) และขยะมูลฝอยจากชุมชน (Municipal solid waste)

นอกจากนี้สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐหรืออีพีเอ (Environmental Protection Agency, EPA) แนะนำว่าวัสดุดินที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบจะต้องมีคุณสมบัติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที, ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index, PI) มากกว่า 10% แต่ต้องไม่เกิน 30-40%, เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมหยาบหรือก้อนกรวดน้อยกว่า 10% และขนาดอนุภาคใหญ่สุดไม่เกิน 2 นิ้ว

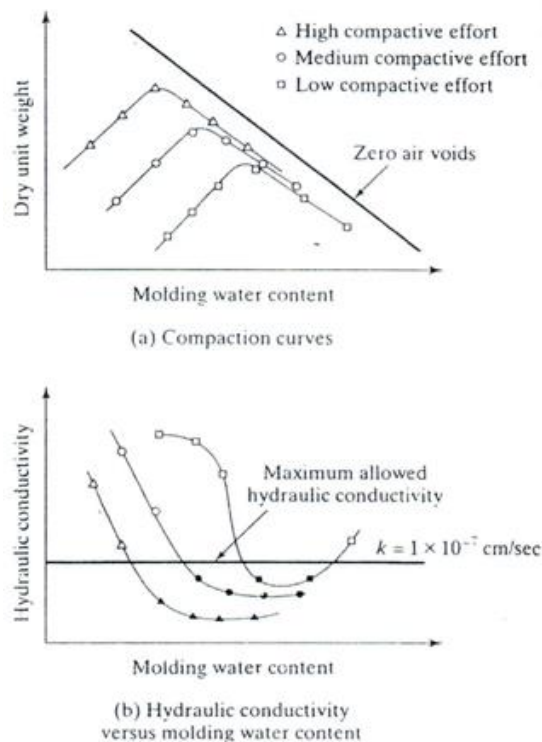
2.4.1 การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดในอดีต

ในอดีตขอบเขตที่ยอมรับได้สำหรับการบดอัดชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะมักถูกกำหนดด้วยช่วงของปริมาณความชื้นในการบดอัดและค่าหน่วยน้ำหนักชั้นต่ำ ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งพัฒนามาจากข้อกำหนดของการบดอัดถนน ดินถม และเขื่อนดิน จากงานวิจัยของ Herrmann and Elsbury (1987) พบว่าโดยส่วนใหญ่ นักออกแบบมักต้องการค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเหนียวบดอัดมากกว่าหรือเท่ากับ 95% ของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry, max}$) จากการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard Proctor, ASTM D-698) หรือ 90% ของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจากการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor, ASTM D-1557) และช่วงที่ยอมรับได้ของปริมาณความชื้นสำหรับชั้นดินกันซึมและชั้นปิดทับ โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 0-4% ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Wet of optimum) ของการบดอัดดินแบบมาตรฐานหรือการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน เนื่องจากการบดอัดที่ด้านเปียกจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำลง (Lambe, 1958; Mitchell et al., 1965; Boynton และ Deniel, 1985)



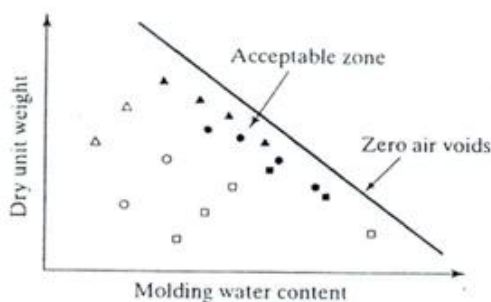
รูปที่ 2.15 ขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมสำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Daniel and Benson, 1990)

Mitchell et al. (1965) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวบดอัด พบว่าพลังงานและวิธีการบดอัดมีอิทธิพลที่สำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวบดอัด กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



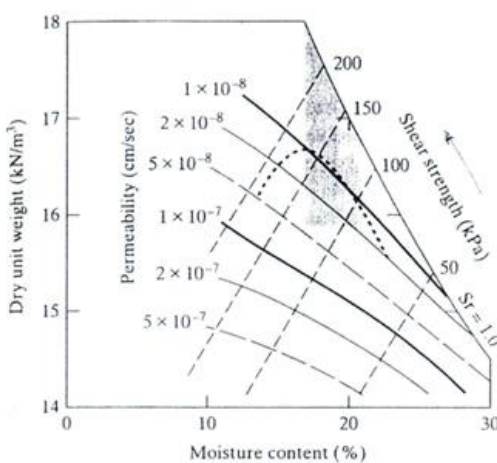
รูปที่ 2.16 ผลกระทบของพลังงานการบดอัดต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน (Daniel and Benson, 1990)

ข้อมูลการบดอัดจากรูปที่ 2.16 ถูกนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ใหม่โดย Daniel and Benson (1990) ดังรูปที่ 2.17 โดยกำหนดให้ใช้สัญลักษณ์โป่งสำหรับตัวอย่างดินบดอัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และใช้สัญลักษณ์ทึบสำหรับตัวอย่างดินบดอัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที พื้นที่ที่แรเงาในรูปที่ 2.17 แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ซึ่งพบว่ารูปร่างของขอบเขตที่ยอมรับได้ในรูปที่ 2.17 มีความแตกต่างจากรูปที่ 2.16 โดยสิ้นเชิง (Daniel and Benson, 1990)



รูปที่ 2.17 กราฟการบดอัดใหม่โดยใช้สัญลักษณ์ทึบสำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ (Daniel and Benson, 1990)

Boutwell and Hedges (1989) ได้สร้างเส้นชั้นความสูง (Contour) ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและกำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินเหนียวบดอัด ดังรูปที่ 2.18 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั่วไปในรูปที่ 2.18 จะใช้ที่ 95% ของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานและขอบเขตที่ยอมรับได้สำหรับปริมาณความชื้นจะใช้ที่ 0-4% ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม พบว่าทุกพิภคของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่อยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที แต่รูปร่างและขอบเขตที่ยอมรับได้ในรูปที่ 2.18 กลับไม่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและกำลังรับแรงเฉือน



รูปที่ 2.18 เส้นชั้นความสูงสำหรับค่าคงที่ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm/sec) และกำลังรับแรงเฉือน (kPa) (Boutwell and Hedges, 1989)

ผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการบดอัดดินแบบดั้งเดิมเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมในการแบ่งแยกระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่สอดคล้องกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่สอดคล้องกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที

อย่างไรก็ตามไม่เพียงแต่กำลังรับแรงเฉือนและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่านั้นที่เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดและชั้นปิดทับในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย วิศวกรมีความจำเป็นต้องพิจารณาพารามิเตอร์อื่นร่วมด้วย ได้แก่ (1) ศักยภาพของการแตกแห้ง (Potential for desiccation) (2) การต้านทานการบุกรุกของสารเคมี (Resistance to chemical attack) (3) แรงเสียดทานของผิวสัมผัสในการวางจีโอเมมเบรน (Interfacial friction with overlying geomembranes) และ (4) ความสามารถในการเสียรูปโดยปราศจากการแตกร้าวในระหว่างการทรุดตัว (Ability to deform without cracking during settlement)

2.4.2 การพิจารณาการบดอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

สิ่งที่สำคัญในการก่อสร้างชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดเพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำคือ กระบวนการบดอัดดินที่เหมาะสม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง ปริมาณความชื้น และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ใช้สำหรับการออกแบบและควบคุมการก่อสร้างชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การทดสอบการบดอัดดินและการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

2.4.2.1 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test)

การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดจะถูกต้องและเหมาะสมมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของดินแต่ละชนิด ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนามมักจะมีผลสอดคล้องกับเงื่อนไขการก่อสร้างจริงของบ่อฝังกลบขยะโดยตรงเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การกำหนดเกณฑ์การบดอัดโดยการเลือกใช้ข้อมูลจากการทดสอบการบดอัดในสนามมักมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ด้วยเหตุนี้วิศวกรผู้ออกแบบจึงมักเลือกใช้ข้อมูลการบดอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการกำหนดเกณฑ์การบดอัดแทน อย่างไรก็ตามการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัดคือไม่สามารถจำลองพลังงานในการบดอัดให้เหมือนกับการวิ่งผ่านของเครื่องจักรหนักในการบดอัดในสนามได้ และจากพลังงานการบดอัดในสนามที่ไม่สามารถคาดเดาได้ส่งผลให้ยากที่จะอธิบายด้วยการทดสอบเพียงพลังงานเดียวของการบดอัดในห้องปฏิบัติการได้ ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้พลังงานการบดอัดหลายพลังงานในการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อให้สอดคล้องกับช่วงพลังงานที่คาดการณ์ในการบดอัดดินในสนาม

การทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปมี 2 ประเภท คือ การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard Proctor test, ASTM D698) และการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test, ASTM D1557) ทั้งสองการทดสอบใช้โมลขนาดเดียวกัน คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (100 มิลลิเมตร) และสูง 4.5 นิ้ว (120 มิลลิเมตร) ความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานและการทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน คือพลังงานที่ใช้ในการบดอัด ได้แก่ 12,380 lb-ft/ft³ และ 56,250 lb-ft/ft³ ตามลำดับ โดยการบดอัดแบบมาตรฐานทดสอบโดยใช้ค้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ (24 นิวตัน) ระยะยก 12 นิ้ว (300 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานทดสอบโดยใช้ค้อนมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ (45 นิวตัน) ระยะยก 18 นิ้ว (460 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 5 ชั้นเท่าๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น พลังงานในการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าประมาณ 4 เท่าของพลังงานในการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

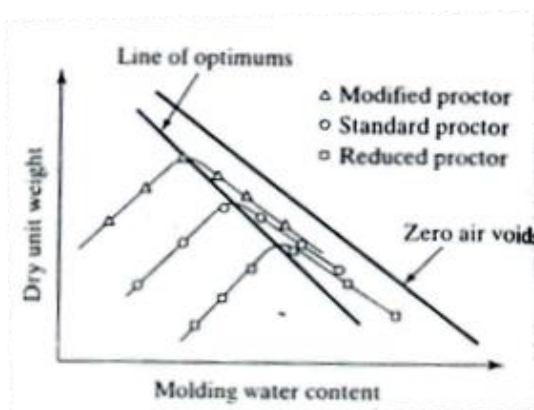
เพื่อให้ช่วงของพลังงานการบดอัดกว้างขึ้น Daniel and Benson (1990) ได้พัฒนาวิธีการทดสอบการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced Proctor test) ขึ้น ซึ่งทำการทดสอบเช่นเดียวกับการบดอัดดินแบบมาตรฐาน คือทดสอบโดยใช้ค้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ (24 นิวตัน) ระยะยก 12 นิ้ว (300 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน แต่บดอัดดิน 15 ครั้งต่อชั้น ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดการทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 ประเภท

