

การปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดออกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อ
ฝังกลบขยะ

ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ชนาภรณ์ ทองรูปพรรณ ฉบับนี้แล้ว เห็นควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

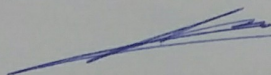
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

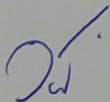
(ดร.วรรณวรงค์ รัตนานิกม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



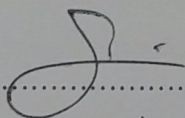
.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลพงษ์ พงษ์วิทย์ภาณุ)



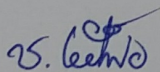
.....กรรมการ

(ดร.วรรณวรงค์ รัตนานิกม)



.....กรรมการ

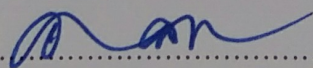
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)



.....กรรมการ

(ดร. เซวาน์วัฒน์ เอื้อเฟื้อ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาของมหาวิทยาลัยบูรพา



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร.อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 9 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. วรรณวรงค์ รัตนานิกม อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงานทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่คอยช่วยแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยให้มีคุณภาพ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เนื่องจกงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยบูรพา และได้รับการสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และบริษัท วรรณสรณ์ จำกัด จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อทวีป คุณแม่โสภา ทองรูปพรรณ และพี่ เพื่อน น้อง ๆ ทุกคนที่ให้อำลัใจ และคอยสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตาแด่ บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ

56910170: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ดินที่ถูกขุดลอก/ ชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด/ บ่อฝังกลบขยะอย่างถูกหลักสุขาภิบาล/
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ: การปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อ
ประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ (IMPROVEMENT OF DREDGED SOIL FROM
LAEMCHABANG PORT FOR AN APPLICATION AS A LANDFILL COMPACTED CLAY LINER)
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วรณวรางค์ รัตนานิกม, Ph.D. 145 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

ชั้นดินกันซึมบดอัดในบ่อฝังกลบถูกใช้เพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติข้างเคียง ดินที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่เกิน 1×10^{-9} m/s ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่า 4% งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ โดยแปรผันอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยโดยน้ำหนักแห้งต่าง ๆ ได้แก่ 100 : 0 และ 80 : 20 และแปรผันระยะเวลาการบ่ม 0 7 และ 28 วัน และแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ 1) ทดสอบหาคุณสมบัติทางดัชนี ได้แก่ ชีดพิกัตต์เหลว ชีดพิกัตต์พลาสติก ขนาดคละ ความถ่วงจำเพาะ และองค์ประกอบทางเคมีโดยการทดสอบ XRF ของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย 2) ทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย ได้แก่ การบดอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร 3) สร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด 4) ศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ และ 5) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและเวลาการไหลทะลุผ่านของสารเคมีต่าง ๆ ภายใต้ปรากฏการณ์การพาและการแพร่ จากผลการศึกษาพบว่าดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้โดยอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุด คือ 80 : 20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอย 80 : 20 ที่ซึมผ่านด้วย NaCl มีค่าเท่ากับ 3×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 4.5×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ และเวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 30 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 2 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และเมื่อซึมผ่านด้วย CaCl₂ จะมีค่าเท่ากับ 1×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 5×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ และเวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 20 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 1 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

56910170: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: DREDGED SOIL/ COMPACTED CLAY LINER/ SANITARY LANDFILL/
HYDRAULIC CONDUCTIVITY

TANAPORN TONGROOPAPHAN: IMPROVEMENT OF DREDGED SOIL FROM
LAEMCHABANG PORT FOR AN APPLICATION AS A LANDFILL COMPACTED CLAY
LINER. ADVISORY COMMITTEE: WANWARANG RATANANIKOM, Ph.D. 145 P. 2018.

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 5 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) 3) plots of overall acceptable zone of compacted dredged soil liner 4) study of the effects of leachate chemicals on hydraulic conductivity and 5) calculate the effective diffusion coefficient and breakthrough time under the advection and diffusion phenomena. 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. The effective diffusion coefficient of the ratios of dredged soil-fly ash mixture was 20% by total dry weight permeated with NaCl as 3×10^{-5} cm²/sec for Modified Proctor and 4.5×10^{-5} cm²/sec for Standard Proctor and breakthrough time of about 30 years for Modified Proctor and about 2 years for Standard Proctor respectively. While the effective diffusion coefficient of dredged soil-fly ash mixture permeated with CaCl₂ as 1×10^{-5} cm²/sec for Modified Proctor and 5×10^{-5} cm²/sec for Standard Proctor and breakthrough time of about 20 years for Modified Proctor and about 1 year for Standard Proctor respectively.

56910170: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ดินที่ถูกขุดลอก/ ชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด/ บ่อฝังกลบขยะอย่างถูกหลักสุขาภิบาล/
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ: การปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อ
ประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ (IMPROVEMENT OF DREDGED SOIL FROM
LAEMCHABANG PORT FOR AN APPLICATION AS A LANDFILL COMPACTED CLAY LINER)
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วรณวรางค์ รัตนานิกม, Ph.D. 145 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

ชั้นดินกันซึมบดอัดในบ่อฝังกลบถูกใช้เพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติข้างเคียง ดินที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นกันซึมจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่เกิน 1×10^{-9} m/s ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่า 4% งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ โดยแปรผันอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยโดยน้ำหนักแห้งต่าง ๆ ได้แก่ 100 : 0 และ 80 : 20 และแปรผันระยะเวลาการบ่ม 0 7 และ 28 วัน และแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ 1) ทดสอบหาคุณสมบัติทางดัชนี ได้แก่ ชีดพิกต์เหลว ชีดพิกต์พลาสติก ขนาดคละ ความถ่วงจำเพาะ และองค์ประกอบทางเคมีโดยการทดสอบ XRF ของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย 2) ทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย ได้แก่ การบดอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร 3) สร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด 4) ศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ และ 5) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและเวลาการไหลทะลุผ่านของสารเคมีต่าง ๆ ภายใต้ปรากฏการณ์การพาและการแพร่ จากผลการศึกษาพบว่าดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้โดยอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุด คือ 80 : 20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอย 80 : 20 ที่ซึมผ่านด้วย NaCl มีค่าเท่ากับ 3×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 4.5×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ และเวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 30 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 2 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน และเมื่อซึมผ่านด้วย CaCl₂ จะมีค่าเท่ากับ 1×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ 5×10^{-5} cm²/sec สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ และเวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 20 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 1 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

56910170: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: DREDGED SOIL/ COMPACTED CLAY LINER/ SANITARY LANDFILL/
HYDRAULIC CONDUCTIVITY

TANAPORN TONGROOPAPHAN: IMPROVEMENT OF DREDGED SOIL FROM
LAEMCHABANG PORT FOR AN APPLICATION AS A LANDFILL COMPACTED CLAY
LINER. ADVISORY COMMITTEE: WANWARANG RATANANIKOM, Ph.D. 145 P. 2018.

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 5 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) 3) plots of overall acceptable zone of compacted dredged soil liner 4) study of the effects of leachate chemicals on hydraulic conductivity and 5) calculate the effective diffusion coefficient and breakthrough time under the advection and diffusion phenomena. 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. The effective diffusion coefficient of the ratios of dredged soil-fly ash mixture was 20% by total dry weight permeated with NaCl as 3×10^{-5} cm²/sec for Modified Proctor and 4.5×10^{-5} cm²/sec for Standard Proctor and breakthrough time of about 30 years for Modified Proctor and about 2 years for Standard Proctor respectively. While the effective diffusion coefficient of dredged soil-fly ash mixture permeated with CaCl₂ as 1×10^{-5} cm²/sec for Modified Proctor and 5×10^{-5} cm²/sec for Standard Proctor and breakthrough time of about 20 years for Modified Proctor and about 1 year for Standard Proctor respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย.....	5
วิธีและรูปแบบการฝังกลบขยะมูลฝอย.....	6
ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย.....	9
ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด.....	16
ดินที่ถูกละลาย.....	39
ถ้ำลอย.....	42
ผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะ.....	44
กลไกการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน.....	52
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	66
3 วิธีการวิจัย.....	75
ระเบียบวิธีวิจัย.....	75
วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	76
วิธีการวิจัย.....	77
การทดสอบการบดอัด.....	79
การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ.....	79

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	80
การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร.....	80
ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด.....	81
การศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารเคมีแต่ละชนิด.....	82
การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและเวลาการไหลทะลุผ่านของ สารเคมีต่าง ๆ ภายใต้ปรากฏการณ์การพาและการแพร่.....	85
4 ผลการวิจัย.....	86
ผลการศึกษาคูณสมบัติดัชนีของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย.....	86
ผลการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย.....	88
ผลการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย.....	89
ผลการศึกษาการประเมินความเหมาะสมของขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึม บดอัด.....	111
การศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของน้ำที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ.....	121
ผลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและการคำนวณเวลาการไหล ทะลุผ่านของสารเคมีต่าง ๆ ภายใต้ปรากฏการณ์การพาและการแพร่.....	128
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	135
สรุปผลการวิจัย.....	135
ข้อเสนอแนะ.....	136
บรรณานุกรม.....	137
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	145

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 ประเภท.....	23
2-2 อิทธิพลของขนาดก้อนดินที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียว บดอัด.....	35
2-3 การจำแนกตามขนาดของอนุภาคของตะกอนดินและของเนื้อตะกอน.....	40
2-4 ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ตัวบ่งชี้และสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะ มูลฝอย.....	47
2-5 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบ.....	48
2-6 อัตราการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายโดยกลไกการพาผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด หนา 30 เซนติเมตร ภายใต้ความสูงของน้ำชะขยะ 30 เซนติเมตร.....	59
2-7 ฟังก์ชันความผิดพลาด (erfc).....	64
4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย.....	87
4-2 องค์ประกอบทางเคมีของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย.....	89
4-3 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และ แบบต่ำกว่ามาตรฐาน.....	90
4-4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่ อัตราส่วนต่าง ๆ.....	95
4-5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ	101
4-6 ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วน ต่าง ๆ.....	107
4-7 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของดินที่ถูกขุดลอกผสม เถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	122
4-8 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ของดินที่ถูกขุดลอกผสม เถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	126
4-9 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและเวลาการไหลทะลุผ่านของสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ที่พลังงานการบดอัด ต่าง ๆ.....	129

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การทำงานของระบบการฝังกลบในบ่อฝังกลบ.....	6
2-2 การฝังกลบแบบพื้นราบหรือกลบบนพื้นที่.....	7
2-3 การฝังกลบแบบขุดร่อง.....	7
2-4 การฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่อง.....	8
2-5 การฝังกลบแบบหุบเขา.....	9
2-6 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย.....	10
2-7 ชั้นกันซึมดินเหนียวคัดชั้นเดียว.....	11
2-8 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนชั้นเดียว.....	11
2-9 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนสองชั้น.....	12
2-10 ชั้นกันซึมผสมชั้นเดียว.....	12
2-11 ชั้นกันซึมผสมสองชั้น.....	13
2-12 ระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะมูลฝอย.....	14
2-13 ตัวอย่างท่อระบายก๊าซจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย.....	15
2-14 รายละเอียดของระบบปิดทับชั้นสุดท้าย.....	16
2-15 ขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมสำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวคัด.....	18
2-16 ผลกระทบของพลังงานการบดอัดต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน.....	19
2-17 กราฟการบดอัดใหม่โดยใช้สัญลักษณ์ที่บ่งชี้สำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้.....	20
2-18 เส้นชั้นความสูงสำหรับค่าคงที่ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm/ sec) และ กำลังรับแรงเฉือน (kPa).....	20
2-19 กราฟการบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การบดอัดแบบมาตรฐาน และการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน.....	24
2-20 ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็ง.....	25
2-21 ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่น.....	26
2-22 กราฟการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน.....	27
2-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและปริมาณความชื้น.....	28

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-24 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ.....	29
2-25 ปรับแก้ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ.....	29
2-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้น.....	30
2-27 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียว.....	30
2-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรและปริมาณความชื้น.....	31
2-29 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร.....	32
2-30 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด.....	32
2-31 ผลของขนาดก้อนดินต่อกราฟการบดอัด.....	34
2-32 ผลของขนาดก้อนดินต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ.....	35
2-33 การไหลของน้ำผ่านช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างก้อนดิน.....	36
2-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินและหน่วยน้ำหนัก แห่งขณะบดอัด.....	37
2-35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและปริมาณกรวดในดิน Kaolinite และ Mine spoil.....	39
2-36 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน.....	41
2-37 อัตราการเกิดน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย.....	52
2-38 การประยุกต์ใช้กฎของดาร์ซี.....	53
2-39 การเคลื่อนที่แบบการพา.....	54
2-40 เวลาทะลุผ่าน.....	54
2-41 ความพรุนประสิทธิผล.....	56
2-42 ความพรุนประสิทธิผลของดินที่มีการถ่วงการเกิดปฏิกิริยาและไม่มีการถ่วงการเกิด ปฏิกิริยาของไอออนของเสีย.....	56
2-43 การแพร่ของโมเลกุล.....	57
2-44 เวลาการทะลุผ่าน (ที่ $C/C_0 = 0.5$) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสำหรับการไหล ประเภทต่าง ๆ.....	65

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-45 การออกแบบบ่อฝังกลบแบบดั้งเดิมที่แสดงการไหลแบบการพาและการแพร่กระทำใน ทิศทางเดียวกัน.....	66
3-1 ระเบียบวิธีวิจัย.....	75
3-2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	77
3-3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	80
3-4 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร.....	81
3-5 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด.....	81
3-6 การประกอบเครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็ง.....	83
3-7 ชุดทดสอบแบบผนังแข็งสำหรับทดสอบแบบความดันน้ำคงที่.....	84
4-1 การกระจายตัวของขนาดผละของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย.....	87
4-2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	92
4-3 ผลกระทบของพลังงานการบดอัดดินและปริมาณถ้ำลอยต่อผลการทดสอบการบดอัด.....	93
4-4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกต่อถ้ำลอยที่ อัตราส่วนต่าง ๆ.....	98
4-5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ...	103
4-6 ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอยที่อัตราส่วน ต่าง ๆ.....	109
4-7 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย 0%.....	112
4-8 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน.....	114
4-9 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน.....	116
4-10 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน.....	118
4-11 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดที่ถูกปรับแก้ตามคำแนะนำของ Benson et al. (1999) (ถ้ำลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน).....	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่

4-12	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอยที่สัดส่วนต่าง ๆ ที่ ซึมผ่านด้วยด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	123
4-13	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอยที่สัดส่วนต่าง ๆ ที่ ซึมผ่านด้วยด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	126
4-14	ค่าอัตราส่วน C/C_0 กับเวลาที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอย 20% ที่พลังงาน การบดอัดต่าง ๆ ซึ่งถูกซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	130
4-15	ค่าอัตราส่วน C/C_0 กับเวลาที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอย 20% ที่พลังงาน การบดอัดต่าง ๆ ซึ่งถูกซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	131
4-16	ค่าอัตราส่วน C/C_0 กับความลึกของชั้นกันซึมบดอัดที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสม แฉะลอย 20% ที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ ซึ่งถูกซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์...	132
4-17	ค่าอัตราส่วน C/C_0 กับความลึกของชั้นกันซึมบดอัดที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสม แฉะลอย 20% ที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ ซึ่งถูกซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์...	133

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

การขยายตัวของชุมชนเมืองและความเจริญที่กระจายตัวสู่ชนบททำให้ประชากรในพื้นที่เหล่านั้นมีชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น มีรายได้มากขึ้น และมีความสามารถในการจับจ่ายใช้สอยมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ปริมาณของขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก การเพิ่มขึ้นของขยะมูลฝอยนี้จะต้องมีการดูแลและการจัดการที่ดีให้ถูกหลักสุขาภิบาล การกำจัดขยะมูลฝอยมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การเทกอง (Dumping) การฝังกลบ (Burial) การเผาโดยเตาเผา (Burning) การทำปุ๋ย (Composting) และการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Recycling) สำหรับประเทศไทยจะนิยมการฝังกลบเป็นหลัก เนื่องจากการฝังกลบมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ทำงานง่ายและสะดวก และสามารถรองรับขยะมูลฝอยได้ในปริมาณมาก