ตารางที่ 2.1 การทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 ประเภท

ชนิดของการทดสอบ	น้ำหนักของค้อน		ระยะยก		จำนวนชั้น	จำนวนครั้งต่อชั้น	พลังงาน	
	ปอนด์ (lb)	นิวตัน (N)	นิ้ว (inch)	มิลลิเมตร (mm)			lb-ft/ft ³	kN-m/m ³
การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	10	45	18	450	5	25	56,250	2,690
การบดอัดแบบมาตรฐาน	5.5	24	12	300	3	25	12,380	590
การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน	5.5	24	12	300	3	15	7,430	360

สำหรับการก่อสร้างบ่อฝังกลบในสนามมีแนวคิดพื้นฐานในการใช้การบดอัดดิน 3 พลังงานแทนช่วงพลังงานในการบดอัดที่คาดหวังในสนาม นั่นคือพลังงานในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานถือเป็นตัวแทนพลังงานในการบดอัดระดับสูงสุดในสนาม พลังงานในการบดอัดแบบมาตรฐานถือเป็นตัวแทนพลังงานในการบดอัดระดับกลางในสนาม และพลังงานในการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐานถือเป็นตัวแทนพลังงานในการบดอัดระดับต่ำสุดสำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดและชั้นปิดทับทั่วไป

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน 3 พลังงานแสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งได้จากการเตรียมตัวอย่างดินประมาณ 4-6 ตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันและทำการบดอัดดินในโมลที่ทราบปริมาตรโดยใช้ขั้นตอนในการบดอัดเดียวกัน ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight, γ_{dry}) และปริมาณความชื้น (Water content, w) ของแต่ละตัวอย่างที่บันทึกได้จะถูกนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น เรียกว่ากราฟการบดอัดดิน (Compaction curve) ค่าสูงสุดของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเรียกว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry, max}$) ปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเรียกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content, OWC)



รูปที่ 2.19 กราฟการบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, การบดอัดแบบมาตรฐาน และการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Qian et al., 2002)

2.4.2.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Permeability test)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of permeability or Hydraulic conductivity) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสัดส่วนระหว่างอัตราการไหล (Flow rate) และความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ในกฎของดาร์ซี (Darcy's law) ดังสมการที่ (2.1)

$$q = k \cdot i \cdot A = k \cdot \left(\frac{\Delta H}{L} \right) \cdot A \quad (2.1)$$

เมื่อ q = อัตราการไหล (cm^3/sec)

k = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm/sec)

$$i = \text{ความชันทางชลศาสตร์} = \frac{\Delta H}{L}$$

ΔH = การสูญเสียเฮดตลอดดินตัวอย่าง (cm)

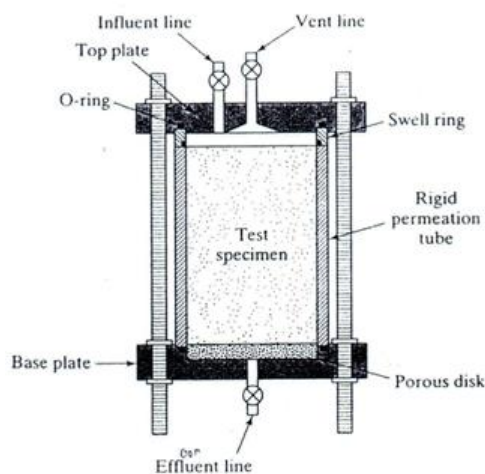
L = ความยาวของตัวอย่าง (cm)

A = พื้นที่หน้าตัดของดินตัวอย่างตั้งฉากกับทิศทางของการไหล (cm²)

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของตัวอย่างดินเหนียวบดอัดในห้องปฏิบัติการมีด้วยกัน 2 วิธี คือการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head permeability test) และแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลง (Falling head permeability test) อุปกรณ์ที่นิยมใช้ทดสอบโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็ง (Rigid wall permeameter, ASTM D2434) และชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่น (Flexible wall permeameter, ASTM D5084) สำหรับชุดทดสอบแบบผนังแข็งสามารถใช้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำคงที่หรือแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนชุดทดสอบแบบผนังยืดหยุ่นมักใช้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำคงที่

รายละเอียดของชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็งแสดงดังรูปที่ 2.20 ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกที่ทำจากโลหะหรือพลาสติกสำหรับบรรจุตัวอย่างทดสอบ แต่หากทำการทดสอบการซึมผ่านของสารเคมีหรือน้ำชะขยะควรใช้ท่อแก้วทรงกระบอกแทน ทิศทางการไหลของเหลวในการทดสอบสามารถควบคุมให้ไหลซึมผ่านจากด้านบนไปยังด้านล่างหรือด้านล่างไปยังด้านบนก็ได้ แต่การควบคุมการไหลจากด้านล่างไปยังด้านบนจะสามารถช่วยไล่หรือกำจัดก๊าซหรือฟองอากาศได้

ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็งมีข้อดี คือใช้งานง่าย ค่าใช้จ่ายถูก และเป็นเครื่องมือที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ แต่มีข้อเสีย คือมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการไหลซึมด้านข้างของกระบอกได้

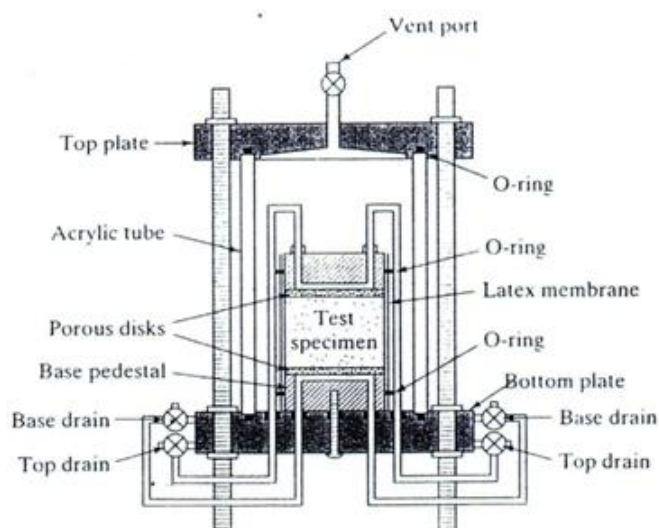


รูปที่ 2.20 ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็ง (Qian et al., 2002)

รายละเอียดของชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่นแสดงดังรูปที่ 2.21 โดยทั่วไปตัวอย่างทดสอบจะถูกเตรียมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.85 นิ้ว (72 มิลลิเมตร) และสูง 2-3 นิ้ว (50-75 มิลลิเมตร) ประกบด้วยแผ่นหินพรุนทั้งด้านบนและด้านล่างและหุ้มด้านข้างของตัวอย่างด้วยแผ่นยางเมมเบรนยืดหยุ่น (Flexible rubber membrane) ติดตั้งตัวอย่างในชุดทดสอบและให้ความดันย้อนกลับ (Back pressure) เพื่อทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ เติมน้ำในชุดทดสอบและรักษาความดันบรรยากาศภายในเพื่อลดแผ่นยางเมมเบรนยืดหยุ่นให้ติดกับตัวอย่างทดสอบเพื่อลดหรือขจัดคาร์โลซึมด้านข้าง

ภายหลังจากที่ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วจะทำการอัดตัวคายน้ำ (Consolidated) ภายใต้อุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปค่าความดันของการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation pressure) มักจะถูกกำหนดตามการคาดการณ์ค่าความดันกดทับในสนาม (Field over burden pressure) เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้วจะกำหนดความชันทางชลศาสตร์โดยใช้ความดันที่แตกต่างกันที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปมักกำหนดให้มีทิศทางการไหลซึมผ่านจากด้านล่างไปยังด้านบน และวัดอัตราการไหลจากปริมาณน้ำที่ไหลออกต่อเวลา

ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่นมีข้อดีหลายประการ คือสามารถขจัดปัญหาการไหลซึมด้านข้าง สามารถจำลองค่าความดันให้สอดคล้องกับค่าความดันในสนามได้ ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำ และใช้เวลาในการทดสอบน้อย แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายสูง การใช้งานซับซ้อนมาก ทดสอบที่ค่าความดันประสิทธิผล (Effective confining pressure) ต่ำมากไม่ได้ (อย่างน้อย 14 kPa เพื่อป้องกันการไหลซึมด้านข้าง) และแผ่นเมมเบรนจะถูกทำลายได้ง่ายเมื่อทำการทดสอบการซึมผ่านของสารเคมีหรือน้ำชะขยะ

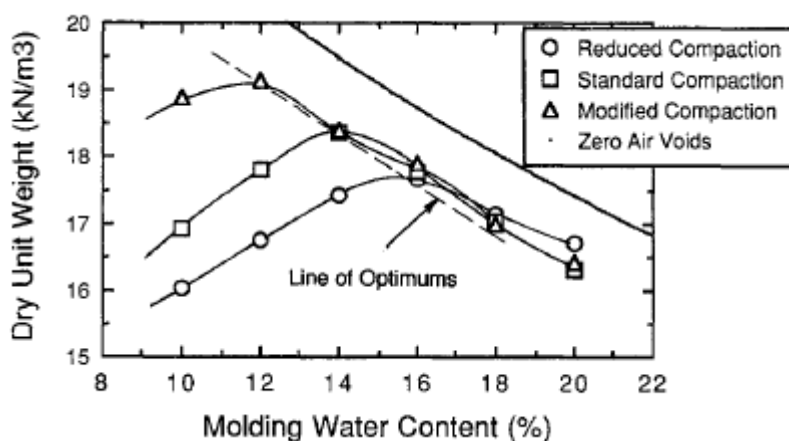


รูปที่ 2.21 ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่น (Qian et al., 2002)

2.4.3 การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Design of compacted clay liners)