บ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) จะมีระบบป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติข้างเคียง ซึ่งชั้นกันซึมเป็นส่วนที่อยู่ด้านล่างสุด และผนังของบ่อฝังกลบขยะทำหน้าที่แยกขยะมูลฝอยและป้องกันการปนเปื้อนของดินและน้ำใต้ดินโดยรอบ เพราะหากสารปนเปื้อนในน้ำชะขยะนี้ไหลซึมลงไปปนเปื้อนในน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำข้างเคียง เมื่อมีการนำน้ำดังกล่าวไปใช้อุปโภคบริโภคก็จะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ ดังนั้นชั้นกันซึมจึงถือว่าเป็นชั้นที่สำคัญมากในระบบบ่อฝังกลบขยะ วัสดุที่จะใช้สำหรับเป็นชั้นกันซึมได้นั้นจะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ทนน้ำสูง ตามมาตรฐานการออกแบบหรือข้อกำหนดของบ่อฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลส่วนใหญ่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่เกิน 1×10^{-9} m/s และกำหนดความหนาของชั้นกันซึมอยู่ระหว่าง 60-100 เซนติเมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2554; European commission, 1999; United States Environmental Protection Agency [USEPA], 1998; International Solid Waste Association [ISWA], 2010; Environmental Protection Agency [EPA], 2000) นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านอื่นที่เหมาะสมด้วย เช่น มีกำลังรับแรงอัดสูง (Compressive strength) เพื่อรองรับน้ำหนักของขยะปริมาณมาก มีการหดตัวและบวมตัวต่ำ (Low shrink/ swell potential) มีความฝืดที่ผิวสัมผัสกับวัสดุสังเคราะห์สูง (High interfacial friction with geomembrane) มีความยืดหยุ่นสูง (High flexibility) สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีจากการสัมผัสกับน้ำชะขยะ โดยตรง

(Chemical compatibility) และง่ายต่อการก่อสร้าง (Workability) เป็นต้น (Daniel & Benson, 1990; Brandl, 1992; Kayabali, 1997; Cokca & Yilmaz, 2004; Czurda, 2006; Roberts & Shimaoka, 2008)

โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่ที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การใช้ดินเหนียวเป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะ เพราะดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึม แต่อาจมีบางข้อจำกัดสำหรับบางท้องถิ่นหรือบางพื้นที่ในการก่อสร้างชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย เช่น ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูงเกินข้อกำหนดจนไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ไม่สามารถจัดหาดินเหนียวธรรมชาติได้หรือในบางกรณีที่มีการขนส่งดินเหนียวจากท้องถิ่นหรือพื้นที่อื่นเข้ามาอาจมีค่าใช้จ่ายสูง

ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นดินทรายหรือดินเหนียวปนทรายซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงจึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมได้ ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวและทำให้การก่อสร้างชั้นกันซึมประหยัดค่าใช้จ่ายลง ก็คือการหาแหล่งวัสดุใหม่ทดแทนหรือนำวัสดุเหลือใช้หรือวัสดุทางธรรมชาติที่มีอยู่ในพื้นที่มาใช้ประโยชน์หรือการปรับปรุงคุณภาพของดินในท้องถิ่นหรือพื้นที่นั้น ๆ ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและปรับปรุงคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของวัสดุนั้นร่วมด้วย เช่น ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน และความสามารถในการต้านทานการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น เป็นต้น

ท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเป็นท่าเรือน้ำลึกหลักในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศที่มีอัตราการเติบโตของการให้บริการขนถ่ายสินค้าสูงและเป็นประตูการค้าหลักของประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน ตั้งอยู่ชายฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ของอ่าวไทยที่ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตหีบ และอำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ซึ่งนับวันยิ่งมีความสำคัญและมีบทบาทมากขึ้นในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีหน้าที่หลักในการให้บริการด้านเรือและสินค้า และเป็นผู้ให้บริการขนส่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งบริเวณท่าเรือดังกล่าวจะมีการทับถมของดินตะกอนทะเลเป็นจำนวนมาก ดินที่ถูกขุดลอกนี้จะเป็นตะกอนเนื้อละเอียดที่เกิดจากการสะสมของวัสดุต้นกำเนิดบริเวณชายฝั่งที่ทับถมกันเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง การทับถมของดินที่ถูกขุดลอกเมื่อเกิดการทับถมเพิ่มขึ้นเป็นเวลานานจากอิทธิพลของระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจึงเป็นสาเหตุให้บริเวณชายฝั่งดินเงินซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างยิ่งต่อการเข้าเทียบเรือของเรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่ตลอดจนบริเวณท่าเรือดังกล่าวปัจจุบันได้มีการพัฒนาท่าเรือไปแล้ว 2 เฟสและมีแผนการขยายการก่อสร้างแหลมฉบังเฟส

3 ชั้นจึงมีความจำเป็นต้องขุดลอกดินบริเวณท่าเรือออกเป็นจำนวนมาก โดยก่อนหน้านี้ได้มี การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำทรายผสมดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ ราช จังหวัดชลบุรี มาใช้เป็นวัสดุมวลรวมเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและความแข็งแรงในชั้นรองพื้นทาง พบว่า เมื่อนำทรายมาผสมกับดินที่ถูกขุดลอกทำให้มีการพัฒนากำลังสูงขึ้นตามปริมาณดินที่ถูก ขุดลอกที่เพิ่มมากขึ้นจนถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นดินที่ถูกขุดลอกนี้จึง มีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมทางเลือกได้

ดินที่ถูกขุดลอกออกมานั้นถือว่าเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่ไม่มีประโยชน์หรือเรียกได้ว่าเป็น “ขยะทางสิ่งแวดล้อม” จึงจำเป็นจะต้องมีการจัดการและกำจัดหรือหาพื้นที่รองรับปริมาณดินที่ถูก ขุดลอกนั้น ซึ่งวิธีการกำจัดขยะทางธรรมชาติมีอยู่หลายรูปแบบแต่ก็มีข้อจำกัด เช่น วิธีการกำจัดขยะ ทางธรรมชาติแบบดั้งเดิม เช่น การทิ้งในทะเลลึก ปัจจุบันถือว่ามีความจำกัดทางกฎหมายทั้งในและ ระหว่างประเทศ และวิธีการกำจัดแบบอื่น ๆ เช่น การทิ้งบนบก มีข้อจำกัดทางด้านค่าดำเนินการ ตลอดจนปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับปริมาณขยะจำนวนมาก (Dubois et al., 2009) ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาและลดค่าใช้จ่ายในการจัดการและกำจัด และเพื่อช่วยลด ปัญหาทางธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจากการขุดลอกดินนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ การศึกษาความเป็นไปได้และปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังซึ่งถือเป็นวัสดุ ทางเลือกทางธรรมชาติที่เหลือใช้เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ

วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ ศึกษาความเป็นไปได้และปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูก ขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ โดยจะมี การศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ ราช จังหวัดชลบุรี
2. ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย เพื่อ ประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย โดยแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก แห่งระหว่างดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอย
3. ศึกษาการสร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone)
4. ศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ด้วยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารเคมีแต่ละชนิด

5. ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) ของสารเคมีต่าง ๆ และคำนวณหาเวลาการไหลทะลุผ่าน (Breakthrough time) ของน้ำชะขยะภายใต้ปรากฏการณ์การพา (Advection) และการแพร่ (Diffusion)

ขอบเขตของการวิจัย

1. ดินที่ถูกขุดลอก ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เก็บตัวอย่างดินมาจากบริเวณเฟส 3 ของท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จ.ชลบุรี ที่ระดับความลึกจากระดับดินเดิม 0.5-1 เมตร
2. ภาชนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นภาชนะที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ได้มาจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ จังหวัดระยอง
3. แปรผันสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งระหว่างดินที่ถูกขุดลอกต่อถ่านหินที่ 100 : 0 และ 80 : 20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 0 7 และ 28 วัน
4. สร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกั้นซึมบดอัด ตาม Daniel and Benson (1990); Daniel and Wu (1993)
5. สารเคมีที่ใช้ในการซึมผ่านตัวอย่างดินบดอัดเพื่อศึกษาผลกระทบของสารเคมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และ แคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านหินและดินที่ถูกขุดลอกจากชายฝั่งท่าเทียบเรือพาณิชย์แหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จ.ชลบุรี
2. ทราบถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ดินที่ถูกขุดลอกจากชายฝั่งบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเพื่อเป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล
3. ทราบถึงผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าอัตราการซึมผ่านสูงสุดของชั้นดินกั้นซึมบดอัด ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการประเมินความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของน้ำชะขยะในชั้นวัสดุกันซึมภายหลังการใช้งาน
4. ทราบถึงเวลาการไหลทะลุผ่านของน้ำชะขยะจากทั้งปรากฏการณ์การพาและการแพร่
5. ช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม แก้ไขปัญหา และลดค่าใช้จ่ายในการจัดการและการกำจัดดินภายหลังจากขุดลอกบริเวณท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง

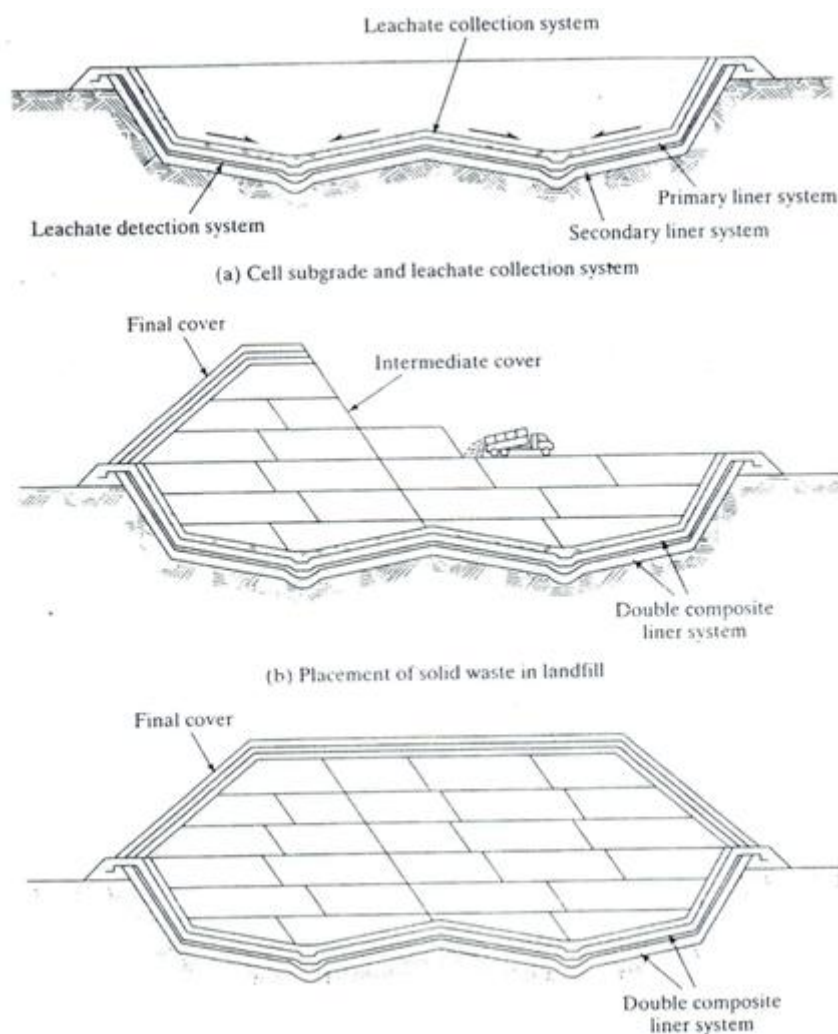
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill)

การกำจัดขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในชุมชนท้องถิ่นที่เหมาะสมและถูกหลักสุขาภิบาล คือ การฝังกลบในบ่อฝังกลบ (Sanitary landfill) ทั้งนี้เพราะเป็นระบบที่มีความสามารถในการรองรับขยะได้ในปริมาณมาก มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น การทำงานง่าย สะดวก และไม่ต้องใช้เทคโนโลยีระดับสูงเข้าช่วย การทำงานของระบบจะเริ่มต้น โดยขยะมูลฝอยจะถูกรวบรวมและลำเลียงไปเทกองไว้ในบ่อฝังกลบ จากนั้นจะถูกเกลี่ยและบดอัดขยะมูลฝอยให้ยุบตัวลง โดยใช้เครื่องจักรกลหนักแล้วปิดทับด้วยวัสดุปิดทับ เพื่อป้องกันปัญหาในด้านกลิ่น รวมทั้งแมลง หรือสัตว์ที่เป็นพาหะนำโรคมาน้ำลายหรือรบกวน ป้องกันปัญหาน้ำฝนชะล้างและเหตุรำคาญอื่น ๆ เป็นต้น ขยะมูลฝอยในบ่อฝังกลบจะถูกบดอัดและปิดทับด้วยวัสดุปิดทับเป็นชั้น ๆ จนได้ความสูงหรือปริมาณตามที่ออกแบบไว้จึงทำการปิดทับชั้นสุดท้าย ดังภาพที่ 2-1

บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่ถูกหลักสุขาภิบาล จะมีระบบป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะมูลฝอยลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินซึ่งเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อินทรีย์สารที่มีอยู่ในกองขยะมูลฝอยจะถูกย่อยด้วยกระบวนการย่อยสลายชนิดไร้อากาศ (Anaerobic decomposition) โดยจุลินทรีย์ ทำให้ขยะมูลฝอยยุบตัวและเกิดก๊าซมีเทนและน้ำเสียขึ้นในชั้นของขยะมูลฝอย เมื่อมีการไหลซึมของน้ำฝนผ่านชั้นขยะมูลฝอยจะทำให้เกิดน้ำชะขยะมูลฝอย ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนของมลสาร เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค เป็นต้น ดังนั้นหากน้ำชะขยะมูลฝอยดังกล่าวนี้ไหลซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินหรือแหล่งน้ำผิวดินแล้วเกิดการปนเปื้อน เมื่อมีการนำน้ำปนเปื้อนนี้ไปใช้เพื่อการอุปโภคบริโภค อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ ดังนั้น การดำเนินการฝังกลบขยะมูลฝอยจะต้องมีมาตรการในการป้องกันหรือบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น และมีการระบายก๊าซออกจากบริเวณฝังกลบด้วย โดยส่วนใหญ่แล้วพื้นที่ที่จะใช้ในการฝังกลบจะต้องเป็นพื้นที่ว่างไม่ได้ใช้ประโยชน์หรือเป็นที่ค้ายคุณค่าทางการเกษตร ไม่เป็นที่ลุ่มหรือน้ำท่วมขัง เป็นต้น



ภาพที่ 2-1 การทำงานของระบบการฝังกลบในบ่อฝังกลบ (Qian, Koerner, & Gray, 2002)

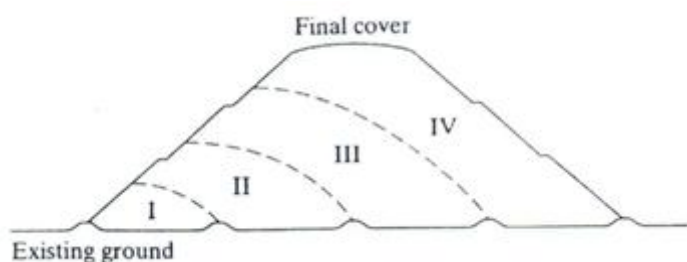
วิธีและรูปแบบของการฝังกลบขยะมูลฝอย

วิธีและรูปแบบของการฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล มี 4 แบบ คือ

1. การฝังกลบแบบพื้นราบหรือกลบบนพื้นที่ (Area method)

เป็นวิธีฝังกลบจากระดับดินเดิมโดยไม่มีการขุดดิน ขยะมูลฝอยจะถูกลำเลียงไปเทกองและเกลี่ยไว้เป็นชั้นในบ่อฝังกลบ จากนั้นทำการบดอัดขยะมูลฝอยตามแนวราบก่อนและบดอัดทับในชั้นถัดไปสูงขึ้นเรื่อยๆ จนได้ปริมาณขยะหรือระดับตามที่กำหนดแล้วจึงปิดทับด้วยวัสดุปิดทับ การฝังกลบขยะมูลฝอยโดยวิธีนี้จำเป็นต้องทำคันดิน (Embankment หรือ Beam) ตามแนวขอบพื้นที่ฝังกลบ เพื่อทำหน้าที่เป็นผนังในการบดอัดขยะมูลฝอยและป้องกันน้ำเสียที่เกิดจากการย่อยสลายของขยะมูลฝอยที่บดอัดและฝังกลบแล้วไม่ให้ซึมออกมาด้านนอก ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่

ที่จำเป็นต้องใช้วิธีนี้คือพื้นที่ราบลุ่มหรือที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินเล็กน้อย (ไม่เกิน 1 เมตร) ซึ่งทำให้ไม่สามารถขุดดินเพื่อฝังกลบด้วยวิธีฝังกลบแบบขุดร่องได้ เพราะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำเสียจากขยะมูลฝอยลงสู่ระดับน้ำใต้ดินได้ การฝังกลบด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องจัดหาดินมาจากที่อื่น เพื่อมาทำคันดินส่งผลทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) ลักษณะการฝังกลบแบบพื้นราบ ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 การฝังกลบแบบพื้นราบหรือกลบบนพื้นที่ (Area method) (Qian et al., 2002)

2. การฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method)

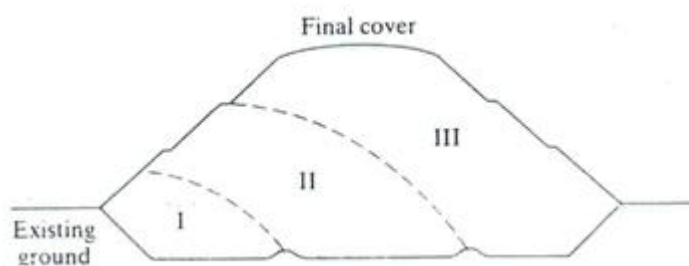
เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับที่ต่ำกว่าระดับดินเดิม โดยทำการขุดดินลึกลงไปให้ได้ระดับตามที่กำหนด แล้วจึงเริ่มบดอัดขยะมูลฝอยให้เป็นชั้นบาง ๆ ทับกันหนาขึ้นเรื่อย ๆ จนได้ระดับของขยะมูลฝอยบดอัดแต่ละชั้นตามที่กำหนด โดยทั่วไปความลึกของการขุดร่องจะถูกกำหนดด้วยระดับน้ำใต้ดิน คือ อย่างน้อยระดับก้นร่องควรอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 1 เมตร โดยยึดระดับน้ำในฤดูฝนเป็นเกณฑ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำชะขยะต่อน้ำใต้ดิน การฝังกลบแบบขุดร่องไม่จำเป็นต้องทำคันดินเพราะสามารถใช้ผนังของร่องขุดเป็นกำแพงกั้นขยะมูลฝอยที่จะบดอัดได้ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องขนดินจากนอกพื้นที่ฝังกลบและสามารถใช้ดินที่ขุดออกแล้วนั้นกลับมาใช้กลบขยะมูลฝอยได้อีก (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) ลักษณะการฝังกลบแบบขุดร่อง ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 การฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method) (Qian et al., 2002)

3. การฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่อง (Area and trench method)

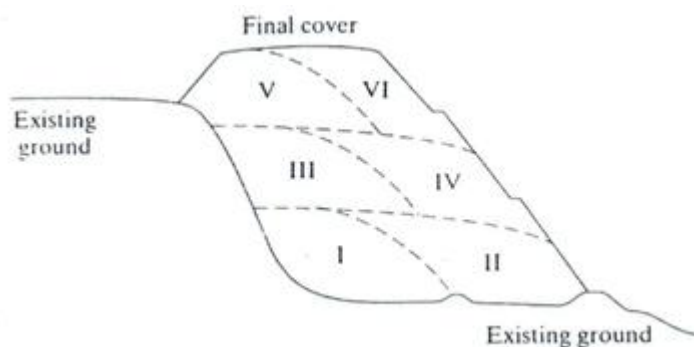
เป็นวิธีฝังกลบที่รวมการฝังกลบแบบพื้นราบและแบบขุดร่องเข้าด้วยกัน โดยการขุดดินนั้นจะขุดพื้นที่ขนาดใหญ่กว่าการฝังกลบแบบขุดร่อง แล้วจึงเริ่มบดอัดขยะมูลฝอยให้เป็นชั้นบาง ๆ ทับกันหนาขึ้นเรื่อย ๆ จนได้ระดับของขยะมูลฝอยบดอัดแต่ละชั้นตามที่กำหนด โดยทั่วไปความลึกของการขุดพื้นที่จะขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นดินเหนียวธรรมชาติและระดับน้ำใต้ดิน สำหรับการฝังกลบไม่จำเป็นต้องทำคันดินเพราะสามารถใช้ผนังของร่องขุดเป็นกำแพงยันขยะมูลฝอยที่จะบดอัดได้ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องขนดินจากนอกพื้นที่ฝังกลบและสามารถใช้ดินที่ขุดออกกลับมาใช้กลบขยะมูลฝอยได้อีก ลักษณะการฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่อง ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การฝังกลบแบบพื้นราบและขุดร่อง (Area and trench method) (Qian et al., 2002)

4. การฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon method)

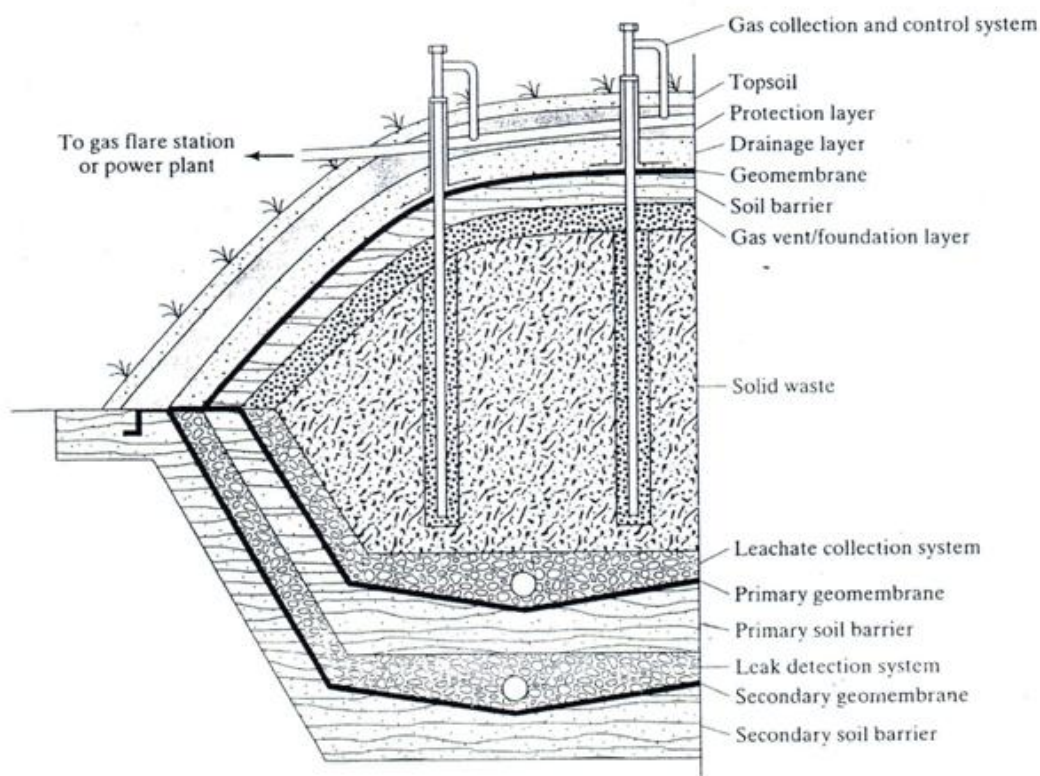
เป็นวิธีฝังกลบบนพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งขนาดใหญ่ซึ่งอาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการขุด เช่น หุบเขา ห้วย บ่อ เหมือน เป็นต้น วิธีการในการฝังกลบและอัดขยะมูลฝอยในบ่อแต่ละแห่งอาจแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศของพื้นที่นั้น ๆ เช่น ถ้าพื้นที่ของบ่อมีสภาพค่อนข้างราบอาจใช้วิธีการฝังกลบแบบพื้นราบหรือแบบขุดร่องแล้วแต่กรณี ในการฝังกลบนั้นจะต้องมีการปรับพื้นที่ให้เสมอกันเพื่อให้สามารถปูชั้นกันซึมได้สะดวก และเนื่องจากเป็นบ่อโล่งจึงอาจจำเป็นต้องหาวัสดุดินมาเตรียมไว้เพื่อกลบทับ ลักษณะการฝังกลบแบบหุบเขาดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 การฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon method) (Qian et al., 2002)

ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill components)

ในการออกแบบบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยหรือขยะอันตรายนั้นส่วนสำคัญที่จะพิจารณา คือ การห่อหุ้มบ่อฝังกลบที่สามารถทำหน้าที่แยกขยะมูลฝอยออกจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบและป้องกันการรั่วไหลของน้ำชะขยะ ป้องกันการแทรกซึมของปริมาณน้ำฝนและควบคุมการเกิดก๊าซได้ ส่วนประกอบที่สำคัญของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย คือ ระบบชั้นกันซึม (Liner system) ระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate collection and removal system) ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซ (Gas collection and control system) และระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final cover system) ดังภาพที่ 2-6 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

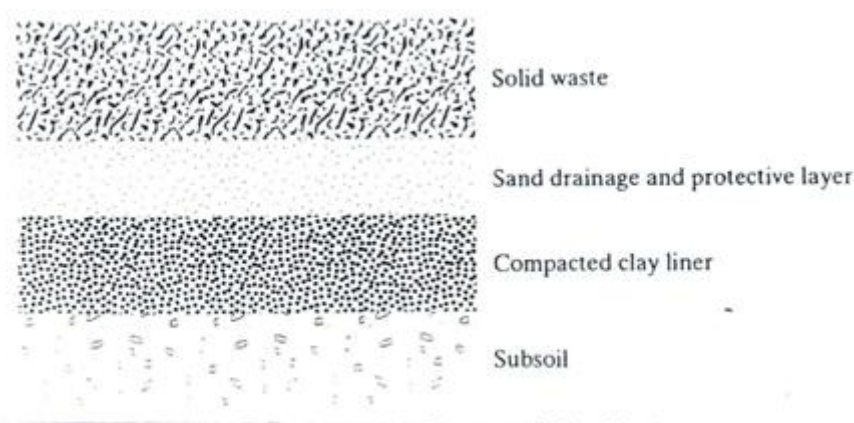


ภาพที่ 2-6 ส่วนประกอบของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Qian et al., 2002)

1. ระบบชั้นกันซึม (Liner system)

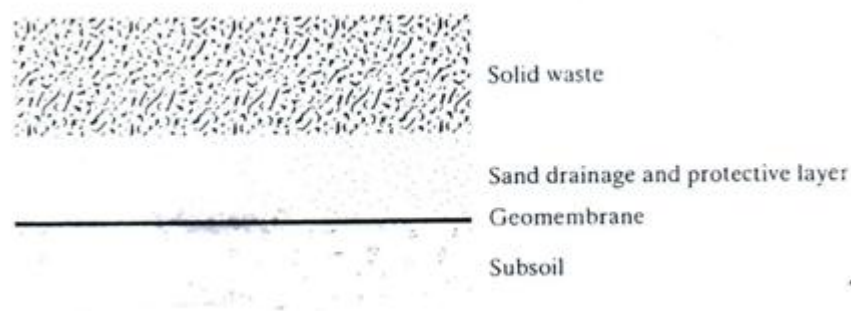
ชั้นกันซึม คือ ส่วนที่อยู่ล่างสุดและส่วนผนังของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ทำหน้าที่เป็นแนวกันเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของน้ำชะขยะลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำใต้ดิน โดยรอบทั้งโดยการพา (Advective) และการแพร่ (Diffusive) ดังนั้นชั้นกันซึมต้องสร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสม คือ มีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านทานน้ำหนักของขยะมูลฝอยจากการฝังกลบและทนต่อการกัดกร่อนจากการสัมผัสกับน้ำชะขยะมูลฝอยโดยตรง นอกจากนี้ชั้นวัสดุกันซึมนี้ต้องติดตั้งบนพื้นหรือสภาพทางธรณีวิทยาที่สามารถรองรับน้ำหนักกดจากน้ำหนักของขยะมูลฝอย และต้องติดตั้งให้ครอบคลุมพื้นที่โดยรอบทั้งหมดที่จะต้องสัมผัสกับขยะมูลฝอยหรือน้ำชะขยะมูลฝอยด้วย ชั้นกันซึมนี้อาจใช้ดินเหนียวบดอัด (Compacted clay) วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials) ประเภทแผ่นโพลีเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) หรือใช้ดินเหนียวร่วมกับวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetic) โดยทั่วไปการปูชั้นวัสดุกันซึมที่ผนังและก้นบ่อฝังกลบจะแบ่งออกเป็น 5 ประเภท (Qian et al., 2002) ดังนี้

1.1 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดชั้นเดียว (Single compacted clay liner) ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวบดอัด 1 ชั้นและมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย (Sand drainage and protective layer) อยู่ด้านบน และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไป ดังภาพที่ 2-7



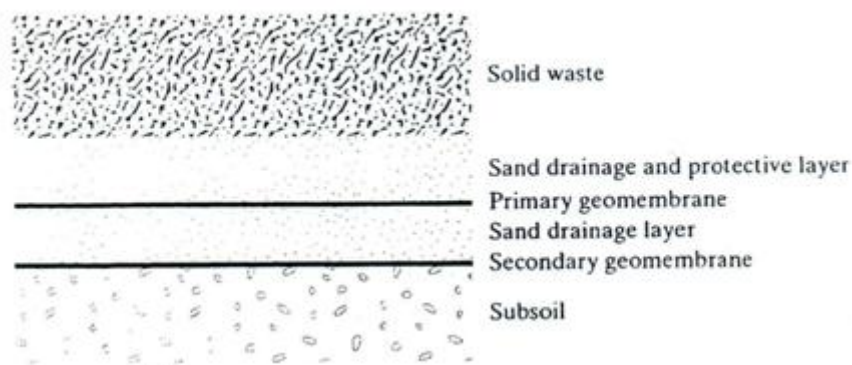
ภาพที่ 2-7 ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดชั้นเดียว (Single compacted clay liner) (Qian et al., 2002)

1.2 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนชั้นเดียว (Single geomembrane liner) ประกอบด้วย แผ่นจีโอเมมเบรน 1 แผ่น และมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอยอยู่ด้านบน และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไป ดังภาพที่ 2-8