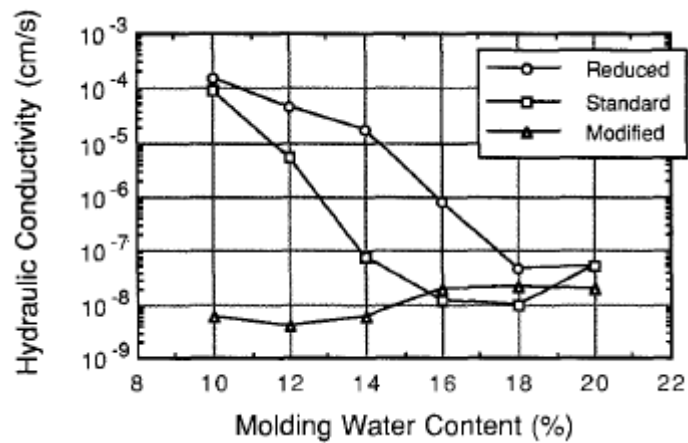
การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดที่ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำเพื่อป้องกันหรือลดการรั่วไหลของน้ำชะขยะ, มีกำลังรับแรงเฉือนเพียงพอเพื่อรองรับน้ำหนักของขยะมูลฝอยที่มากดทับ และมีการหดตัวน้อยเพื่อป้องกันการแตกแห้ง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด คือเพื่อวิเคราะห์หาช่วงของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งในการบดอัดดินให้มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ได้แก่ (1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที (2) มีค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) มากกว่าหรือเท่ากับ 200 kPa และ (3) มีค่าความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) ไม่มากกว่า 4% (Daniel and Benson, 1990) การสร้างขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดสามารถทำได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ทำการบดอัดดินตัวอย่างด้วยพลังงาน 3 พลังงาน ได้แก่ การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน การบดอัดดินแบบมาตรฐาน และการบดอัดดินแบบต่ำกว่ามาตรฐาน จากนั้นนำผลการบดอัดไปสร้างกราฟการบดอัดเพื่อหาค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง ดังรูปที่ 2.22



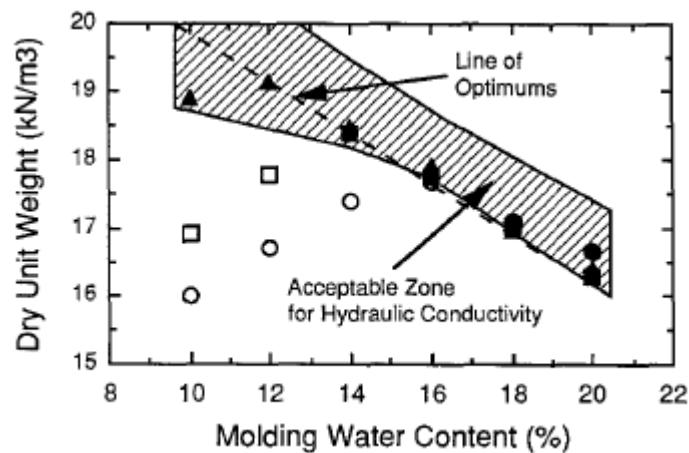
รูปที่ 2.22 กราฟการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน (Daniel and Wu, 1993)

2. เตรียมตัวอย่างดินบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆ ในกราฟการบดอัดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในข้อ 1 ทุกๆ พลังงานเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุด ดังรูปที่ 2.23

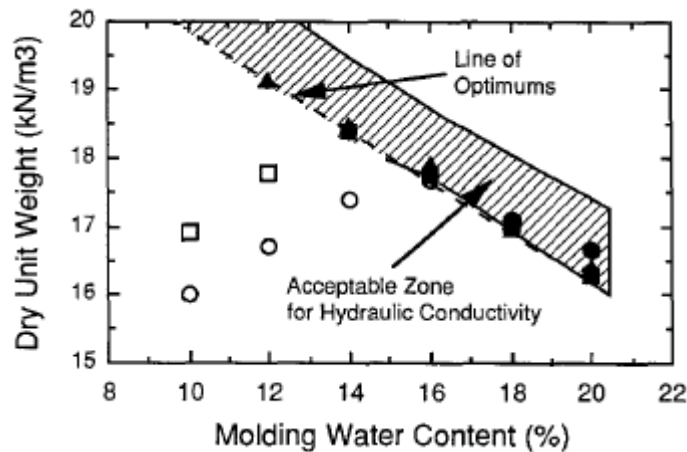


รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและปริมาณความชื้น (Daniel and Wu, 1993)

3. ทำการวาดกราฟการบดอัดใหม่ ดังรูปที่ 2.24 โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บสำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที พื้นที่ที่แรเงาในรูปที่ 2.24 แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ อย่างไรก็ตาม Benson et al. (1999) พบว่าเมื่อใช้ปริมาณความชื้นต่ำกว่าเส้นความชื้นเหมาะสม (Line of optimum) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินตัวอย่างจะมีค่ามากกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ด้วยเหตุนี้จึงแนะนำว่าการบดอัดที่ดีควรใช้ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าเส้นความชื้นเหมาะสม ดังนั้นจึงทำการปรับกราฟในรูปที่ 2.24 โดยตัดส่วนที่อยู่ต่ำกว่าเส้นความชื้นเหมาะสมออกจะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใหม่แสดงดังรูปที่ 2.25



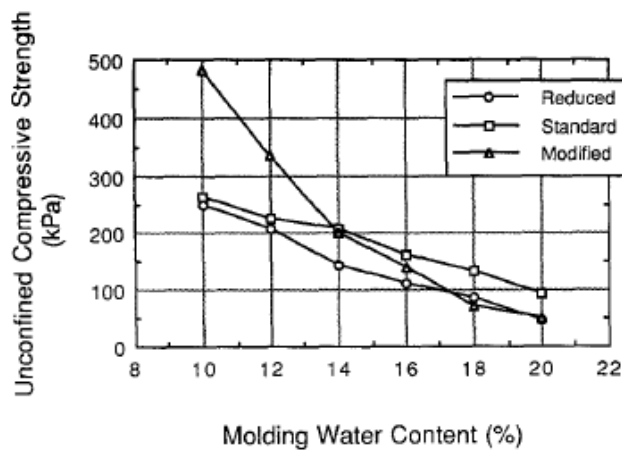
รูปที่ 2.24 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Daniel and Wu, 1993)



รูปที่ 2.25 ปรับแก้ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

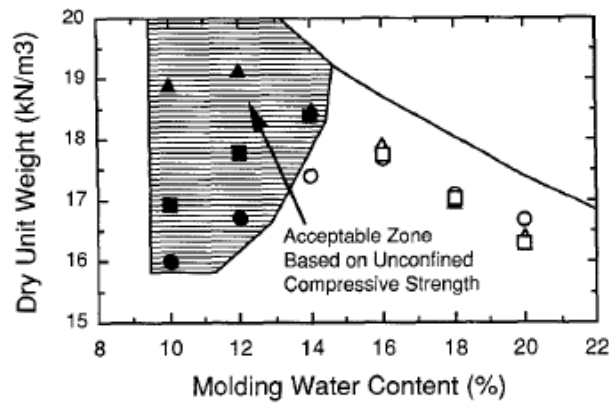
(Daniel and Wu, 1993)

4. ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว โดยการเตรียมตัวอย่างดินบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆ ในกราฟการบดอัดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในข้อ 1 ทุกๆ พลังงานและนำผลการทดสอบที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้นแสดงดังรูปที่ 2.26



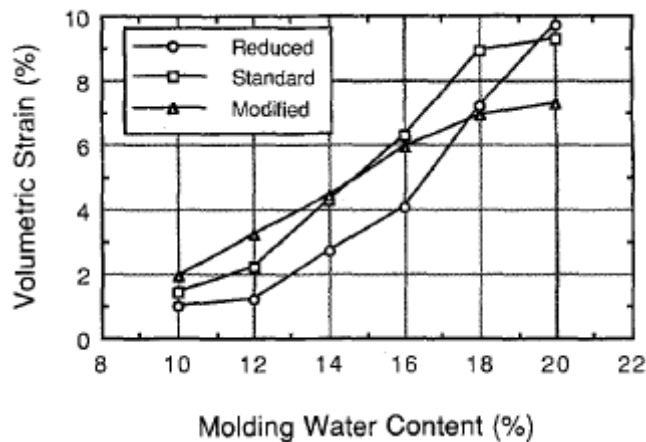
รูปที่ 2.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้น (Daniel and Wu, 1993)

5. สร้างกราฟการบดอัดใหม่ ดังรูปที่ 2.27 โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บสำหรับตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวมากกว่าหรือเท่ากับ 200 kPa และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวน้อยกว่า 200 kPa พื้นที่ที่แรเงาแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียว



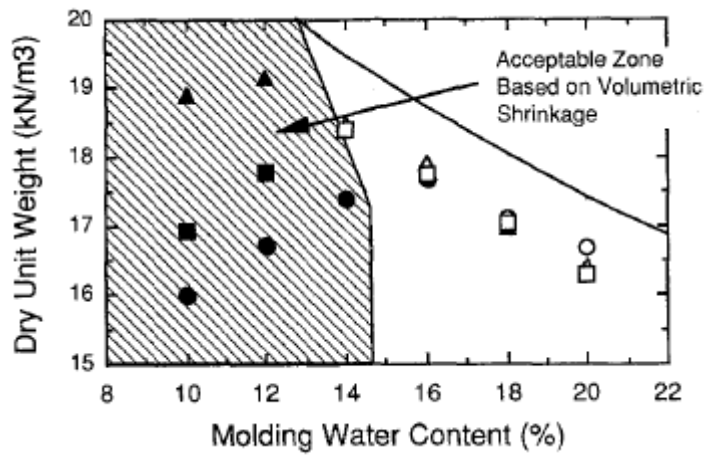
รูปที่ 2.27 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Daniel and Wu, 1993)

6. ทำการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร โดยการเตรียมตัวอย่างดินบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆ ในกราฟการบดอัดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในข้อ 1 ทุกๆ พลังงาน ทำการทดสอบโดยวางตัวอย่างดินทิ้งไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกและควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ดินสูญเสียความชื้น จากนั้นทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างดินทุกๆ 12 ชั่วโมงจนกระทั่งตัวอย่างดินมีปริมาตรคงที่ (Daniel and Wu, 1993) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรและปริมาณความชื้น ดังรูปที่ 2.28



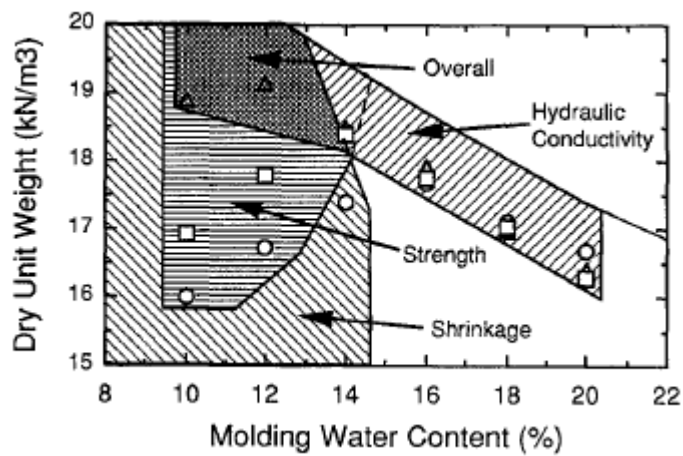
รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรและปริมาณความชื้น (Daniel and Wu, 1993)