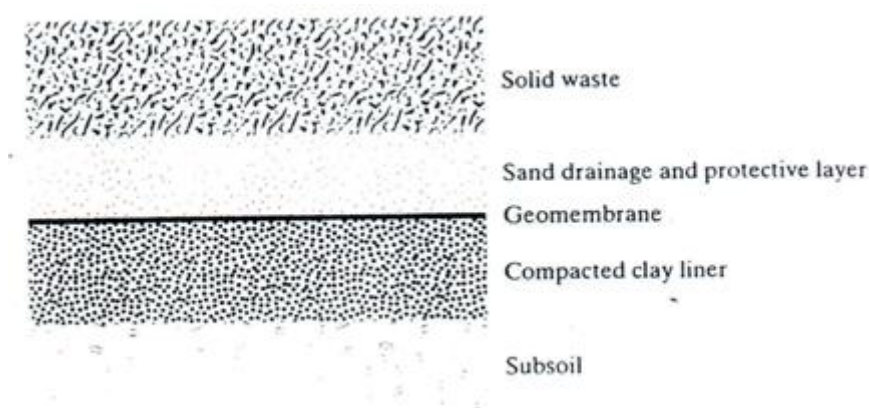
ภาพที่ 2-8 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนชั้นเดียว (Single geomembrane liner) (Qian et al., 2002)

1.3 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนสองชั้น (Double geomembrane liner) ประกอบด้วย แผ่นจีโอเมมเบรน 2 แผ่น โดยระหว่างแผ่นจีโอเมมเบรนชั้นที่ 1 และ 2 จะถูกแทรกด้วยชั้นทรายระบายและด้านบนของแผ่นจีโอเมมเบรนแผ่นที่ 2 คือ ชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไป ดังภาพที่ 2-9



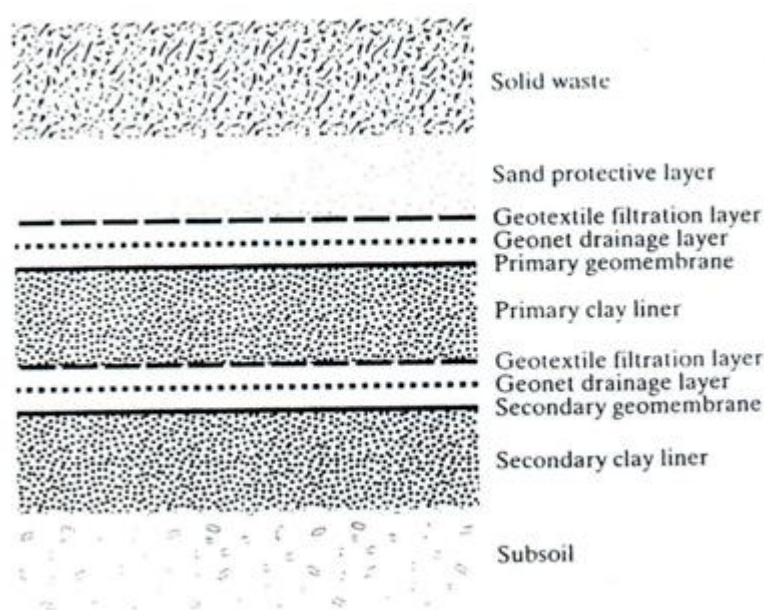
ภาพที่ 2-9 ชั้นกันซึมจีโอเมมเบรนสองชั้น (Double geomembrane liner) (Qian et al., 2002)

1.4 ชั้นกันซึมผสมชั้นเดียว (Single composite liner) ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอัด 1 ชั้นและปูทับหน้าด้วยแผ่นจีโอเมมเบรน 1 แผ่น ด้านบนของแผ่นจีโอเมมเบรนจะมีชั้นรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอย และมีการฝังขยะมูลฝอยลงไป ดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 ชั้นกันซึมผสมชั้นเดียว (Single composite liner) (Qian et al., 2002)

1.5 ชั้นกันซึมผสมสองชั้น (Double composite liner) เริ่มต้นจากด้านล่างใน ภาพที่ 2-11 ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวคอดักชั้นที่ 2 และแผ่นจีโอเมมเบรนแผ่นที่ 2 ปูทับด้วยแผ่น จีโอเน็ต (Geonet) และแผ่นจีโอเท็กซ์ไทล์ (Geotextile) ทำหน้าที่เป็นชั้นกรอง จากนั้นปูทับด้วยชั้น ดินเหนียวคอดัก แผ่นจีโอเน็ต และแผ่นจีโอเท็กซ์ไทล์ (Geotextile) ตามลำดับ และจะมีชั้นรวบรวม และสูบน้ำชะขยะมูลฝอยอยู่ด้านบน

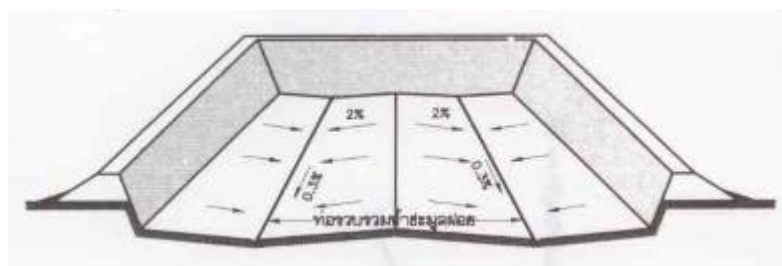


ภาพที่ 2-11 ชั้นกันซึมผสมสองชั้น (Double composite liner) (Qian et al., 2002)

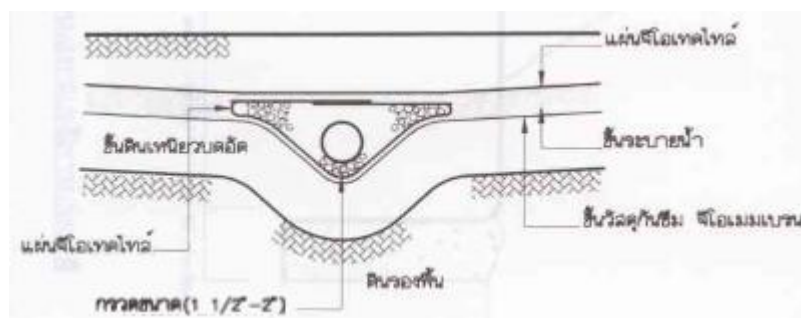
2. ระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะมูลฝอย (Leachate collection and removal system)

การออกแบบบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่มีชั้นวัสดุกันซึมเพื่อป้องกันการไหลซึมของ น้ำชะขยะมูลฝอยไปปนเปื้อนชั้นน้ำใต้ดิน ระบบรวบรวมและสูบน้ำชะขยะมูลฝอยจึงต้องสร้างจาก วัสดุที่มีความทนทานทางเคมีจากน้ำชะขยะมูลฝอย และแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันการพังทลาย ภายใต้อิทธิพลที่เกิดจากการกองทับของขยะมูลฝอย วัสดุเคลือบทับ และเครื่องจักรกลที่ใช้ในการฝัง กลบ ระบบรวมน้ำชะขยะนี้จะวางตัวอยู่เหนือชั้นวัสดุกันซึม ประกอบด้วยท่อ PVC ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 4 นิ้วเจาะรู หุ้มด้วยแผ่นกรองใยสังเคราะห์และวางในชั้นกรวดหรือ ชั้นทรายมนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity) ไม่น้อยกว่า 1×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที และมีความหนาไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร ระยะห่างและความลาดเอียงของ

ท่อรวบรวมน้ำชะขยะมูลฝอยนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันน้ำชะขยะมูลฝอยที่ยอมให้เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะไม่เกิน 30 เซนติเมตร นอกจากนี้การออกแบบท่อรวบรวมน้ำชะขยะมูลฝอยจะต้องมีวิธีการทดสอบการอุดตันและวิธีทำความสะอาดท่อ (ภาพที่ 2-12)



(a) ระบบรวบรวมน้ำชะขยะ



(b) รายละเอียดของท่อรวบรวมน้ำชะขยะ

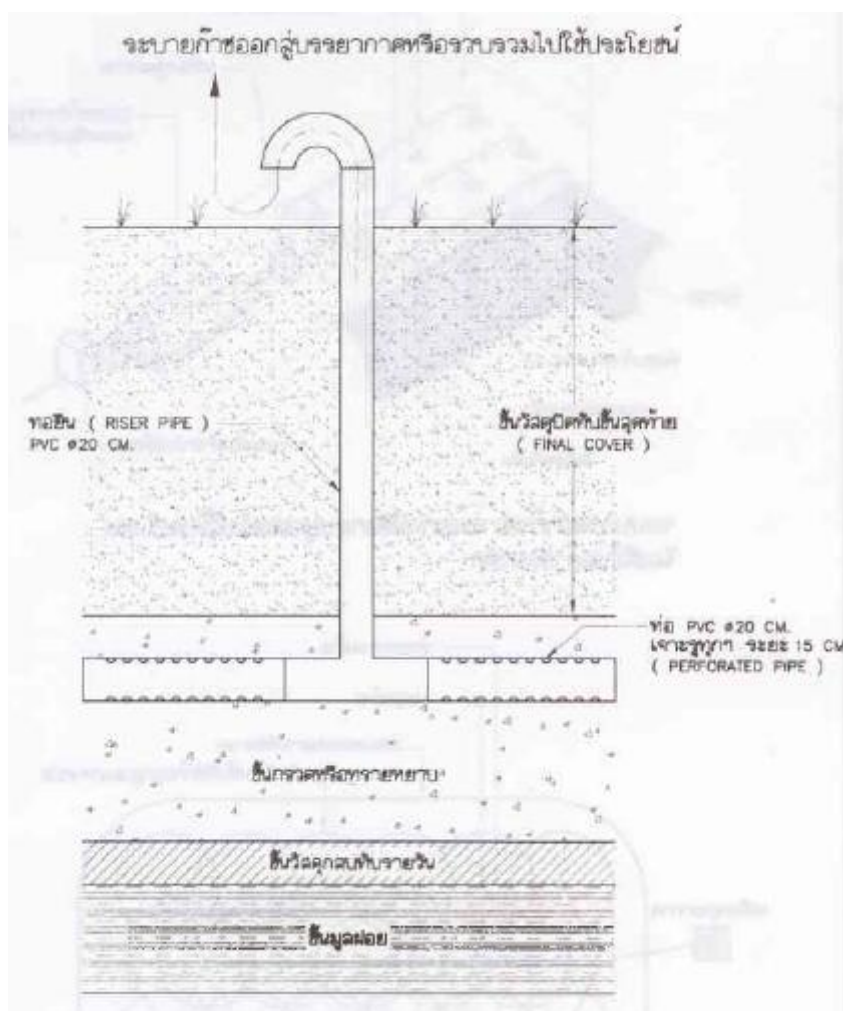
ภาพที่ 2-12 ระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะมูลฝอย (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

3. ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซ (Gas collection and control system)

การนำเปื้อยของขยะมูลฝอยสามารถทำให้เกิดก๊าซปริมาณมาก ก๊าซที่เกิดขึ้นในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 2 ชนิดที่สำคัญ คือ ก๊าซมีเทน (Methane, CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซจะถูกใช้เพื่อเก็บรวบรวมก๊าซในบ่อฝังกลบในระหว่างการนำเปื้อยของขยะมูลฝอยที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังป้องกันการระเบิดและไฟไหม้และป้องกันกลิ่นเหม็นรบกวน ก๊าซในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยสามารถใช้ในการสร้างพลังงานหรือเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้ ตัวอย่างท่อระบายก๊าซจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ดังภาพที่ 2-13 ระบบรวบรวมและควบคุมก๊าซจากบ่อฝังกลบแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

3.1 การวางท่อหรือบ่อระบายก๊าซในแนวนอนหรือแนวตั้งของบ่อฝังกลบเพื่อลดแรงดันของก๊าซและระบายสู่บรรยากาศโดยธรรมชาติเรียกว่า Passive control ซึ่งการวางตำแหน่งระยะห่างของบ่อหรือท่อในแนวตั้งโดยทั่วไปใช้ระยะประมาณ 30-40 เมตร

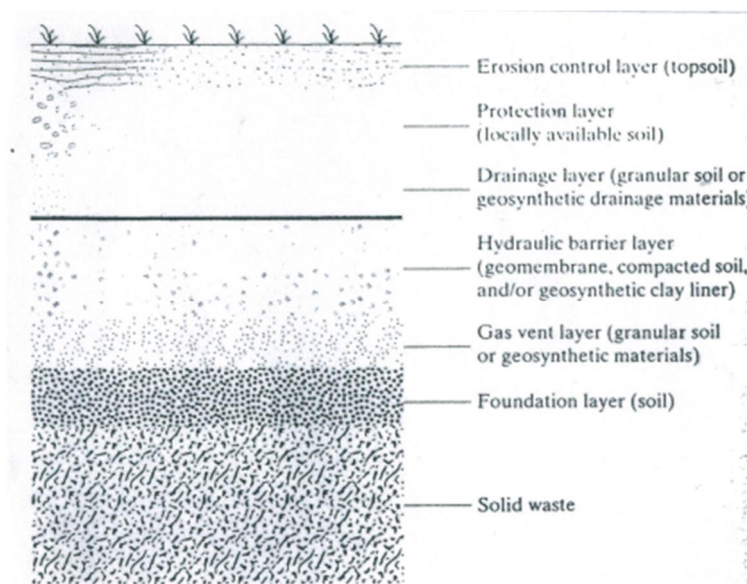
3.2 การวางท่อในแนวตั้งและติดตั้งอุปกรณ์ดูดก๊าซจากบ่อฝังกลบเรียกว่า Active control การวางท่อโดยวิธีนี้มักมีจุดมุ่งหมายที่จะนำก๊าซที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่มีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นมากหรือใช้กำจัดก๊าซที่เกิดขึ้น โดยการเผาไหม้ (Flaring) ทั้งนี้ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศด้วย



ภาพที่ 2-13 ตัวอย่างท่อระบายก๊าซจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

4. ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Final cover system)

ระบบปิดทับชั้นสุดท้ายซึ่งถูกสร้างโดยตรงที่ด้านบนของขยะมูลฝอยที่ถูกถม รายละเอียดของระบบปิดทับชั้นสุดท้าย ดังภาพที่ 2-14 โดยทั่วไปส่วนประกอบภายในระบบปิดทับชั้นสุดท้าย ประกอบด้วยชั้นป้องกันการกัดเซาะ (Erosion control layer) ชั้นป้องกัน (Protection layer) ชั้นระบาย (Drainage layer) ชั้นกันซึม (Hydraulic barrier layer) ชั้นระบายก๊าซ (Gas vent layer) และชั้นดินกลบทับ (Foundation layer) ส่วนประกอบดังกล่าวนี้ไม่จำเป็นต้องอยู่ในระบบปิดทับสุดท้ายทั้งหมด เช่น ชั้นระบายก๊าซอาจต้องการสำหรับบางระบบปิดทับชั้นสุดท้ายเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าขยะมูลฝอยนั้นต้องการผลิตก๊าซหรือรวบรวมและกำจัด



ภาพที่ 2-14 รายละเอียดของระบบปิดทับชั้นสุดท้าย (Qian et al., 2002)

ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted clay liner)

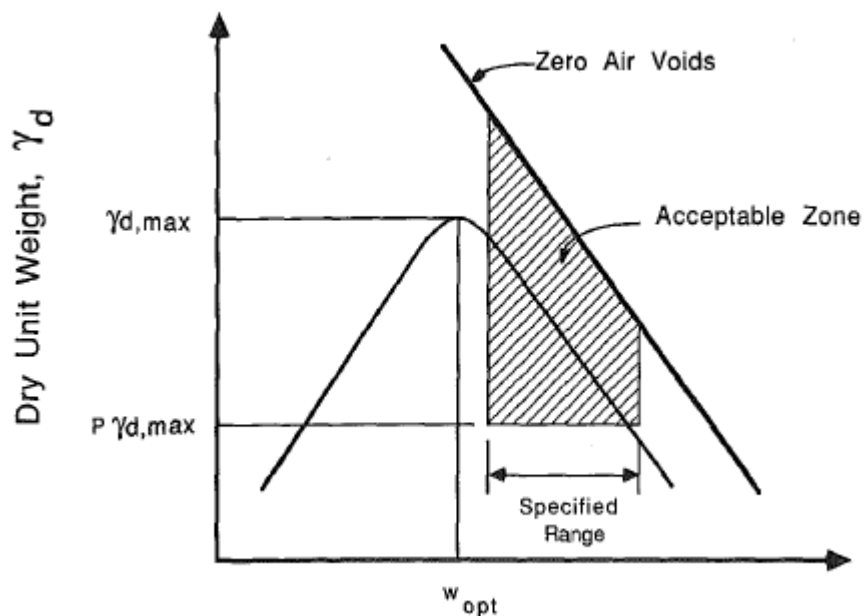
ชั้นกันซึม (Liner) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างสุดของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำชะขยะมูลฝอยลงสู่ใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติใกล้เคียง ดินเหนียวบดอัดมักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยและกักเก็บของเสีย ทั้งนี้ เนื่องจากดินเหนียวมีคุณสมบัติในการระบายน้ำต่ำ นอกจากนี้ประจุลบที่อยู่ในอนุภาคของดินเหนียวยังสามารถหน่วงประจุบวกของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำชะขยะได้ หน่วยงานที่ควบคุมดูแลส่วนใหญ่ต้องการออกแบบให้ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted clay liner)

และชั้นปิดทับ (Cover) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s เพื่อกักเก็บของเสียอันตราย (Hazardous waste) ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial waste) และขยะมูลฝอยจากชุมชน (Municipal solid waste)

นอกจากนี้สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐหรืออีพีเอ (Environmental protection agency, EPA) แนะนำว่าวัสดุดินที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบจะต้องมีคุณสมบัติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s ดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI) มากกว่า 10% แต่ต้องไม่เกิน 30-40% เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมหยาบหรือก้อนกรวดน้อยกว่า 10% และขนาดอนุภาคใหญ่สุดไม่เกิน 2 นิ้ว

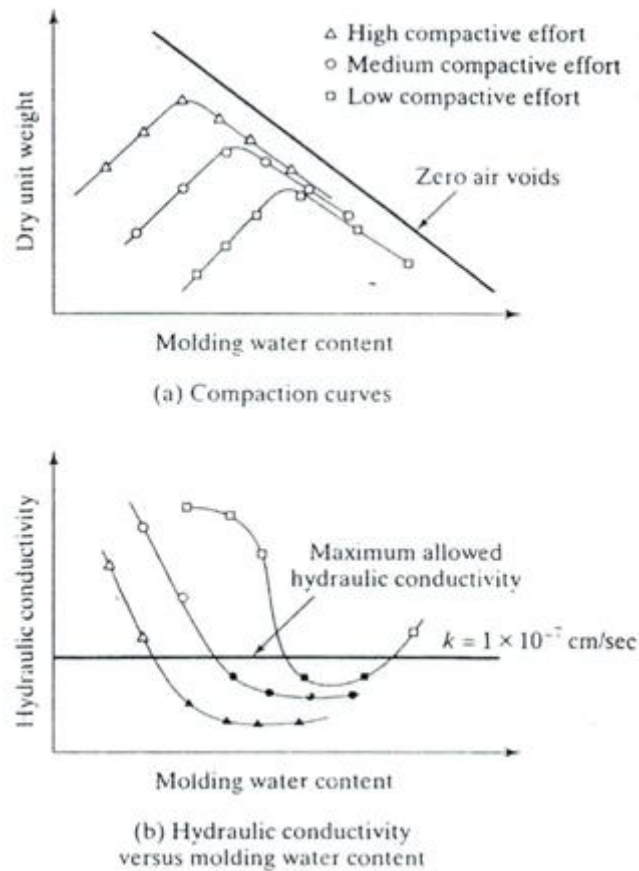
1. การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดในอดีต

ในอดีตขอบเขตที่ยอมรับได้สำหรับการบดอัดชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะมักถูกกำหนดด้วยช่วงของปริมาณความชื้นในการบดอัดและค่าหน่วยน้ำหนักชั้นต่ำ ดังภาพที่ 2-15 ซึ่งพัฒนาจากข้อกำหนดของการบดอัดดินเหนียว และเขื่อนดิน จากงานวิจัยของ Herrmann and Elsbury (1987) พบว่าโดยส่วนใหญ่ผู้ออกแบบมักต้องการค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินเหนียวบดอัดมากกว่าหรือเท่ากับ 95% ของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry,max}$) จากการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard proctor, ASTM D-698) หรือ 90% ของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจากการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor, ASTM D1557) และช่วงที่ยอมรับได้ของปริมาณความชื้นสำหรับชั้นดินกันซึมและชั้นปิดทับ โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 0-4% ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Wet of optimum, OMC) ของการบดอัดดินแบบมาตรฐานหรือการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน เนื่องจากการบดอัดที่ด้านเปียกจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำลง ((Lambe, 1958; Mitchell, Hopper, & Campanella, 1965; Boynton & Daniel, 1985)



ภาพที่ 2-15 ขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมสำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Daniel & Benson, 1990)

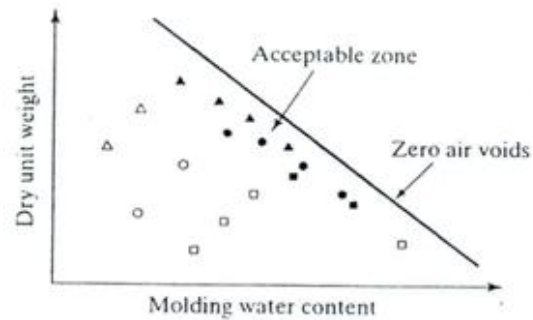
Mitchell et al. (1965) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวบดอัด พบว่า พลังงานและวิธีการบดอัดมีอิทธิพลที่สำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวบดอัด กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัดส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินลดต่ำลง ดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 ผลกระทบของพลังงานการบดอัดต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน

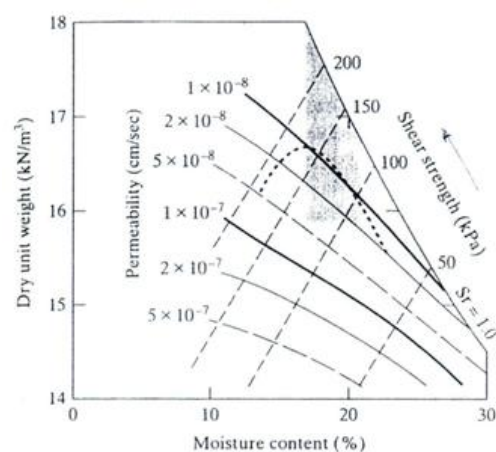
(Daniel & Benson, 1990)

ข้อมูลการบดอัดจากภาพที่ 2-16 ถูกนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ใหม่โดย Daniel and Benson (1990) ดังภาพที่ 2-17 โดยกำหนดให้ใช้สัญลักษณ์โปร่งสำหรับตัวอย่างดินบดอัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-9} m/s และใช้สัญลักษณ์ทึบสำหรับตัวอย่างดินบดอัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s พื้นที่ที่แรเงาในภาพที่ 2-17 แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดิน ซึ่งพบว่ารูปร่างของขอบเขตที่ยอมรับได้ในภาพที่ 2-17 มีความแตกต่างจากภาพที่ 2-16 โดยสิ้นเชิง (Daniel & Benson, 1990)



ภาพที่ 2-17 กราฟการบดอัดใหม่โดยใช้สัญลักษณ์ที่บ่งชี้สำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ (Daniel & Benson, 1990)

Boutwell and Hedges (1989) ได้สร้างเส้นชั้นความสูง (Contour) ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและกำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินเหนียวบดอัด ดังภาพที่ 2-18 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั่วไปในภาพที่ 2-18 จะใช้ที่ 95% ของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานและขอบเขตที่ยอมรับได้สำหรับปริมาณความชื้นจะใช้ที่ 0-4% ทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม พบว่าทุกพิกัดของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้แบบดั้งเดิมมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s แต่รูปร่างและขอบเขตที่ยอมรับได้ในภาพที่ 2-18 กลับไม่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและกำลังรับแรงเฉือน



ภาพที่ 2-18 เส้นชั้นความสูงสำหรับค่าคงที่ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm/ sec) และกำลังรับแรงเฉือน (kPa) (Boutwell & Hedges, 1989)

ผลการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการบดอัดดินแบบดั้งเดิมเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมในการแบ่งแยกระหว่างปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่สอดคล้องกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s และปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งที่สอดคล้องกับดินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-9} m/s

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. การพิจารณาการบดอัดและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

สิ่งที่สำคัญในการก่อสร้างชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดเพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ คือ กระบวนการบดอัดดินที่เหมาะสม กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง ปริมาณความชื้น และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ใช้สำหรับการออกแบบและควบคุม การก่อสร้างชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การทดสอบการบดอัดดิน และการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

2.1 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test)

การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดจะถูกต้องและเหมาะสมมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของดินแต่ละชนิด ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในสนามมักจะมีความสอดคล้องกับเงื่อนไขการก่อสร้างจริงของบ่อฝังกลบขยะโดยตรงเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การกำหนดเกณฑ์การบดอัดโดยการเลือกใช้ข้อมูลจากการทดสอบการบดอัดในสนามมักมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ด้วยเหตุนี้วิศวกรผู้ออกแบบจึงมักเลือกใช้ข้อมูลการบดอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการกำหนดเกณฑ์การบดอัดแทน อย่างไรก็ตามการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถจำลองพลังงานในการบดอัดให้เหมือนกับการวิ่งผ่านของเครื่องจักรหนักในการบดอัดในสนามได้ 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 คือ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด ได้แก่ $12,380 \text{ lb-ft/ft}^3$ และ $56,250 \text{ lb-ft/ft}^3$ ตามลำดับ โดยการบดอัดแบบมาตรฐานทดสอบโดยใช้ก้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ (24 นิวตัน) ระยะยก 12 นิ้ว (300 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่า ๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานทดสอบโดยใช้ก้อนมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ (45 นิวตัน) ระยะยก 18 นิ้ว (460 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 5 ชั้นเท่า ๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น พลังงานในการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าประมาณ 4 เท่าของพลังงานในการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

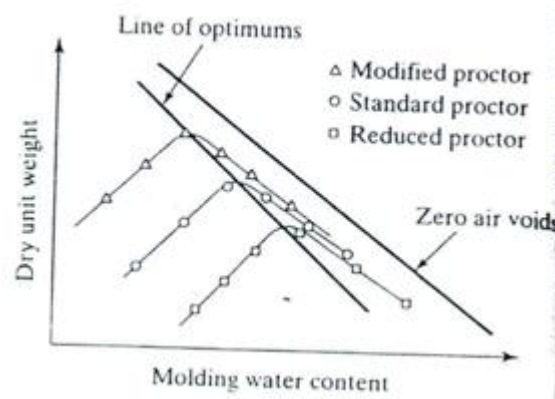
เพื่อให้ช่วงของพลังงานการบดอัดกว้างขึ้น Daniel and Benson (1990) ได้พัฒนาวิธีการทดสอบการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced proctor test) ขึ้น ซึ่งทำการทดสอบเช่นเดียวกับการบดอัดดินแบบมาตรฐาน คือ ทดสอบโดยใช้ก้อนมาตรฐานหนัก 5.5 ปอนด์ (24 นิวตัน) ระยะยก 12 นิ้ว (300 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 3 ชั้นเท่า ๆ กัน แต่บดอัดดิน 15 ครั้งต่อชั้น ตารางที่ 2-1 แสดงรายละเอียดการทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 ประเภท

สำหรับการก่อสร้างบ่อฝังกลบในสนามมีแนวคิดพื้นฐานในการใช้การบดอัดดิน 3 พลังงานแทนช่วงพลังงานในการบดอัดที่คาดหวังในสนาม นั่นคือ พลังงานในการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานถือเป็นตัวแทนพลังงานในการบดอัดระดับสูงสุดในสนาม พลังงานในการบดอัดแบบมาตรฐานถือเป็นตัวแทนพลังงานในการบดอัดระดับกลางในสนาม และพลังงานในการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐานถือเป็นตัวแทนพลังงานในการบดอัดระดับต่ำสุดสำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดและชั้นปิดทับทั่วไป

ตารางที่ 2-1 การทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 ประเภท

ชนิดของ การทดสอบ	น้ำหนักของก้อน		ระยะยก		จำนวน ชั้น	จำนวน ครั้งต่อ ชั้น	พลังงาน	
	ปอนด์ (lb)	นิวตัน (N)	นิ้ว (inch)	มิลลิเมตร (mm)			lb-ft/ ft ³	kN- m/ m ³
การบดอัดแบบ สูงกว่ามาตรฐาน	10	45	18	450	5	25	56,250	2,690
การบดอัดแบบ มาตรฐาน	5.5	24	12	300	3	25	12,380	590
การบดอัดแบบ ต่ำกว่ามาตรฐาน	5.5	24	12	300	3	15	7,430	360

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดิน 3 พลังงาน ดังภาพที่ 2-19 ซึ่งได้จากการเตรียมตัวอย่างดินประมาณ 4-6 ตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันและทำการบดอัดดินในโมลที่ทราบปริมาตรโดยใช้ชั้นตอนในการบดอัดเดียวกัน ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight, γ_{dry}) และปริมาณความชื้น (Water content, w) ของแต่ละตัวอย่างที่บันทึกได้จะถูกนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้น เรียกว่า กราฟการบดอัดดิน (Compaction curve) ค่าสูงสุดของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเรียกว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry,max}$) ปริมาณความชื้นที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเรียกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content, OWC)



ภาพที่ 2-19 กราฟการบดอัดด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การบดอัดแบบมาตรฐาน และการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Qian et al., 2002)

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

ΔH = การสูญเสียเฮดตลอดดินตัวอย่าง (cm)

L = ความยาวของตัวอย่าง (cm)

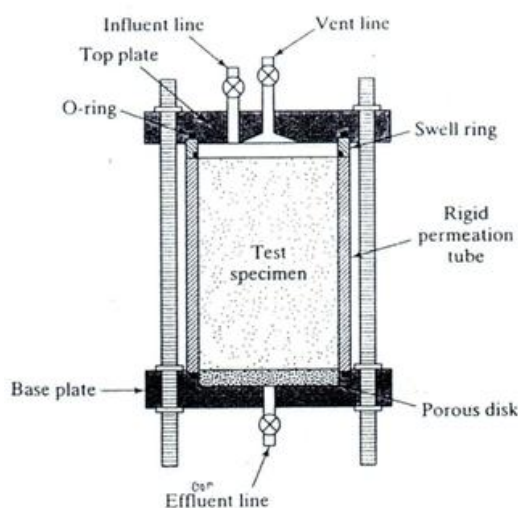
A = พื้นที่หน้าตัดของดินตัวอย่างตั้งฉากกับทิศทางของการไหล (cm^2)

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของตัวอย่างดินเหนียวบดอัดในห้องปฏิบัติการมีด้วยกัน 2 วิธี คือ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head permeability test) และแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลง (Falling head

permeability test) อุปกรณ์ที่นิยมใช้ทดสอบโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็ง (Rigid wall permeameter, ASTM D2434) และชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่น (Flexible wall permeameter, ASTM D5084) สำหรับชุดทดสอบแบบผนังแข็งสามารถใช้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำคงที่หรือแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนชุดทดสอบแบบผนังยืดหยุ่นมักใช้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำคงที่

รายละเอียดของชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็ง ดังภาพที่ 2-20 ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกที่ทำจากโลหะหรือพลาสติกสำหรับบรรจุตัวอย่างทดสอบ แต่หากทำการทดสอบการซึมผ่านของสารเคมีหรือน้ำชะขยะควรใช้ท่อแก้วทรงกระบอกแทน ทิศทางการไหลของของเหลวในการทดสอบสามารถควบคุมให้ไหลซึมผ่านจากด้านบนไปยังด้านล่างหรือด้านล่างไปยังด้านบนก็ได้ แต่การควบคุมการไหลจากด้านล่างไปยังด้านบนจะสามารถช่วยไล่หรือกำจัดก๊าซหรือฟองอากาศได้

ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็งมีข้อดี คือ ใช้งานง่าย ค่าใช้จ่ายถูก และเป็นเครื่องมือที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ แต่มีข้อเสีย คือ มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการไหลซึมด้านข้างของกระบอกได้

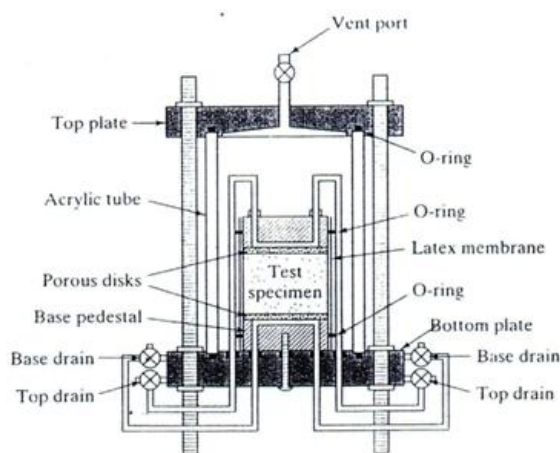


ภาพที่ 2-20 ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังแข็ง (Qian et al., 2002)

รายละเอียดของชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่น ดังภาพที่ 2-21 โดยทั่วไปตัวอย่างทดสอบจะถูกเตรียมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.85 นิ้ว (72 มิลลิเมตร) และสูง 2-3 นิ้ว (50-75 มิลลิเมตร) ประกอบด้วยแผ่นหินปูนทั้งด้านบนและด้านล่างและ หุ้มด้านข้างของตัวอย่างด้วยแผ่นยางเมมเบรนยืดหยุ่น (Flexible rubber membrane) ติดตั้งตัวอย่าง ในชุดทดสอบและให้ความดันย้อนกลับ (Back pressure) เพื่อทำให้ตัวอย่างคินอิมตัวด้วยน้ำ เติมน้ำ ในชุดทดสอบและรักษาความดันบรรยากาศภายในเพื่อลดแผ่นยางเมมเบรนยืดหยุ่นให้ติดกับ ตัวอย่างทดสอบเพื่อลดหรือจัดการไหลซึมด้านข้าง

ภายหลังจากที่ตัวอย่างทดสอบอิมตัวด้วยน้ำแล้วจะทำการอัดตัวคายน้ำ (Consolidated) ภายใต้อุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปค่าความดันของการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation pressure) มักจะถูกกำหนดตามการคาดการณ์ค่าความดันกดทับในสนาม (Field overburden pressure) เมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้วจะกำหนดความชันทางชลศาสตร์โดยการใช้ ความดันที่แตกต่างกันที่ด้านบนและด้านล่างของตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปมักกำหนดให้มีทิศทางการไหลซึมผ่านจากด้านล่างไปยังด้านบน และวัดอัตราการไหลจากปริมาณน้ำที่ไหลออกต่อเวลา

ชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่นมีข้อดีหลายประการ คือ สามารถจัดการปัญหาการไหลซึมด้านข้าง สามารถจำลองค่าความดันให้สอดคล้องกับค่าความดัน ในสนามได้ ตัวอย่างทดสอบอิมตัวด้วยน้ำ และใช้เวลาในการทดสอบน้อย แต่มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่าย สูง การใช้งานซับซ้อนมาก ทดสอบที่ค่าความดันประสิทธิผล (Effective confining pressure) ต่ำ มากไม่ได้ (อย่างน้อย 14 kPa เพื่อป้องกันการไหลซึมด้านข้าง) และแผ่นเมมเบรนจะถูกทำลายได้ง่ายเมื่อทำการทดสอบการซึมผ่านของสารเคมีหรือน้ำชะขยะ

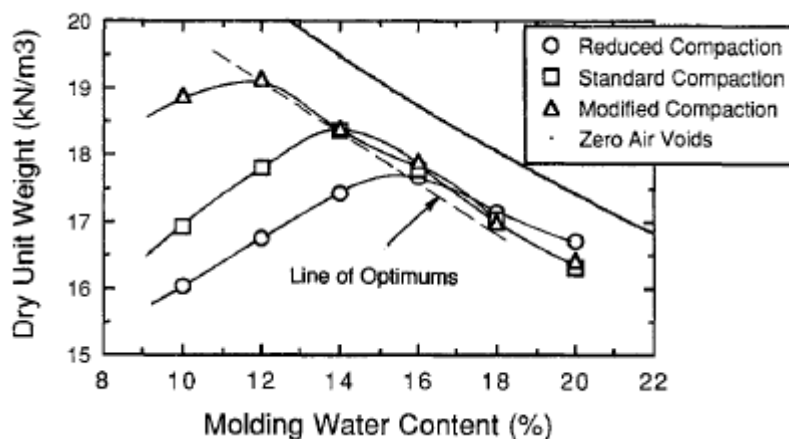


ภาพที่ 2-21 ชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยืดหยุ่น (Qian et al., 2002)

3. การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Design of compacted clay liners)

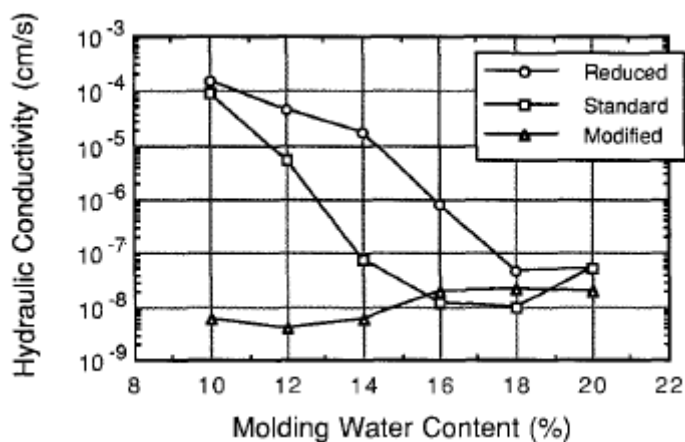
การออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดที่ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ เพื่อป้องกันหรือลดการรั่วไหลของน้ำชะขยะ มีกำลังรับแรงเฉือนเพียงพอเพื่อรองรับน้ำหนักของขยะมูลฝอยที่มากคืบ และมีการหดตัวน้อยเพื่อป้องกันการแตกแห้ง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการออกแบบชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด คือ เพื่อวิเคราะห์หาช่วงของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งในการบดอัดดินให้มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ได้แก่ 1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s 2) มีค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) มากกว่าหรือเท่ากับ 200 kPa และ 3) มีค่าความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric strain) ไม่มากกว่า 4% (Daniel & Benson, 1990) การสร้างขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดสามารถทำได้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ทำการบดอัดดินตัวอย่างด้วยพลังงาน 3 พลังงาน ได้แก่ การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน การบดอัดดินแบบมาตรฐาน และการบดอัดดินแบบต่ำกว่ามาตรฐาน จากนั้นนำผลการบดอัดไปสร้างกราฟการบดอัดเพื่อหาค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้ง ดังภาพที่ 2-22



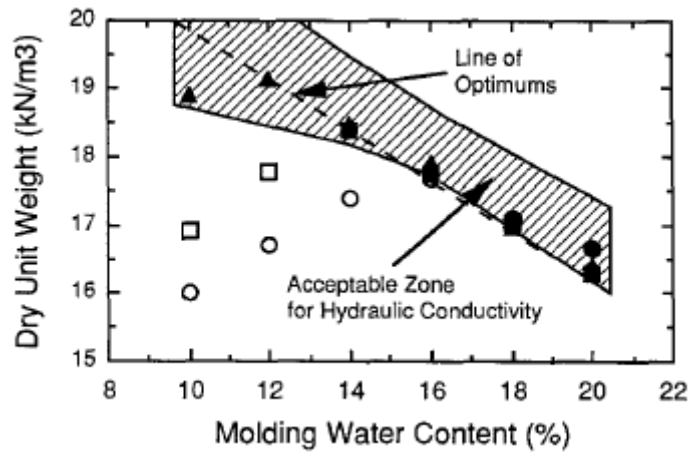
ภาพที่ 2-22 กราฟการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน (Daniel & Wu, 1993)

3.2 เตรียมตัวอย่างดินบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่าง ๆ ในกราฟการบดอัดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดในข้อ 3.1 ทุก ๆ พลังงานเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุด ดังภาพที่ 2-23

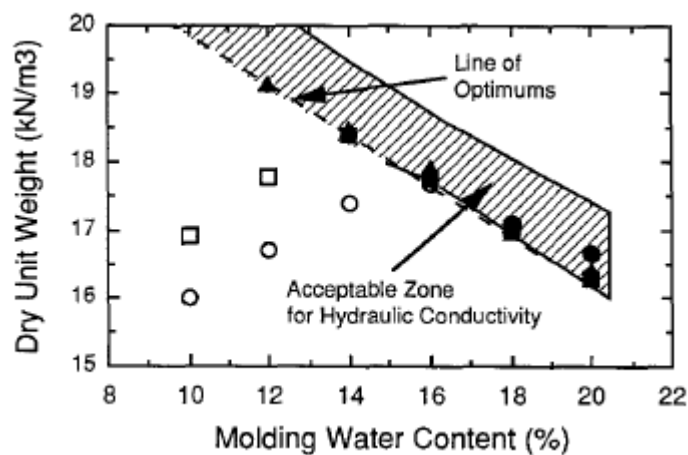


ภาพที่ 2-23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและปริมาณความชื้น (Daniel & Wu, 1993)

3.3 ทำการวาดกราฟการบดอัดใหม่ ดังภาพที่ 2-24 โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บสำหรับ ตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-9} m/s พื้นที่ที่แรเงาในภาพที่ 2-24 แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ อย่างไรก็ตาม Benson, Daniel, and Boutwell (1999) พบว่าเมื่อใช้ปริมาณความชื้นต่ำกว่าเส้นความชื้นเหมาะสม (Line of optimum) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินตัวอย่างจะมีค่ามากกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ด้วยเหตุนี้จึงแนะนำว่าการบดอัดที่ดีควรใช้ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าเส้นความชื้นเหมาะสม ดังนั้นจึงทำการปรับกราฟในภาพที่ 2-24 โดยตัดส่วนที่อยู่ต่ำกว่าเส้นความชื้นเหมาะสมออกจะได้ขอบเขตที่ยอมรับได้สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใหม่ ดังภาพที่ 2-25

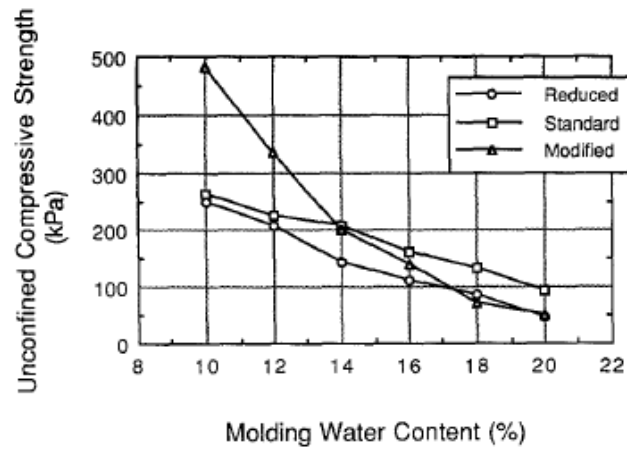


ภาพที่ 2-24 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Daniel & Wu, 1993)



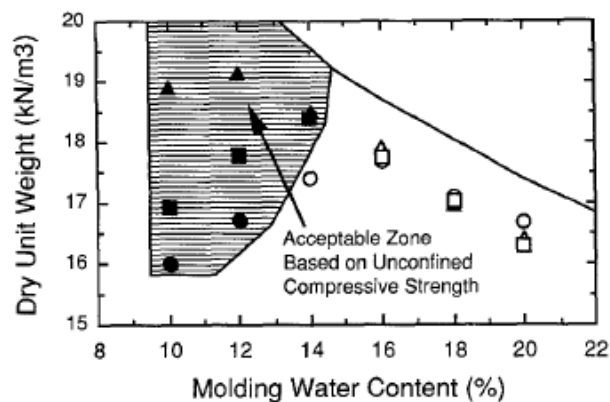
ภาพที่ 2-25 ปรับแก้ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Daniel & Wu, 1993)

3.4 ทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว โดยการเตรียมตัวอย่างดินบดอัด ที่ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่าง ๆ ในกราฟการบดอัดที่ได้จากการทดสอบ การบดอัดในข้อ 3.1 ทุก ๆ พลังงานและนำผลการทดสอบที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้น ดังภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวและปริมาณความชื้น (Daniel & Wu, 1993)

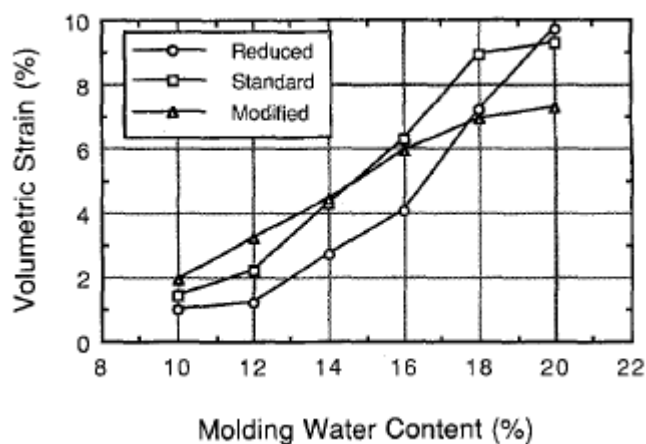
3.5 สร้างกราฟการบดอัดใหม่ ดังภาพที่ 2-27 โดยใช้สัญลักษณ์แบบทึบสำหรับตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวมากกว่าหรือเท่ากับ 200 kPa และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดแกนเดียวน้อยกว่า 200 kPa พื้นที่ที่แรเงาแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียว



ภาพที่ 2-27 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Daniel & Wu, 1993)

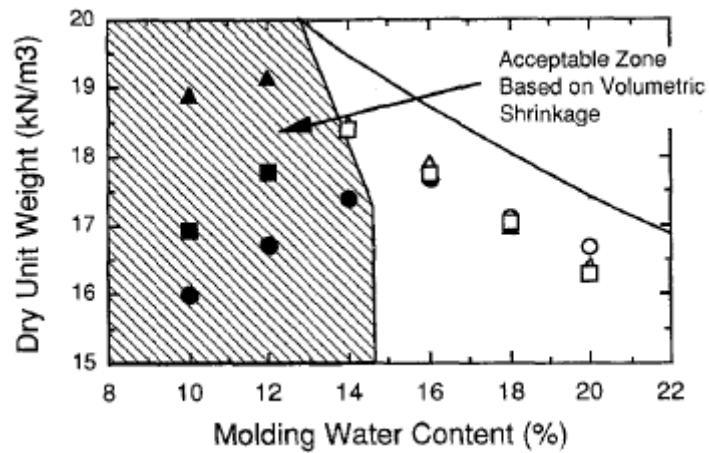
3.6 ทำการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร โดยการเตรียมตัวอย่างดินบดอัดที่ค่าปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งต่าง ๆ ในกราฟการบดอัดที่ได้จากการทดสอบ

การบดอัดในข้อ 3.1 ทุก ๆ พลังงาน ทำการทดสอบโดยวางตัวอย่างดินทิ้งไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเท สะดวกและควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ดินสูญเสียความชื้น จากนั้นทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างดินทุก ๆ 12 ชั่วโมงจนกระทั่งตัวอย่างดินมีปริมาณคงที่ (Daniel & Wu, 1993) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรและปริมาณความชื้น ดังภาพที่ 2-28