7. สร้างกราฟการบดอัดใหม่ โดยใช้สัญลักษณ์แบบทึบสำหรับตัวอย่างที่มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4% และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 4% พื้นที่ที่แรเงาในรูปที่ 2.29 แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร



รูปที่ 2.29 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Daniel and Wu, 1993)

8. นำขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (รูปที่ 2.25, 2.27 และ 2.29) มาซ้อนทับกัน บริเวณที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งสามรูปซ้อนทับกัน คือขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) (Daniel and Wu, 1993)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยออกแบบระเบียบวิธีการวิจัยของโครงการวิจัยโดยเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาความเป็นไปได้และการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลชายฝั่งที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง มาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล และสามารถแบ่งงานได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้ (รูปที่ 3)

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง โดยทำการทดสอบดังนี้

- 1.1 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test: ASTM D854)
- 1.2 ทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว (Atterberg limit test: ASTM D4318, D427) ได้แก่ ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index) ของดินตะกอนทะเล และจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System, USCS (ASTM D2488)
- 1.3 ทดสอบหาขนาดคละของมวลดิน (Grain size analysis (Sieve wash): ASTM D422-63)

ส่วนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลผสมเถ้าลอย โดยแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห่งระหว่างดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอย คือ 0% และ 20% และระยะเวลาการบ่มที่ 0 7 และ 28 วันตามมาตรฐานการออกแบบหรือข้อกำหนดของกรมควบคุมมลพิษ (2544) Daniel and Benson (1990) และ Daniel and Wu (1993) โดยครอบคลุมการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมต่างๆ ดังนี้

- 2.1 การทดสอบการบดอัดดิน 3 พลังงาน ได้แก่ ทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor test: ASTM D1557) ทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard proctor test: ASTM D698) และทดสอบการบดอัดดินแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced proctor test: Daniel and Benson (1990)) ผลการทดสอบการบดอัดดินที่ได้จะถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาหาขอบเขตที่ยอมรับได้และบดอัดดินตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบในข้อ 2.2-2.4
- 2.2 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุด (Hydraulic conductivity, k) โดยใช้วิธีการทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test: ASTM D2435-96)
- 2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compression test: ASTM D2166)

2.4 การทดสอบหาค่าความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain test: Daniel and Wu, 1993)

หมายเหตุ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบข้อที่ 2.2-2.4 ถูกเตรียมโดยการบดอัดดินทั้ง 3 พลังงานที่ค่าความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่างๆ ในกราฟการบดอัดดินที่ได้จากการทดสอบข้อที่ 2.1

ส่วนที่ 3 ประมวลผลการทดสอบที่ได้จากส่วนที่ 1 และ 2 เพื่อพิจารณาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำดินตะกอนทะเลมาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล โดยการสร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินตะกอนทะเลกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone for compacted clay liner) เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างชั้นวัสดุกันซึมโดยเปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์

3.2 รายละเอียดการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction)

การทดสอบการบดอัดจะใช้พลังงานบดอัด 3 พลังงาน ได้แก่ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การบดอัดแบบมาตรฐาน และการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน โดยทำการบดอัดตัวอย่างดินด้วย Mechanical Compactor เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบ และทำการเทียบสอบ Mechanical Compactor ตามมาตรฐาน ASTM D2168 (Method A)

การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จะทำการบดอัดดินตัวอย่างในกระบอกบดอัดมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร) โดยใช้ค้อนมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ (45 นิวตัน) ระยะยก 18 นิ้ว (460 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 5 ชั้นเท่าๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น

การบดอัดแบบมาตรฐาน จะทำการบดอัดดินตัวอย่างในกระบอกบดอัดมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร) โดยใช้ค้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ (24 นิวตัน) ระยะยก 12 นิ้ว (300 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น

การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน จะทำการบดอัดดินตัวอย่างในกระบอกบดอัดมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (101.6 มิลลิเมตร) โดยใช้ค้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ (24 นิวตัน) ระยะยก 12 นิ้ว (300 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่าๆ กัน แต่บดอัดดิน 15 ครั้งต่อชั้น

การบดอัดดินด้วยพลังงาน 3 พลังงานเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในการสร้างกราฟการบดอัดและใช้เตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

3.2.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity)

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใช้วิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) (ตามมาตรฐาน ASTM D 2435-96 โดยนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นจากข้อที่ 3.4 แล้วนำไปบรรจุถุงพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นนำดินตัวอย่างไปบดอัดในวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตรด้วยพลังงานการบดอัดดังกล่าวมาแล้วข้างต้น แล้วนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบแล้วแขวนน้ำหนัก 0.5 1 2 และ 5 kg เมื่อสิ้นสุดการให้น้ำหนักจึงนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่อไป

3.2.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเป็นการทดสอบหากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยให้แรงกดในแนวตั้งต่อตัวอย่างโดยไม่มีแรงดันทางด้านข้างตามมาตรฐาน ASTM D2166 โดยนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นจากข้อที่ 3.4 แล้วนำไปบรรจุถุงพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นบดอัดตัวอย่างดินด้วยพลังงานบดอัดทั้ง 3 พลังงานในกระบอกบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร เสร็จแล้วดันตัวอย่างดินออกจากกระบอก แล้วนำเข้าเครื่องทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียวต่อไป โดยก่อนทำการทดสอบวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่าง และให้แรงกดที่อัตราการกดคงที่ที่ 0.05 in/min จากนั้นนำผลการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียวซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการกดตัวอย่าง 3 ก้อนที่สัดส่วนผสมเดียวกัน

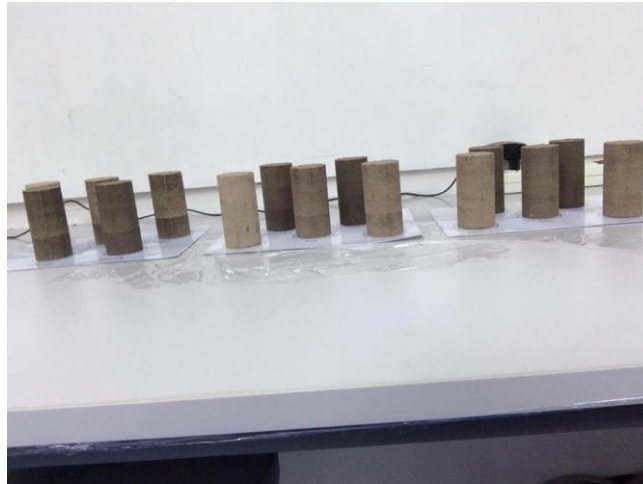


รูปที่ 3.1 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

3.2.4 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage)

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ตาม Daniel and Wu (1993) สามารถทดสอบได้โดยนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นจากข้อที่ 3.4 แล้วนำไปบรรจุถุงพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นบดอัดตัวอย่างดินด้วยพลังงานบดอัดทั้ง 3 พลังงานจากนั้น

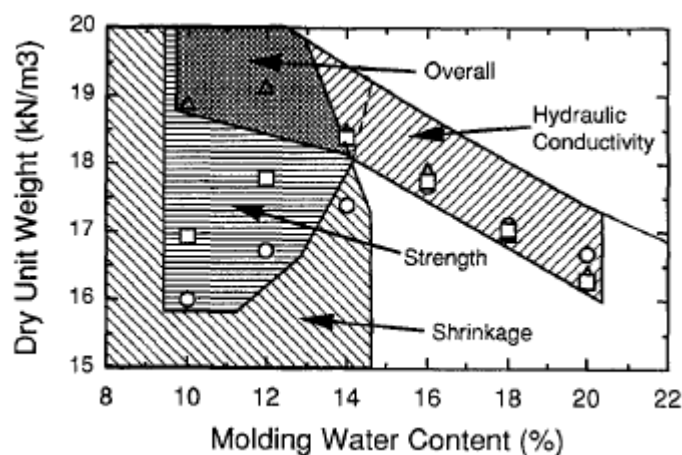
ดินตัวอย่างดินออกจากกระบอบอัดแล้ววางทิ้งไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกและควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างดินทุกๆ 12 ชั่วโมง จนกระทั่งตัวอย่างมีปริมาตรคงที่ แล้วนำผลการทดสอบที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต่อไป



รูปที่ 3.2 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

3.2.5 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone)

เพื่อประเมินความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson และ Daniel and Wu ที่กำหนดขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดภายใต้ข้อกำหนดของ 3 ประการ คือ (1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (2) ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และ (3) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต้องมีค่าไม่เกิน 4% การประเมินความเหมาะสมสามารถทำได้โดยการนำพื้นที่ผลการทดสอบต่างๆ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้นในข้อที่ 3.5–3.7 ที่ผ่านข้อกำหนดมาซ้อนทับกัน และพื้นที่ที่ยอมรับได้สามรูปซ้อนทับกัน คือ ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด



รูปที่ 3.3 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Daniel and Wu, 1993)

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

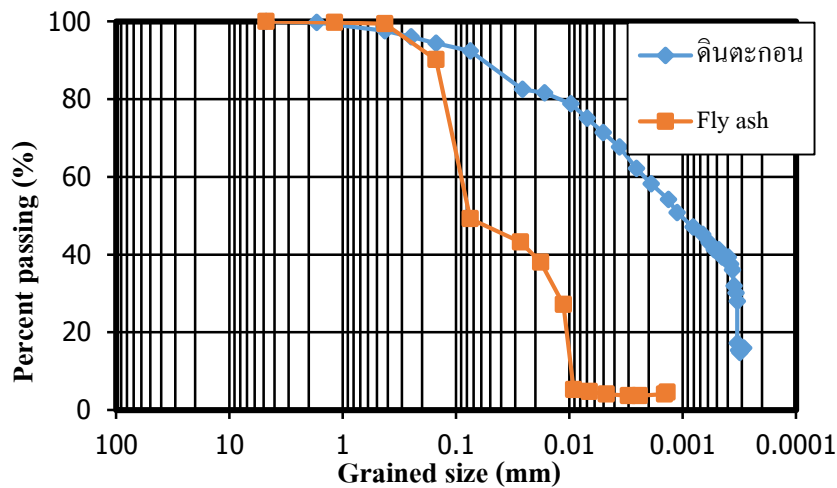
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติดัชนีของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย

ดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดินที่ถูกขุดลอกมาจากท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี มีองค์ประกอบของเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว ผลการทดสอบคุณสมบัติทางดัชนีต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 คือ มีค่าขีดจำกัดเหลว เท่ากับ 54.44% ค่าขีดจำกัดพลาสติก เท่ากับ 25% และค่าดัชนีพลาสติก เท่ากับ 29% สามารถจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS) ได้เป็นดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง (high plasticity clay, CH) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดผลของดินตะกอนทะเล แสดงดังรูปที่ 4.1