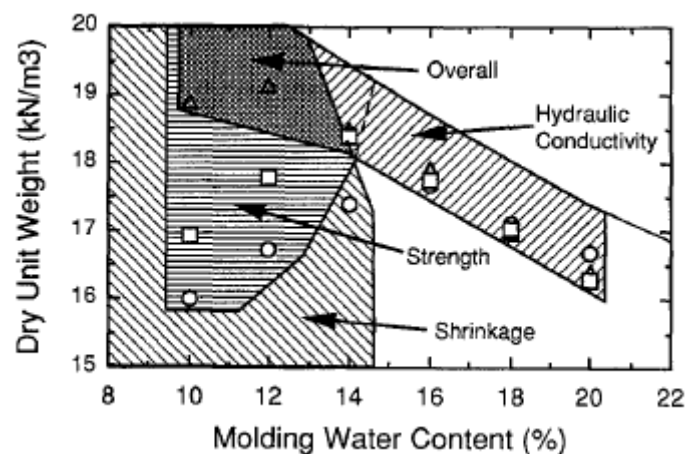
ภาพที่ 2-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรและปริมาณความชื้น (Daniel & Wu, 1993)

3.7 สร้างกราฟการบดอัดใหม่ โดยใช้สัญลักษณ์แบบทึบสำหรับตัวอย่างที่มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4% และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 4% พื้นที่ที่แรเงาในภาพที่ 2-29 แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร



ภาพที่ 2-29 ขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Daniel & Wu, 1993)

3.8 นำขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (ภาพที่ 2-25, 2-27 และ 2-29) มาซ้อนทับกัน บริเวณที่ยอมรับได้ทั้งสามรูปซ้อนทับกัน คือ ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) ดังภาพที่ 2-30



ภาพที่ 2-30 ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด (Overall acceptable zone) (Daniel & Wu, 1993)

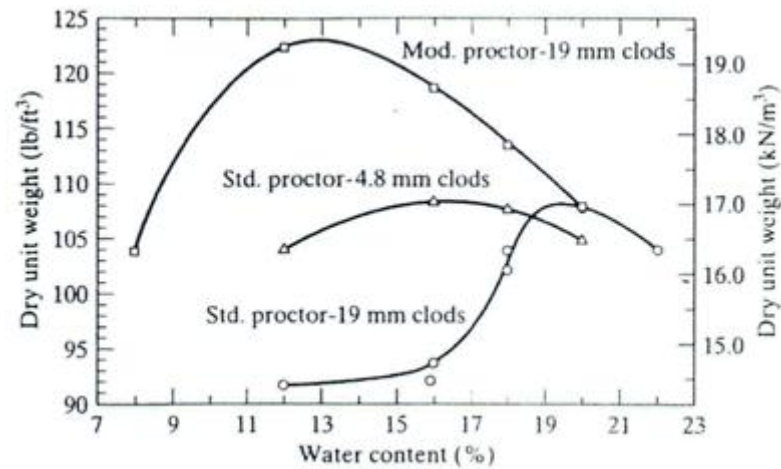
4. อิทธิพลของก้อนดินต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Influence of clods on hydraulic conductivity)

โดยทั่วไปมักพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินบดอัดที่ได้จากการทดสอบในสนามมักจะมีค่าแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินบดอัดที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หนึ่งในสาเหตุของความแตกต่าง คือ การเกิดข้อบกพร่องของปริมาตรช่องว่างในสนาม เช่น รอยแยก (Fissures) รอยแตกร้าว (Cracks) และช่องว่างขนาดใหญ่ (Macropores) ซึ่งอิทธิพลนี้มักไม่เกิดขึ้นกับตัวอย่างดินขนาดเล็กที่ใช้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความแตกต่างของโครงสร้างดินในสนามและในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นเพื่อสร้างเงื่อนไขการทดสอบให้คล้ายคลึงกับในสนาม ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างของดินบดอัดจะต้องถูกควบคุมด้วยความระมัดระวัง

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินบดอัดหลายชนิดของ Daniel (1984, 1987) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ทดสอบได้จากในสนามหนึ่งอันดับหรือมากกว่า ซึ่ง Daniel แนะนำว่าความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินบดอัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการและในสนามนี้อาจมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของขนาดก้อนดินในสนามและในห้องปฏิบัติการ

นอกจากนี้จากการศึกษาเพิ่มเติมของ Daniel and Benson (1990) พบว่าชนิดของตัวอย่างดินที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินเหนียวบดอัดที่มีความเป็นพลาสติกสูง (Highly plastic clay)

4.1 อิทธิพลของขนาดก้อนดินต่อกราฟการบดอัด (Influence of clod size on compaction curve) Daniel and Benson (1990) ได้ทำการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานในตัวอย่างดิน 2 ขนาด ได้แก่ ตัวอย่างดินก้อนเล็ก (ขนาด 4.8 มิลลิเมตร หรือร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4) และตัวอย่างดินก้อนใหญ่ (ขนาด 19 มิลลิเมตร หรือร่อนผ่านตะแกรง $\frac{3}{4}$ นิ้ว) เพื่อศึกษาผลของขนาดก้อนดินต่อกราฟการบดอัด ผลการทดสอบ ดังภาพที่ 2-31 พบว่าขนาดก้อนดินมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อกราฟการบดอัด คือ รูปร่างของกราฟการบดอัดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดิน 2 ขนาดมีความแตกต่างกัน แต่มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดใกล้เคียงกัน โดยกราฟการบดอัดสำหรับตัวอย่างดินก้อนเล็กจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ จุดสูงสุดของกราฟไวด์ต่อค่าปริมาณความชื้นต่ำ (เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนไป) และมีค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่ำกว่าตัวอย่างดินก้อนใหญ่ถึง 3%



ภาพที่ 2-31 ผลของขนาดก้อนดินต่อกราฟการบดอัด (Daniel & Benson, 1990)

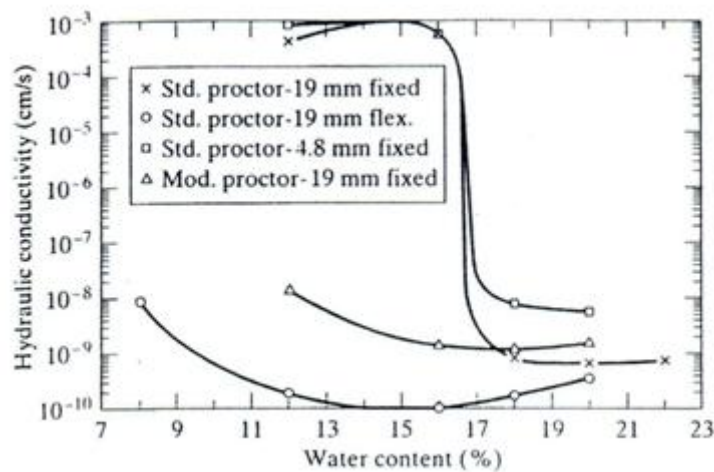
นอกจากนี้ยังพบว่า การบดอัดดินที่ด้านข้างของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ในดินก้อนเล็กจะสามารถบดอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าดินก้อนใหญ่ ส่งผลทำให้ดินก้อนเล็กมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งที่ด้านข้างของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสูงกว่าดินก้อนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามการบดอัดดินทั้ง 2 ขนาดที่ปริมาณความชื้นต่ำกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สามารถทำได้ยาก (Daniel & Benson, 1990)

4.2 อิทธิพลของขนาดก้อนดินที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Influence of clod size on hydraulic conductivity) Daniel (1984) ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดก้อนดินที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ A B และ C ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวบดอัด ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 2-2 พบว่า เมื่อขนาดก้อนดินลดลงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลง

ตารางที่ 2-2 อิทธิพลของขนาดก้อนดินที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียว
บดอัด (Daniel, 1984)

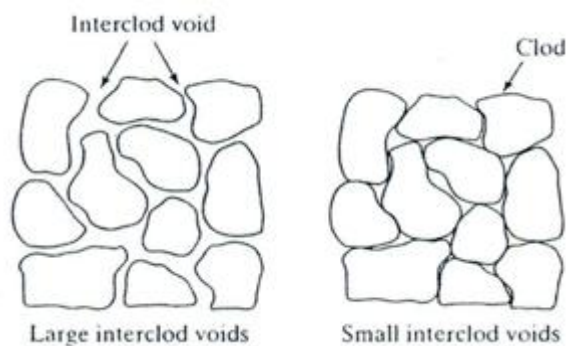
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนดินโดยเฉลี่ย		ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm/ s)
9.5 มิลลิเมตร	3/8 นิ้ว	3.0×10^{-7}
4.8 มิลลิเมตร	3/16 นิ้ว	2.0×10^{-8}
1.6 มิลลิเมตร	1/16 นิ้ว	9.0×10^{-9}

Daniel and Benson (1990) ได้ศึกษาขนาดก้อนดินที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินบดอัดที่ด้านข้างของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมโดยใช้พลังงานในการบดอัดดินแบบมาตรฐาน ผลการทดสอบดังภาพที่ 2-32 พบว่าที่ปริมาณความชื้นในการบดอัดระหว่าง 12-16% ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างดินที่มีขนาดก้อนเล็ก (4.8 มิลลิเมตร หรือ 3/16 นิ้ว) มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างดินที่มีขนาดก้อนใหญ่ (19 มิลลิเมตร หรือ 3/4 นิ้ว) ถึง 4-6 อันดับ แต่เมื่อปริมาณความชื้นในการบดอัดเพิ่มขึ้นเป็น 18-20% ขนาดของก้อนดินจะมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินตัวอย่าง ทั้งนี้เพราะการบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นสูงจะทำให้ก้อนดินอ่อนนุ่มและง่ายต่อการบดอัดให้เป็นเนื้อเดียวกันส่งผลทำให้ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินต่ำ



ภาพที่ 2-32 ผลของขนาดก้อนดินต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Daniel & Benson, 1990)

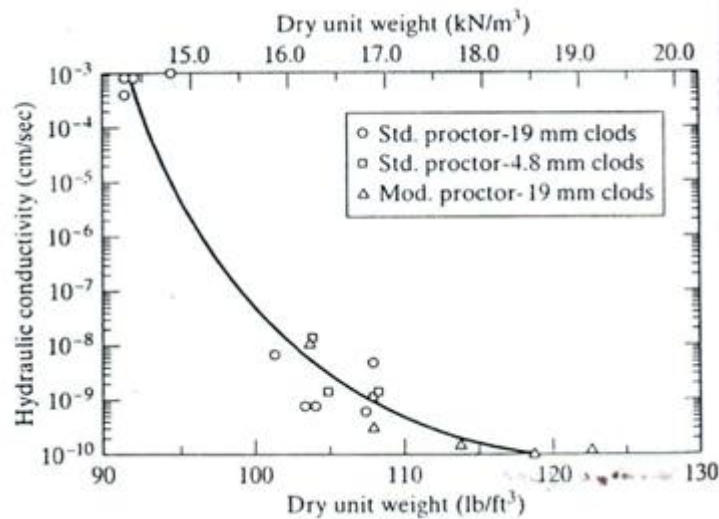
4.3 การจัดเรียงอนุภาคและโครงสร้างของก้อนดิน (Particle orientation versus clod structure) จากพื้นฐานแนวคิดของก้อนดินที่ถูกเสนอโดย Olsen (1962) กล่าวว่า การไหลของน้ำในดินเหนียวบดอัดโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างก้อนดินเหนียวมากกว่า การไหลระหว่างอนุภาคภายในก้อนดินเหนียว ดังภาพที่ 2-33 ก้อนดินที่เป็ยกและอ่อนนุ่มจะถูกบดอัดได้ง่ายกว่าก้อนดินที่แห้งและแข็ง (Daniel & Benson, 1990) ดังนั้นการบดอัดดินที่ด้านเป็ยกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะส่งผลทำให้ช่องว่างภายในก้อนดิน (Interclod voids) เล็กลงและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลดลงด้วย



ภาพที่ 2-33 การไหลของน้ำผ่านช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างก้อนดิน (Qian et al., 2002)

Benson and Daniel (1990) ได้อธิบายถึงลักษณะของก้อนดินและช่องว่างภายในก้อนดินที่ควบคุมค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำด้วยภาพถ่ายของตัวอย่างดินที่ถูกบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ พบว่า ตัวอย่างดินที่แห้งที่สุด (ปริมาณความชื้น 12%) ที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐานมีลักษณะมวลรวมหยาบมากกว่าดินเหนียว กล่าวคือ พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานไม่เพียงพอต่อการบดอัดดินที่แห้งและแข็งจึงไม่สามารถขจัดช่องว่างภายในก้อนดินขนาดใหญ่ได้ ส่งผลทำให้ตัวอย่างดินมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับดินดังกล่าวที่ปริมาณความชื้นเดียวกันแต่ใช้พลังงานในการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน พบว่า ก้อนดินเกิดการเสียรูปได้มากและสามารถลดช่องว่างขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลง (ดังภาพที่ 2-32) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพลังงานการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐานเพียงพอต่อการบดอัดและทำลายก้อนดินที่แห้งและแข็งได้ นอกจากนี้ตัวอย่างดินที่ถูกบดอัดทางด้านเป็ยกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ปริมาณความชื้น 20%) ด้วยพลังงานการบดอัดดินแบบมาตรฐานหรือแบบสูงกว่ามาตรฐาน จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำมาก

Daniel and Benson (1990) ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างทดสอบและค่าหน่วยน้ำหนักแห้งขณะบดอัด (ดังภาพที่ 2-34) พบว่าตัวอย่างทดสอบที่มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมากกว่า 16 kN/m^3 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินน้อยกว่า $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ซึ่งค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 16 kN/m^3 นี้มีค่าสอดคล้องกับ 93% ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสำหรับการบดอัดดินแบบมาตรฐานและ 82% ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสำหรับการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นหน่วยน้ำหนักแห้งของดินบดอัดจึงถือเป็นการวัดช่องว่างขนาดใหญ่ที่ถูกขจัดทางอ้อม



ภาพที่ 2-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินและหน่วยน้ำหนักแห้งขณะบดอัด (Daniel & Benson, 1990)

4.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลกระทบของการออกแบบ (Laboratory testing and design implications) การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างข้อมูลที่เป็นตัวแทนของผลการทดสอบในสนาม ดังนั้นขนาดของก้อนดิน ปริมาณความชื้น และรายละเอียดอื่น ๆ ของการบดอัดในห้องปฏิบัติการควรมีความสอดคล้องหรือใกล้เคียงกับเงื่อนไขในสนามมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนั้นการก่อสร้างในสนามควรมั่นใจได้ว่าก้อนดินถูกบดอัดอย่างสมบูรณ์และช่องว่างขนาดใหญ่ภายในก้อนดินถูกทำลาย Daniel and Benson (1990) แนะนำว่าก้อนดินสามารถถูกทำลายได้จาก 1 ใน 2 วิธี ดังนี้

4.4.1 ดินควรถูกทำให้เปียกชื้นและมีปริมาณความชื้นสูงเพียงพอที่จะทำให้ก้อนดินอ่อนนุ่มสามารถบดอัดได้ง่าย

4.4.2 สามารถบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นต่ำได้โดยเครื่องจักรหนักเพื่อ
บดก้อนดินและขจัดช่องว่างขนาดใหญ่ภายในก้อนดิน

การบดอัดที่ดีควรมีปริมาณความชื้นในดินสอดคล้องกับพลังงานการบดอัด
ในการก่อสร้างในสนาม กล่าวคือ ดินที่แห้งจะต้องใช้พลังงานในการบดอัดสูงมากเพื่อให้
ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินต่ำ ในทางตรงกันข้ามพลังงานในการบดอัดต่ำจะเหมาะ
สำหรับดินที่เปียก นอกจากนี้การเลือกใช้ปริมาณความชื้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ด้วย เช่น
การแตกแห้งหรือการบวมตัวในระยะยาว และการพิจารณากำลังรับแรงเฉือน เป็นต้น