เถ้าลอยมีองค์ประกอบของเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินทรายและตะกอนทราย ซึ่งไม่มีความเป็นพลาสติก (Non-plastic) สามารถจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System (USCS) ได้เป็นตะกอนดินทราย (Silty sand, SM) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดผลของเถ้าลอย แสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติดัชนีของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย

คุณสมบัติ	มาตรฐาน	ดินตะกอนทะเล	เถ้าลอย
Liquid limit (%)	ASTM D4318	54	-
Plastic limit (%)	ASTM D4318	25	-
Plasticity index (%)	ASTM D4318	29	non-plastic
Gravel (>4.75 mm) (%)	ASTM D422-63	0	0
Sand (4.75-0.075 mm) (%)	ASTM D422-63	10	50
Silt (0.075-0.002 mm) (%)	ASTM D422-63	35	45
Clay (<0.002 mm) (%)	ASTM D422-63	55	5
Specific gravity	ASTM D854	2.64	2.60
Classification (USCS)	ASTM D2488	CH	-



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดคละของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย

จากกราฟการกระจายตัวของขนาดคละ (Grain size distribution) ของดินตัวอย่างที่แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าดินตะกอนทะเลและเถ้าลอยมีปริมาณทราย (Sand content) เท่ากับ 10% และ 50%ตามลำดับ มีปริมาณตะกอนทราย (Silt content) เท่ากับ 35% และ 45% ตามลำดับ และมีปริมาณดินเหนียว (Clay content) เท่ากับ 55% และ 5% ตามลำดับ

สำหรับค่าขีดจำกัดเหลว Benson et al. (1994) แนะนำว่าดินที่ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมควรจะต้องมีค่าขีดจำกัดเหลวไม่น้อยกว่า 20% เพราะดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวสูงจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ และจากการทดสอบค่าขีดจำกัดเหลวของดินตะกอนทะเล พบว่ามีค่าเท่ากับ 54% จึงมีความเป็นไปได้ว่าดินตะกอนทะเลมีคุณสมบัติในการซึมผ่านน้ำต่ำซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุกันซึมได้

สำหรับค่าดัชนีพลาสติกตามข้อกำหนดของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกาหรืออีพีเอ (Environmental Protection Agency, EPA) และ Daniel (1993) แนะนำว่าดินที่ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมควรจะต้องมีค่าดัชนีพลาสติกไม่น้อยกว่า 7-10% และไม่มากกว่า 30-40% เพราะถ้าดินมีค่าดัชนีพลาสติกสูงมาก เมื่อแห้งดินจะเป็นก้อนแข็งและเมื่อเปียกดินจะเหนียวมากทำให้การบดอัดในสนามทำได้ยาก จากการทดสอบค่าดัชนีพลาสติกของดินตะกอนทะเล พบว่ามีค่าเท่ากับ 29% ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด จึงมีความเป็นไปได้ว่าดินตะกอนทะเลเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุกันซึมได้

4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินตะกอนและเถ้าลอย

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย สามารถวิเคราะห์โดยการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) โดยองค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าดินตะกอนทะเลและเถ้าลอยมีส่วนประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งดินตะกอนมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 เท่ากับ 63.56 และ 22.19 ตามลำดับ และเถ้าลอยมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 เท่ากับ 43.16 และ 20.55 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนทะเลและเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)	ดินตะกอนทะเล	เถ้าลอย
SiO_2	63.56	43.16
Al_2O_3	22.19	20.55
Fe_2O_3	3.67	11.32
K_2O	3.04	1.98
Na_2O	2.07	1.83
Cl	1.68	0.02
MgO	1.34	1.97
CaO	1.02	13.72

4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลผสมเถ้าลอย

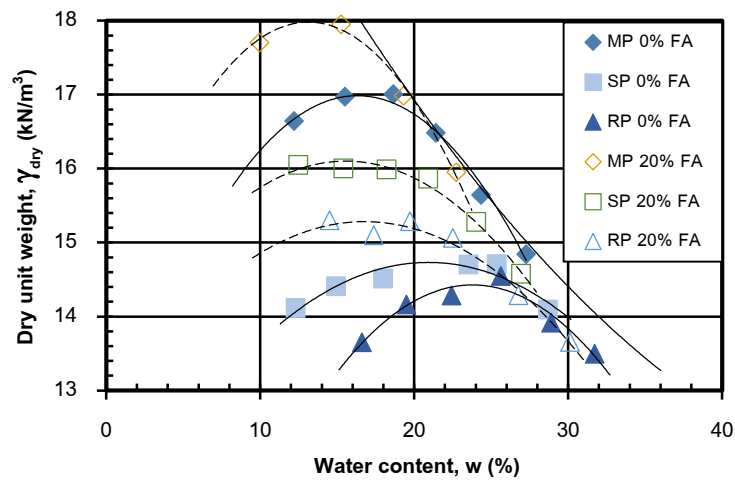
ทำการศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ โดยแปรผันสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่ 100:0 และ 80:20 และแปรผันระยะเวลาการบ่ม 0, 7, และ 28 วัน และทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ ได้แก่ (1) ทดสอบการบดอัดดินด้วยพลังงาน 3 พลังงาน คือ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor, MP), แบบมาตรฐาน (Standard Proctor, SP) และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced Proctor, RP) (2) ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยวิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) (3) ทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดี่ยว (Unconfined compressive strength) และ (4) ทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage) และสร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดเพื่อประเมินความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ดินที่ถูกขุดลอกเป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ

4.3.1 ผลการทดสอบการบดอัด

ตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบการบดอัดดินด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่อพลังงานในการบดอัดเพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะลดลงทุกอัตราส่วนผสม เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในส่วนผสมจาก 0% เป็น 20% จะทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นอนุภาคของตะกอน (Silt) ที่มีลักษณะกลมและมีความไม่เป็นพลาสติก (Non-plastic) ในดินตัวอย่างจะทำให้แรงต้านทานในการเคลื่อนที่และการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินลดลง ส่งผลให้ต้องการปริมาณความชื้นสำหรับการจัดเรียงตัวของอนุภาคระหว่างกระบวนการบดอัดน้อยลงอนุภาคเม็ดดินสามารถเคลื่อนตัวชิดกันได้มากขึ้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างดินเพิ่มสูงขึ้น ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phanikumar and Sharma (2004) และ Phanikumar and Sharma (2007)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

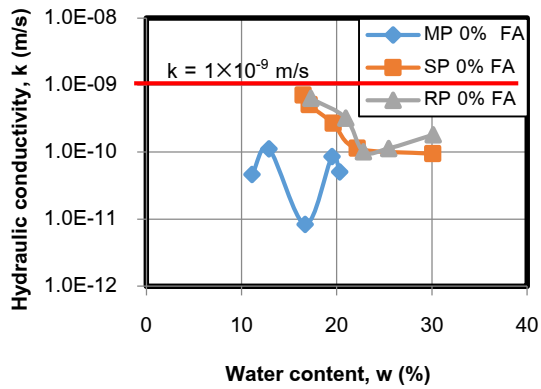
พลังงานการบดอัด	0% เถ้าลอย		20% เถ้าลอย	
	ปริมาณความชื้น w (%)	ความหนาแน่นแห้ง γ_{dry} (kN/m ³)	ปริมาณความชื้น w (%)	ความหนาแน่นแห้ง γ_{dry} (kN/m ³)
MP	10.3 (OMC-6)	16.32	7.1 (OMC-6)	17.15
	13.3 (OMC-3)	16.81	10.1 (OMC-3)	17.79
	16.3 (OMC)	16.90	13.1 (OMC)	17.99
	19.3 (OMC+3)	16.81	16.1 (OMC+3)	17.79
	22.3 (OMC+6)	16.32	19.1 (OMC+6)	17.15
SP	15 (OMC-6)	14.40	9.5 (OMC-6)	15.68
	18 (OMC-3)	14.64	12.5 (OMC-3)	16.00
	21 (OMC)	14.73	15.5 (OMC)	16.11
	24 (OMC+3)	14.66	18.5 (OMC+3)	16.00
	27 (OMC+6)	14.42	21.5 (OMC+6)	15.68
RP	17.8 (OMC-6)	13.88	10.9 (OMC-6)	14.95
	20.8 (OMC-3)	14.30	13.9 (OMC-3)	15.20
	23.8 (OMC)	14.42	16.9 (OMC)	15.28
	26.8 (OMC+3)	14.30	19.9 (OMC+3)	15.20
	29.8 (OMC+6)	13.88	22.9 (OMC+6)	14.95



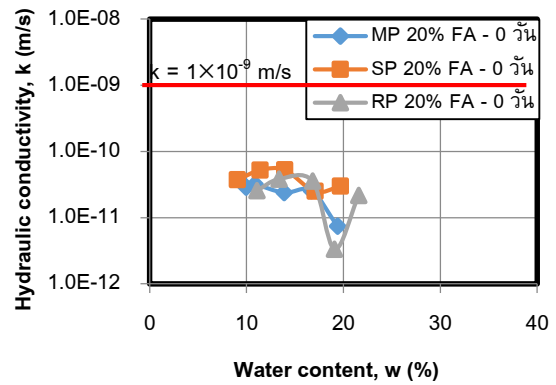
รูปที่ 4.2 กราฟการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

4.3.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity)

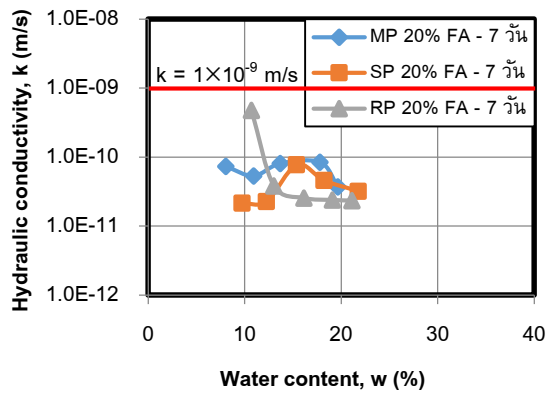
ตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 0% และ 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7, และ 28 วัน พบว่าเมื่อพลังงานการบดอัดสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในสัดส่วนผสมเถ้าลอย 20% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน แต่ระยะเวลาการบ่มกลับไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมเข้าไปอุดช่องว่างภายในอนุภาคของดินที่ถูกขุดลอกเมื่อทำการบดอัดจะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น การหดตัวและบวมตัวลดลง เป็นผลทำให้ดินมีความที่บวมมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินลดต่ำลง ทั้งนี้ที่พลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักแห้งรวม ทุกหน่วยน้ำหนักแห้งและทุกปริมาณความชื้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-9} m/s ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นกันซึมดินบดอัดของ [6, 21] และผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phanikumar and Sharma (2004) และ Bhuvaneshwari et al. (2005)



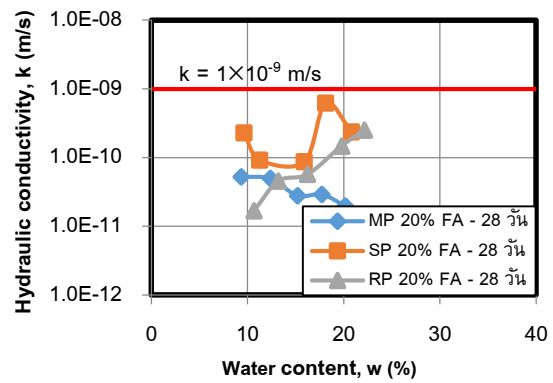
(a) ใ้ล้ลอย 0% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



(b) ใ้ล้ลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



(c) ใ้ล้ลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



(d) ใ้ล้ลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมใ้ล้ลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสัดส่วนผสมน้ำของดินตะกอนทะเลต่อเกลือลอย

พลังงานการบดอัด	0% เถ้าลอย		20% เถ้าลอย					
			ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ k (m/s)
MP	11.09 (OMC-6)	4.40×10^{-11}	9.92 (OMC-6)	2.90×10^{-11}	8.06 (OMC-6)	7.31×10^{-11}	9.35 (OMC-6)	5.28×10^{-11}
	12.88 (OMC-3)	4.40×10^{-11}	10.85 (OMC-3)	3.18×10^{-11}	10.93 (OMC-3)	5.35×10^{-11}	12.36 (OMC-3)	4.96×10^{-11}
	16.69 (OMC)	4.40×10^{-11}	13.89 (OMC)	2.38×10^{-11}	13.68 (OMC)	8.08×10^{-11}	15.20 (OMC)	2.80×10^{-11}
	19.50 (OMC+3)	4.65×10^{-11}	16.69 (OMC+3)	2.56×10^{-11}	17.82 (OMC+3)	8.44×10^{-11}	17.73 (OMC+3)	2.91×10^{-11}
	20.31 (OMC+6)	2.47×10^{-11}	19.40 (OMC+6)	7.45×10^{-12}	19.66 (OMC+6)	3.72×10^{-11}	20.17 (OMC+6)	1.99×10^{-11}
SP	16.47 (OMC-6)	1.59×10^{-10}	9.03 (OMC-6)	3.72×10^{-11}	9.74 (OMC-6)	2.15×10^{-11}	9.64 (OMC-6)	2.29×10^{-10}
	17.10 (OMC-3)	1.35×10^{-10}	11.41 (OMC-3)	5.24×10^{-11}	12.26 (OMC-3)	2.26×10^{-11}	11.29 (OMC-3)	9.21×10^{-11}
	19.63 (OMC)	8.95×10^{-11}	13.93 (OMC)	5.27×10^{-11}	15.40 (OMC)	7.77×10^{-11}	15.90 (OMC)	8.67×10^{-11}
	22.15 (OMC+3)	3.63×10^{-11}	17.07 (OMC+3)	2.48×10^{-11}	18.22 (OMC+3)	4.59×10^{-11}	18.11 (OMC+3)	6.21×10^{-10}
	30.08 (OMC+6)	2.66×10^{-11}	19.68 (OMC+6)	2.99×10^{-11}	21.78 (OMC+6)	3.20×10^{-11}	20.83 (OMC+6)	2.35×10^{-10}
RP	17.28 (OMC-6)	2.04×10^{-10}	11.05 (OMC-6)	2.56×10^{-11}	10.70 (OMC-6)	4.75×10^{-10}	10.68 (OMC-6)	1.69×10^{-11}
	20.94 (OMC-3)	7.04×10^{-11}	13.33 (OMC-3)	3.81×10^{-11}	13.03 (OMC-3)	3.81×10^{-11}	13.21 (OMC-3)	4.57×10^{-11}
	22.80 (OMC)	4.00×10^{-11}	16.81 (OMC)	3.55×10^{-11}	16.13 (OMC)	2.55×10^{-11}	16.24 (OMC)	5.71×10^{-11}
	25.44 (OMC+3)	3.39×10^{-11}	19.07 (OMC+3)	3.33×10^{-12}	19.11 (OMC+3)	2.38×10^{-11}	19.77 (OMC+3)	1.47×10^{-10}
	30.12 (OMC+6)	3.91×10^{-11}	21.57 (OMC+6)	2.17×10^{-11}	21.13 (OMC+6)	2.34×10^{-11}	22.16 (OMC+6)	2.51×10^{-10}

MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน, RP=การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

4.3.3 ผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)

ตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนและระยะเวลาการบ่มต่างๆ พบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานการบดอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวที่ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในอัตราส่วนเถ้าลอย 20% ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเถ้าลอยจะยิ่งพัฒนากำลังสูงขึ้นส่งผลทำให้ทุกหน่วยน้ำหนักแห้งและทุกปริมาณความชื้นมีค่ากำลังอัดแกนเดียวมากขึ้นทั้ง 3 พลังงานการบดอัด ทั้งนี้เพราะเถ้าลอยมีคุณสมบัติทางปอซโซลานิก (Pozzolanic) คือเมื่อผสมเถ้าลอยในดินจะเกิดการแลกเปลี่ยนกันของไอออนบวก (Cation) ในดิน และแคลเซียมจากแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอย ทำให้ความหนาของน้ำในชั้น Double layer บางลงและเกิดการดึงดูดกันของอนุภาคดินเหนียวเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculation) นอกจากนี้ค่าดัชนีกรดต่าง (pH) ที่สูงขึ้นในดินจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ส่งผลทำให้กำลังอัดแกนเดียวของดินเพิ่มสูงขึ้น และลดการบวมตัวและหดตัวของดินด้วย ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pandian et al. (2002) และ Nalbantoglu (2004) และค่ากำลังอัดแกนเดียวจากการทดสอบนี้ส่วนใหญ่มีค่าเป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึม คือ มีค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa (Daniel and Wu, 1993)

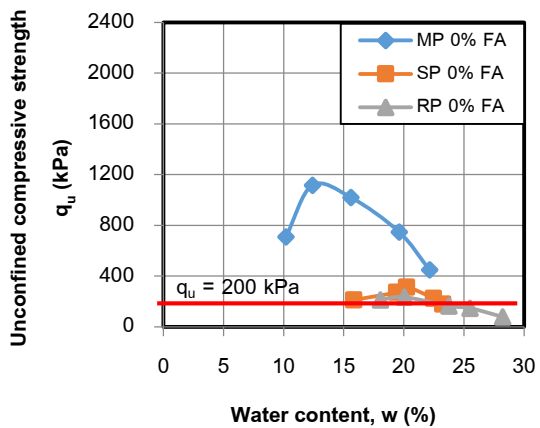
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของสัดส่วนผสมดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอย

พลังงานการบดอัด	0% เถ้าลอย		20% เถ้าลอย					
			ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
	ปริมาณความชื้น w^* (%)	ค่ากำลังอัดแกนเดียว q_u (kPa)	ปริมาณความชื้น w^* (%)	ค่ากำลังอัดแกนเดียว q_u (kPa)	ปริมาณความชื้น w^* (%)	ค่ากำลังอัดแกนเดียว q_u (kPa)	ปริมาณความชื้น w^* (%)	ค่ากำลังอัดแกนเดียว q_u (kPa)
MP	10.19 (OMC-6)	709.12**	9.66 (OMC-6)	61.40**	8.01 (OMC-6)	112.77**	9.81 (OMC-6)	759.29**
	12.39 (OMC-3)	1116.01**	12.54 (OMC-3)	361.33**	11.69 (OMC-3)	611.44	12.72 (OMC-3)	1501.90**
	15.59 (OMC)	1020.76	15.52 (OMC)	822.80	13.70 (OMC)	1086.56**	16.05 (OMC)	1495.40**
	19.60 (OMC+3)	748.75	16.94 (OMC+3)	808.22**	15.93 (OMC+3)	1221.45**	18.76 (OMC+3)	1195.27**
	22.14 (OMC+6)	449.16	17.69 (OMC+6)	788.66**	19.41 (OMC+6)	907.57**	22.44 (OMC+6)	705.52
SP	15.83 (OMC-6)	211.57**	11.00 (OMC-6)	91.16**	12.02 (OMC-6)	171.84**	9.93 (OMC-6)	306.57
	19.39 (OMC-3)	272.09	13.73 (OMC-3)	278.90	14.11 (OMC-3)	667.17	12.52 (OMC-3)	540.61**
	20.22 (OMC)	313.96**	16.66 (OMC)	416.60	17.46 (OMC)	746.70	15.25 (OMC)	891.33**
	22.46 (OMC+3)	225.05	19.09 (OMC+3)	364.48	21.23 (OMC+3)	626.45	18.44 (OMC+3)	928.55**
	23.22 (OMC+6)	180.25**	21.94 (OMC+6)	241.78	23.94 (OMC+6)	424.51**	21.67 (OMC+6)	757.03
RP	18.04 (OMC-6)	213.59**	12.71 (OMC-6)	51.30**	10.68 (OMC-6)	131.50**	12.06 (OMC-6)	222.67**
	20.04 (OMC-3)	234.22	15.02 (OMC-3)	167.46	13.56 (OMC-3)	342.46**	14.80 (OMC-3)	413.45**
	23.75 (OMC)	164.40	17.29 (OMC)	245.92	16.77 (OMC)	521.59**	17.61 (OMC)	608.62**
	25.51 (OMC+3)	147.45**	19.99 (OMC+3)	210.56	19.47 (OMC+3)	479.82**	20.40 (OMC+3)	588.00**
	28.21 (OMC+6)	78.68	22.35 (OMC+6)	168.95	22.36 (OMC+6)	394.28**	23.44 (OMC+6)	530.57**

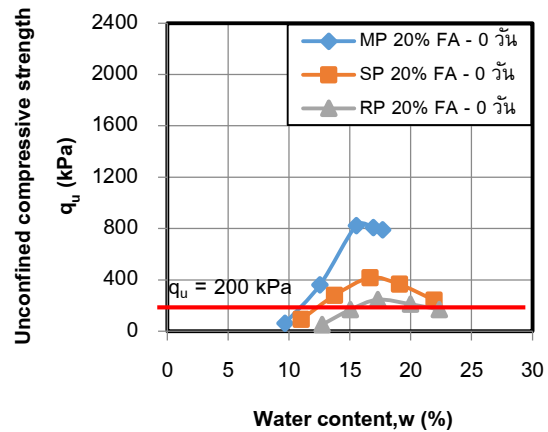
MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน, RP=การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

* = ปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบ, * = ค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวของ 2 ก้อนตัวอย่างจากทั้งหมด 3 ก้อนตัวอย่าง เนื่องจากมีบางก้อนตัวอย่างให้ค่าแตกต่างกันมาก

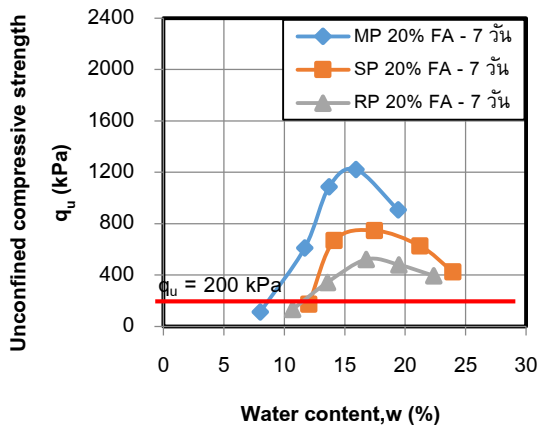
OMC-6, OMC-3, OMC, OMC+3, OMC+6 = ปริมาณความชื้นที่ต้องการจากการทดสอบการบดอัด



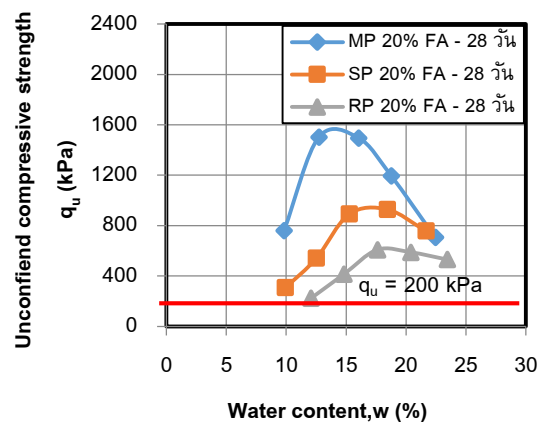
(a) ใ้ล้ลอย 0% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



(b) ใ้ล้ลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



(c) ใ้ล้ลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

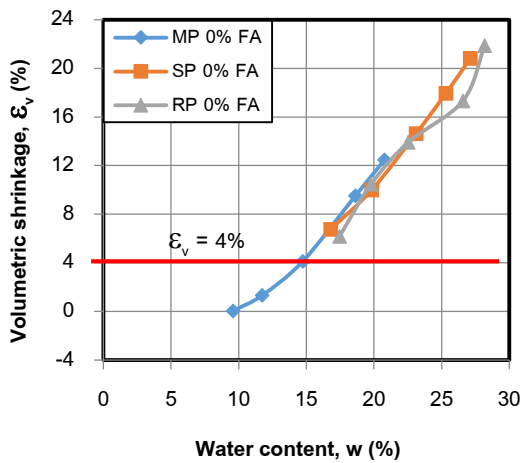


(d) ใ้ล้ลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

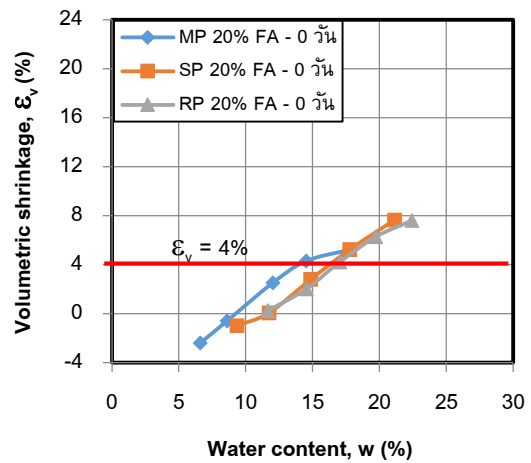
รูปที่ 4.4 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกขุดลอกผสมใ้ล้ลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

4.3.4 ผลการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage)

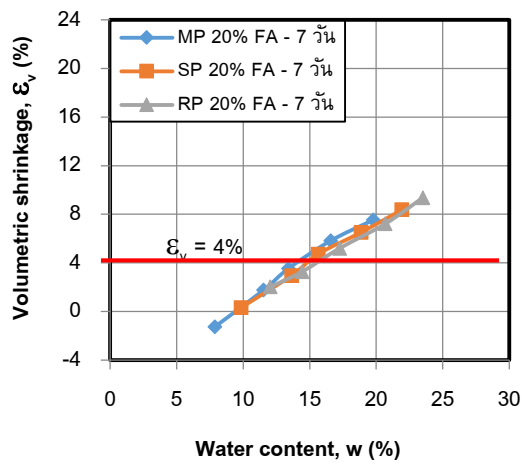
จากตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินที่ถูกขุดลอกผสมใ้ล้ลอยที่ปริมาณ 0% และ 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7, และ 28 วัน พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรก็จะเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานการบดอัด และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ดินที่ถูกขุดลอกด้วยใ้ล้ลอยและระยะเวลาการบ่ม ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะลดลง เกือบครึ่งหนึ่งอย่างชัดเจนและผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมากขึ้น คือ $\epsilon_v < 4\%$ (Daniel and Wu, 1993) ทั้งนี้เป็นผลมาจากเมื่ออนุภาคของดินที่ถูกขุดลอกถูกแทนที่ด้วยใ้ล้ลอยซึ่งมีส่วนประกอบของออกไซด์ซิลิเกตและอลูมินาจะช่วยให้อนุภาคดินจัดเรียงตัวแบบกระเบื้องระกะด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนและคุณสมบัติในการช่วยยึดประสานจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะช่วยให้การยับยั้งการบวมตัวและหดตัวของดิน ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phanikumar and Sharma (2004), Phanikumar and Sharma (2007), Nalbantoglu (2004), Bhuvaneshwari et al. (2005) และ Mir and Sridharan (2013)



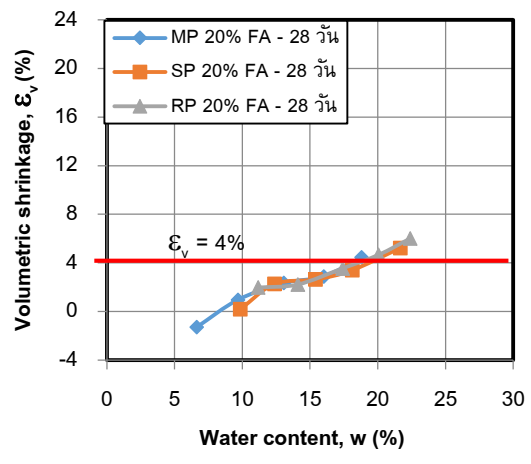
(a) ใ้ลลอย 0% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



(b) ใ้ลลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



(c) ใ้ลลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



(d) ใ้ลลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.5 ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินที่ถูกขุดลอกผสมใ้ลลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

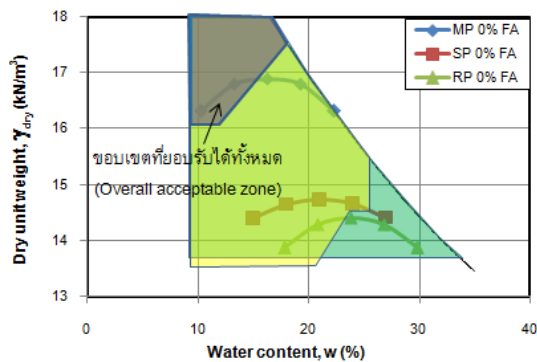
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของสัดส่วนผสมดินตะกอนทะเลต่อเถ้าลอย

พลังงาน การบดอัด	20% เถ้าลอย					
	ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)
MP	6.59 (OMC-6)	-2.41	7.87 (OMC-6)	-1.26	6.63 (OMC-6)	-1.29
	8.60 (OMC-3)	-0.60	11.53 (OMC-3)	1.76	9.66 (OMC-3)	0.96
	12.01 (OMC)	2.51	13.40 (OMC)	3.54	13.06 (OMC)	2.34
	14.51 (OMC+3)	4.30	16.58 (OMC+3)	5.83	16.00 (OMC+3)	2.89
	17.90 (OMC+6)	5.26	19.77 (OMC+6)	7.53	18.80 (OMC+6)	4.45
SP	9.34 (OMC-6)	-0.99	9.83 (OMC-6)	0.31	9.84 (OMC-6)	0.18
	11.74 (OMC-3)	0.07	13.63 (OMC-3)	2.95	12.36 (OMC-3)	2.26
	14.85 (OMC)	2.79	15.64 (OMC)	4.73	15.40 (OMC)	2.64
	17.77 (OMC+3)	5.22	18.86 (OMC+3)	6.51	18.11 (OMC+3)	3.40
	21.11 (OMC+6)	7.64	21.93 (OMC+6)	8.37	21.66 (OMC+6)	5.22
RP	11.65 (OMC-6)	0.23	12.04 (OMC-6)	2.02	11.17 (OMC-6)	1.97
	14.53 (OMC-3)	2.02	14.42 (OMC-3)	3.28	14.09 (OMC-3)	2.22
	17.02 (OMC)	4.21	17.25 (OMC)	5.20	17.39 (OMC)	3.55
	19.71 (OMC+3)	6.27	20.67 (OMC+3)	7.21	20.06 (OMC+3)	4.66
	22.41 (OMC+6)	7.60	23.51 (OMC+6)	9.37	22.39 (OMC+6)	6.00

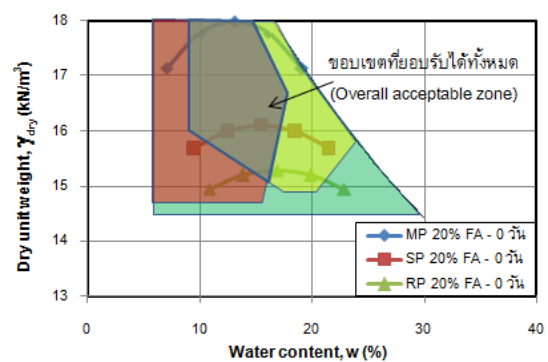
MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน, RP=การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

4.4 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone)

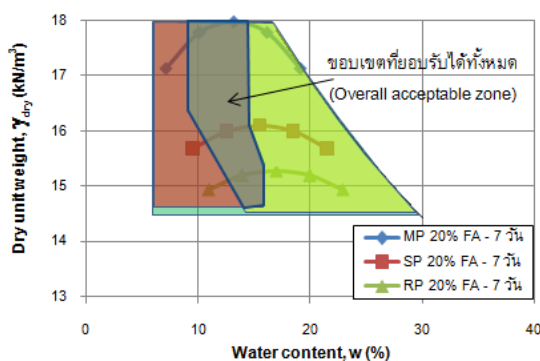
เพื่อประเมินความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นกันตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson [6] และ Daniel and Wu (1993) ที่กำหนดขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดภายใต้ข้อกำหนดของ 3 ประการ คือ (1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน 1×10^{-9} m/s (2) ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และ (3) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต้องมีค่าไม่เกิน 4% การประเมินความเหมาะสมสามารถทำได้โดยการนำพื้นที่ผลการทดสอบต่างๆ ที่ผ่านข้อกำหนดมาซ้อนทับกัน และพื้นที่ที่ยอมรับได้สามารถซ้อนทับกัน คือ ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.6 พบว่าขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินที่ถูกขุดลอก (เถ้าลอย 0%) มีพื้นที่ค่อนข้างเล็ก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในอัตราส่วนผสม กลับพบว่าพื้นที่ขยายใหญ่ขึ้นและมีแนวโน้มในการใช้งานมากขึ้น และเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน พบว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้มีพื้นที่ขยายใหญ่ที่สุด นั้นแสดงให้เห็นว่าดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ โดยอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดคือ 80:20 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน



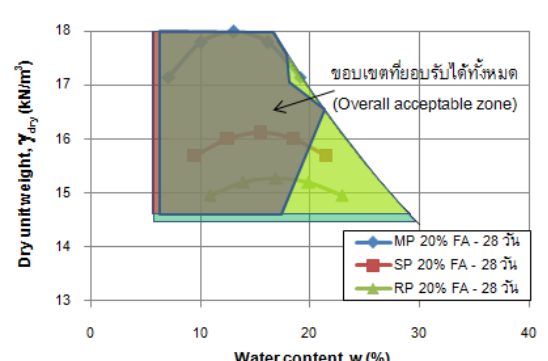
(a) เถ้าลอย 0% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



(b) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน



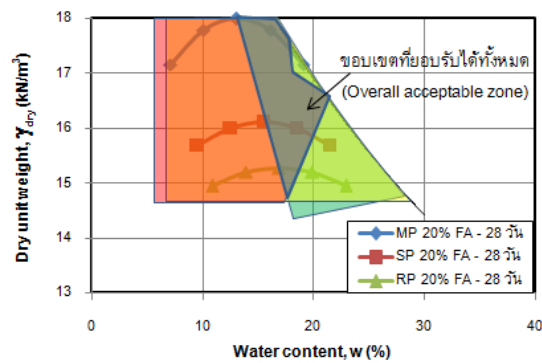
(c) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



(d) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

รูปที่ 4.6 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

แต่อย่างไรก็ตาม Benson et al. (1999) แนะนำว่าในทางปฏิบัติการบดอัดดินทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมส่วนใหญ่สามารถทำได้ยากและมักให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-9} m/s ดังนั้นหากนำไปใช้งานจริงในสนามควรบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมหรือทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจึงจะเหมาะสมที่สุด ดังนั้นขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดก็จะถูกปรับแก้ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดที่ถูกปรับแก้ตามคำแนะนำของ Benson et al. (1999) (ถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล และสร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบ่ออัด สามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของพลังงานในการบดอัดดินส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลง ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรลดลง
2. การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลง ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรลดลง
3. การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่มไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีแนวโน้มทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรลดลง
4. ดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ โดยอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดคือ 80:20 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ (2554) เกณฑ์ มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว ครั้งที่ 5.
- กรมควบคุมมลพิษ (2556) รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2556. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- ปิยชาติ (2557) ขยะมูลฝอยชุมชน ปัญหาใหญ่ที่ประเทศกำลังเผชิญ. สถาบันทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ปีที่ 4 ฉบับที่ 7.
- วรรณวรงค์ รัตนาธิคม ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ และพัสดา ปัดขุมมี (2558) การพัฒนาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนทะเลที่ขุดลอกเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 ณ โรงแรมเดอะชาयน์ อ. บางละมุง จ. ชลบุรี 8-10 กรกฎาคม 2558 หน้า 1-6.
- ศุภโชค สันติวัฒนาพร ธนิต เฉลิมยานนท์ และสมธ ไซยประพัทธ์ (2555) การใช้ตะกอนประปาในงานชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 ณ โรงแรมเซ็นทารา แอนคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จ. อุดรธานี .9-11 พฤษภาคม 2555 หน้า GTE029-1-8.
- ผู้จัดการออนไลน์. เทศบาลเมืองหัวหินสั่ง จนทเร่งแก้ปัญหา น้ำเสียจากบ่อขยะที่เพิ่มมากขึ้นไหลลงแหล่งน้ำ. [Online], 2559, แหล่งที่มา <http://www.manager.co.th/Local/ViewNews.aspx?NewsID=9590000017774> [18 กุมภาพันธ์ 2559]
- สำนักข่าวกรมประชาสัมพันธ์ออนไลน์ .อธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรมตรวจสอบโรงงานกำจัดขยะอุตสาหกรรมในจังหวัดราชบุรี กรณีชาวบ้านร้องเรียนปัญหามลพิษ. [Online], 2559, แหล่งที่มา http://thainews.prd.go.th/website_th/news/news_detail/TNEVN5806030010027 [3 มิถุนายน 2558]
- Brandl, H. (1992), “Mineral liners for hazardous waste containment”, *Geotechnique*, 42, pp. 57–65.
- Chapman G.P. (1968), “The sea dredged sand gravel industry of Great Britain”, Sea-dredged aggregates for concrete. *In: Proceeding of Symposium, Sand and gravel association of great Britain, Buckinghamshire.*
- Cokca, E. and Yilmaz, Z. (2004), “Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material”, *Waste Management Journal*, 24, pp. 153–164.
- Czurda, K. (2006), “Clay liners and waste disposal”, *In: F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.), Handbook of Clay Science, Elsevier, Amsterdam, pp. 693–702.*
- Daniel, D.E. (1993), “Geotechnical Practice for Waste Disposal”, Chapman and Hall, London.

- Daniel, D.E., and Benson, C.H. (1990), “Water content-density criteria for compacted soil liners”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 12 (116), pp. 1811 – 1830.
- Daniel, D.E. and Wu, Y.K. (1993), “Compacted clay liners and covers for sites”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119 (2), pp. 223– 237.
- Dubois V., Abriak NE., Zentar R. and Ballivy G. (2009), “The used of marine sediments as a pavement base material”. *Waste Management*, 29, pp. 774-782.
- Dutta, J. and Mishra, A.K. (2015), “A study on the influence of inorganic salts on the behaviour of compacted bentonites”, *Applied Clay Science*, 116-117, pp. 85-92.
- Ekrem K. (2009), “Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils”, *Applied Clay Science*, 43, pp. 296–302.
- Ekrem K. and Suat A. (2004), “The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners”, *Engineering Geology*, 73, pp. 145–156.
- Environmental Protection Agency (2000), “Landfill manual-Landfill site design”, Wexford, Ireland, pp. 154.
- European Commission (1999), Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste. Official Journal of the European Union L 182, 16/07/1999, 0001-0019; Brussels.
- Herrmann I., Svensson M., Ecke H., Kumpiene J. Maurice C., Andreas L. and Lagerkvist A. (2009), “Hydraulic conductivity of fly ash–sewage sludge mixes for use in landfill cover liners”, *Water Research*, 43, pp. 3541-3547.
- ISWA (2010). “Landfill operational guidelines – 2nd edition”, International Solid Waste Association, Vienna, pp. 106.
- Kayabaly´, K. (1997), “Engineering aspects of a novel landfill liner material: bentonite-amended natural zeolite”, *Engineering Geology Journal*, 46, pp. 105– 114.
- Kennay, T.C., Van Veen, V.A., Swallow, M.A. and Sungalia, M.A. (1992), “Hydraulic conductivity of compacted bentonite – sand Mixtures”, *Canadian Geotechnical Journal*, 29, pp. 638– 640.
- Kozlova S., Shimanovich S. and Meyer C. (2004), “Method of treatment of dredged material for benefit use”. *United States Patent Application Publication*. Pub. No.: US 2004/0158114A1. August, 12th.

- Limeira J., Agullo L. and Etxeberrir M. (2010), “Dredged marine sand on concrete: an experimental section of a harbor pavement”, *Construction Build Material*, 24, pp. 863-870.
- Maritsa L., Tsakiridis P.E., Katsiotis N.S., Tsiavos H., Velissariou D., Xenidis A. and Beazi-Katsioti M. (2016), “Utilization of spilitic mining wastes in the construction of landfill bottom liners”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4, pp. 1818-1825.
- Millrath K., Kozlova S., Sjimannovich S. and Meyer C. (2001), “Benefit use of dredged materials I and II progress report prepared for Echo Environmental”, Inc., Columbia University, New York, NY.
- Morandini T.L.C. and Leite A.L. (2015), “Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes”, *Engineering Geology Journal*, 196, pp. 251–267.
- Musso T.B., Roehl K.E., Pettinari G. and Vallés J.M. (2010), “Assessment of smectite-rich claystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills”, *Applied Clay Science*, 48, pp. 438–445.
- Qian, X., Koerner, R.M. and Gray, D.H. (2002), “Geotechnical aspects of landfill design and construction”, *Prentice Hall*, New Jersey.
- Roberts, A.A. and Shimaoka, T. (2008), “Analytical study on the suitability of using bentonite coated gravel as a landfill liner material”, *Waste Management Journal*, 28, pp. 2635–2644.
- Rowe, R.K., Quigley, R.M., and Booker, J.R. (1995), “Clayey barrier systems for waste disposal facilities”, *Chapman & Hall*, London.
- Siham K. Fabrice B., Edine A.N. (2008), “Marine dredge sediments as new material resource for road construction”, *Waste Management*, 28, pp. 919-928.
- Stefan C. and Fokke S. (2013), “Investigation of Dredged Materials in Combination with Geosynthetics Used in Dike Construction”, *Procedia Engineering*, 57, pp. 213–221.
- Ulbricht J.P. (2002), “Contaminated sediments: raw materials for brick”, *Symposium Dredged*, Dunkerque, France, October.
- US EPA (1998), “Solid waste disposal facility criteria technical manual”, United States Environmental Protection Agency. Springfield, pp. 349.

- Van Ree, C.C.D.F., Weststrate, F.A., Meskers, C.G. and Bremmer, C.N. (1992), “Design aspects and permeability testing of natural clay and sand-bentonite liners”, *Geotechnique*, Vol. 1, No. 42, pp. 49– 56.
- Yahia E.-A. Mohamedzein, Amer A., Al-Rawas, Mohammed Y., Al-Aghbari, Ahmed Q. and Abdul-Hamid Al-Rawas (2005), “Assessment of crushed shales for use as compacted landfill liners”, *Engineering Geology*, 80, pp. 271–281.
- Zentar R., Dubois V. and Abriak NE. (2008), “Mechanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments”, *Resources Conservation and Recycling* ,52, pp. 947-954.
-