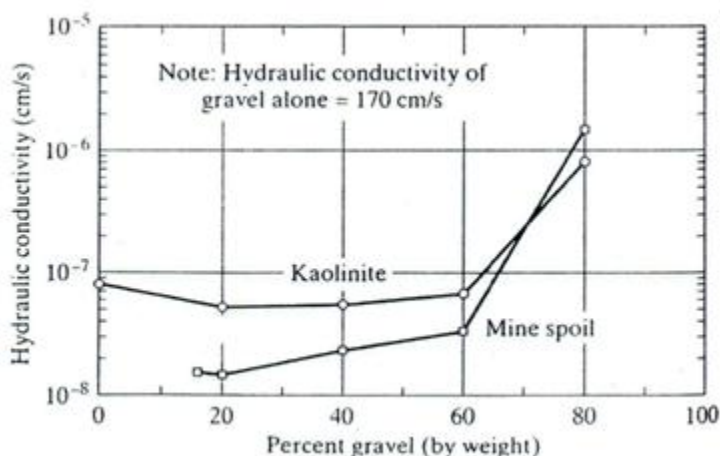
5. ผลกระทบของปริมาณกรวดต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Effect of gravel content on hydraulic conductivity)

Holtz and Lowitz (1957) ได้ทำการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินทราย ดินตะกอน
และดินเหนียวที่ผสมด้วยกรวดในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อมีปริมาณกรวดปะปนอยู่ 1 ใน 3
ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด โดยน้ำหนัก ก้อนกรวดสามารถบดอัดแทรกตัวเข้ากับดินมวลละเอียด
ได้ดี แต่เมื่อมีปริมาณกรวดปะปนอยู่ 2 ใน 3 ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด ดินมวลละเอียดจะไม่
สามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้เพียงพอ นอกจากนี้ยังพบว่า
ค่าอัตราส่วนช่องว่าง (Void ratio) ของมวลรวมละเอียดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณกรวดมากกว่า
40-50% แม้ว่าตัวอย่างดินจะถูกบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก็ตาม ดังนั้นอัตราส่วนช่องว่าง
ของมวลรวมละเอียดถือว่ามีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินตัวอย่าง

Shakoor and Cook (1990) ได้ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
ในดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty clay, CL) ที่ผสมกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13-19 มิลลิเมตร
ในปริมาณ 10-80% โดยน้ำหนัก โดยทำการบดอัดตัวอย่างทดสอบแบบมาตรฐานที่อย่างน้อย 95%
ของหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและที่ปริมาณความชื้นไม่มากกว่าหรือน้อยกว่า 2% ของปริมาณ
ความชื้นที่เหมาะสม จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินตัวอย่าง
มีค่าระหว่าง 1×10^{-7} - 2×10^{-7} cm/s เมื่อมีปริมาณกรวด 0-50% แต่เมื่อปริมาณกรวดเพิ่มขึ้น
มากกว่า 50% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจาก
มวลรวมละเอียดไม่สามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของกรวดได้อย่างสมบูรณ์

Shelly and Daniel (1993) ได้ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
ในดินเหนียวผสมกรวด โดยดินเหนียวที่ทำการทดสอบมี 2 ชนิด ได้แก่ Kaolinite และ Mine spoil
พบว่า ปริมาณกรวดในตัวอย่างดินที่น้อยกว่า 60% โดยน้ำหนัก จะไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์
การซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างดินมากนัก (คือ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า
 1×10^{-7} cm/s) แต่เมื่อมีปริมาณกรวดมากกว่า 60% โดยน้ำหนัก ดินเหนียวจะทำให้ไม่สามารถ

เติมเต็มช่องว่างระหว่างกรวดได้ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินตัวอย่างสูงมากจนสังเกตได้ (ดังภาพที่ 2-35) ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shakoor and Cook (1990) ดังนั้น Shelly and Daniel (1993) จึงแนะนำว่าควรมีปริมาณกรวดในวัสดุชั้นกันซึมไม่เกิน 50% ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Daniel (1990) ที่แนะนำว่าควรมีปริมาณกรวดในวัสดุกันซึมไม่เกิน 10-20%



ภาพที่ 2-35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและปริมาณกรวดในดิน Kaolinite และ Mine spoil (Shelly & Daniel, 1993)

ดินที่ถูกขุดลอก (Dredged soil)

ดินที่ถูกขุดลอกหรือตะกอนดิน คือ ชั้นของอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำซึ่งสะสมอยู่บนพื้นทะเล ประกอบด้วยอนุภาคของหิน ดิน โครงสร้างของสิ่งมีชีวิต ชั้นส่วนของภูเขาไฟใต้ทะเล สารเคมีที่ตกตะกอนจากน้ำทะเล และชั้นส่วนที่มาจากภายนอกโลก โดยเคลื่อนที่จากแผ่นดินมายังมหาสมุทร โดยอิทธิพลของลม น้ำแข็งขั้วโลก และแม่น้ำ

ดินที่ถูกขุดลอกเป็นตะกอนเนื้อละเอียดที่เกิดจากการสะสมของวัตถุต้นกำเนิดบริเวณชายฝั่งที่ทับถมกันเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ดินที่ถูกขุดลอกที่ใช้ในการทดลองนี้ได้มาจากบริเวณท่าเทียบเรือพาณิชย์แหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี (ภาพที่ 2-36)

1. การจำแนกกลุ่มของดินที่ถูกขุดลอก

1.1 จำแนกตามขนาดของอนุภาคของตะกอนดินและของเนื้อตะกอน แบ่งออกเป็น 7 ชนิด ดังตารางที่ 2-3 ซึ่งตะกอนดินทะเลส่วนใหญ่ประกอบด้วย ทราย (Sand) ตะกอนดินทราย (Silt) และตะกอนชนิดละเอียด (Clay)

ตารางที่ 2-3 การจำแนกตามขนาดของอนุภาคของตะกอนดินและของเนื้อตะกอน (ดินตะกอนทะเล, 2561)

ขนาดอนุภาค ตะกอนดิน (มม.)	ชื่อเรียก ตะกอนดิน	ความละเอียด ของตะกอนดิน	ตัวอย่างที่พบ	ขนาดพลังงาน
256	Boulder	Coarse-grained ↑	Coarse material found in stream beds near the source areas of river	High energy ↑
64-256	Cobble			
4-64	Pebble			
2-4	Granule	↓ Fine-grained	Beach sand Feel gritty in teeth Microscopic; feel sticky	Low energy ↓
1/16-2	Sand			
1/256-1/16	Silt			
1/4096-1/256	Clay			

1.2 จำแนกตามการกำเนิดของตะกอนดิน แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1.2.1 Lithogenous (Terrigenous) เป็นตะกอนดินที่พบมากที่สุด เกิดจากชิ้นส่วนแผ่นเปลือกโลก หินบนแผ่นดินเคลื่อนย้ายมาขั้มหาสมุทร โดยอิทธิพลของลม น้ำแข็งขั้วโลก และแม่น้ำ ตลอดจนกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับแรงโน้มถ่วง ส่วนใหญ่เป็นตะกอนดินชนิดควอต (SiO_2) นอกจากนี้ ตะกอนดินที่พบเป็นดินเหนียวและโคลนบริเวณปากแม่น้ำ พบมากบริเวณขอบทวีป (Continental margins) ที่ราบมหาสมุทร (Abyssal plains) และพื้นมหาสมุทร (Ocean floors)

1.2.2 Biogenous (Biogenic) เป็นตะกอนดินที่พบมากเป็นอันดับสอง เกิดจาก ส่วนประกอบของสิ่งมีชีวิต เช่น เปลือก ฟัน กระดูก เป็นต้น โดยมีองค์ประกอบเป็นซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) พบมากบริเวณพื้นมหาสมุทรลึก (Deep ocean floor)

1.2.3 Hydrogenous (Authigenic) เกิดจากแร่ธาตุที่ละลายน้ำที่ตกตะกอนมาจาก น้ำทะเล รวมถึงแร่ธาตุที่มาจากเปลือกโลก หิน และตะกอนใต้น้ำ โดยชนิดเด่นที่พบ คือ Manganese nodules ส่วนชนิดอื่นที่พบ เช่น Phosphorous nodules, Inorganic carbonate, Phosphate, Methalic sulphides, Evapolites (ตะกอนที่เกิดจากแร่ธาตุในทะเล) โดยพบอยู่ร่วมกับตะกอนดินชนิดอื่น

1.2.4 Cosmogenous (Cosmogenic) เป็นตะกอนดินที่พบน้อยที่สุด โดยรวมอยู่กับ ตะกอนดินชนิดอื่น เกิดจากชิ้นส่วนที่มาจากนอกโลก เช่น อุกกาบาต ดาวตก ซึ่งตกลงมายังพื้นทะเล พบในพื้นที่มหาสมุทรลึก (Deep ocean floor)

2. ข้อดีและข้อเสียของดินที่ถูกขุดลอก

ดินที่ถูกขุดลอกถือเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารของสัตว์ทะเลหน้าดิน ซึ่งเป็น ส่วนหนึ่งของห่วงโซ่อาหารในทะเล และก่อให้เกิดความหลากหลายทางชีวภาพ เป็นแหล่งพลังงาน ที่สำคัญในทะเล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งสะสมแร่ธาตุและเกี่ยวข้องกับ การหมุนเวียนแร่ธาตุในทะเลอีกด้วย

แต่อย่างไรก็ตามการทับถมของตะกอนที่เพิ่มขึ้นเป็นเวลานานจากอิทธิพลของ ระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเป็นสาเหตุให้บริเวณชายฝั่งตื้นเขิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเข้าถึงการเข้าเทียบเรือของเรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่จนมีความจำเป็นต้องขุดลอกดินบริเวณ ท่าเทียบเรือ



ภาพที่ 2-36 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน (สยาม ยิ้มศิริ, 2561)

เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized) จัดเป็นสารผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ จำพวกสารปอซโซลานสังเคราะห์หรือปอซโซลานดัดแปลงประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงก้นเตา จึงเรียกว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน จึงเรียกว่าเถ้าลอย มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00-2.60 องค์กรประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมขณะเผา และชนิดของถ่านหินที่ใช้เผา เถ้าลอยจะถูกดักจับฝุ่น (Electrostatic precipitation) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน เนื่องจากจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณ โรงไฟฟ้า

1. ชนิดของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ

1.1 เถ้าลอย ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica: SiO_2) และอลูมินา (Alumina: Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide: Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide: CaO) ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและ ควอร์ตซ์ ถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูง จึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง

1.2 เถ้าลอย ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

2. องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O , K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น (H_2O)

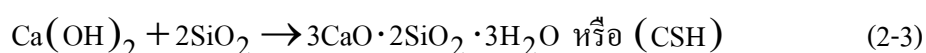
และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition: LOI) SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณถึงร้อยละ 80-90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

3. ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

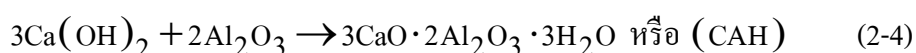
ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ดังสมการที่ 2-2 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ CH) หลังจากนั้นวัสดุปอซโซลานในที่นี่คือเถ้าลอย ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2-3 และ/หรือสมการที่ 2-4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะ

น้ำชะขยะที่เกิดขึ้นในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย คือ ของเหลวที่ปนเปื้อนด้วยสารละลายและสารแขวนลอยต่าง ๆ น้ำชะขยะเกิดขึ้นจาก 2 กระบวนการหลัก คือ 1) ถูกบีบออกจากขยะมูลฝอยเนื่องจากน้ำหนักของตัวขยะมูลฝอยเองหรือน้ำหนักที่บดอัดเรียกว่าน้ำชะขยะหลัก (Primary leachate) และ 2) เกิดจากการซึมผ่านของน้ำผ่านบ่อฝังกลบขยะซึ่งอาจมาจากปริมาณน้ำฝน (Precipitation) น้ำจากการชลประทาน (Irrigation) น้ำใต้ดิน (Groundwater) หรือการหมุนเวียนน้ำชะขยะมาใช้ใหม่ (Recirculated) เรียกว่า น้ำชะขยะรอง (Secondary leachate) การซึมผ่านของน้ำถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกิดน้ำชะขยะเนื่องจากในระหว่างกระบวนการซึมผ่าน น้ำที่ซึมผ่านจะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับขยะมูลฝอยและละลายสารเคมีบางชนิดออกมาผสมกับของเหลวที่ถูกบีบออกมาจากขยะมูลฝอย ซึ่งคุณภาพและปริมาณของน้ำชะขยะที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับการออกแบบบ่อฝังกลบขยะ

1. ลักษณะของน้ำชะขยะมูลฝอย (Municipal solid waste leachate characterization)

น้ำชะขยะที่ย่อยสลายในบ่อฝังกลบขยะมีทั้งสารเคมีอนินทรีย์ (Inorganic chemical) และสารเคมีอินทรีย์ (Organic chemical) เป็นองค์ประกอบ กระบวนการพื้นฐานของการย่อยสลายขยะมูลฝอยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำชะขยะจำแนกออกเป็น 3 ระยะ ดังต่อไปนี้ (McBean, Rovers, and Farquhar, 1995)

ระยะที่ 1 เกิดการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic decomposition) ขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อออกซิเจนภายในขยะมูลฝอยจะถูกใช้จนหมด (ยกเว้นบริเวณใกล้ผิวขยะมูลฝอย) โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นภายในระยะเวลาน้อยกว่า 1 เดือน ระยะย่อยสลายนี้อาจจะสิ้นสุดลง

ระยะที่ 2 เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจน (Anaerobic and facultative organisms, acetogenic bacteria) การย่อยสลายและหมักเซลล์ูโลส และการย่อยสลายของสารอินทรีย์อื่น ๆ เกิดเป็นสารละลายต่าง ๆ เช่น กรดไขมันที่ระเหยง่าย (Volatile fatty acids) ซึ่งก่อให้เกิดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีหรือ บีโอดี (Biochemical oxygen demand, BOD) และแอมโมเนีย (Ammonia) สูง

ระยะที่ 3 แบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria) ค่อย ๆ เจริญเติบโตและเริ่มเผาผลาญสารอินทรีย์ เกิดเป็นส่วนผสมของคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) และมีเทน (Methane) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของก๊าซในบ่อฝังกลบขยะ ระยะที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าระยะที่ 2

การย่อยสลายขยะมูลฝอยในระยะที่ 2 ใช้เวลายาวนานเป็นปีหรือ 10 ปี น้ำชะขยะที่เกิดขึ้นในระหว่างระยะที่ 2 นี้จะมีลักษณะที่โดดเด่นด้วยค่าบีโอดีสูง (โดยทั่วไปจะมีค่าบีโอดี

มากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และมีค่าอัตราส่วนบีโอดีต่อค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี หรือค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) สูงด้วย (โดยทั่วไปจะมากกว่า 0.7) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของวัสดุอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้สูงที่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (McBean et al., 1995) นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำชะขยะในระยะที่ 2 โดยทั่วไปมักมีระดับค่า pH ที่เป็นกรด (โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 5-6) มีความรุนแรง มีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ และมีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงประมาณ 500-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความเป็นกรดและความรุนแรงของสารเคมีในน้ำชะขยะนี้จะช่วยสลายของค์ประกอบอื่นๆ ของขยะมูลฝอยได้ ซึ่งโดยทั่วไปมักพบว่าน้ำชะขยะจะมีระดับของเหล็ก (Iron) แมงกานีส (Manganese) สังกะสี (Zinc) แคลเซียม (Calcium) และแมกนีเซียม (Magnesium) สูง

McBean et al. (1995) กล่าวว่า การเปลี่ยนถ่ายกระบวนการย่อยสลายจากระยะที่ 2 เป็นระยะที่ 3 อาจใช้เวลาหลายปีหรือบางครั้งอาจจะไม่เสร็จสมบูรณ์เลย อย่างไรก็ตามอาจมีขยะมูลฝอยบางชนิดใช้เวลาในการย่อยสลายเข้าสู่ระยะที่ 3 เพียงไม่กี่เดือนก็ได้ ในระยะที่ 3 แบคทีเรียจะค่อย ๆ เจริญเติบโตและย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายในระยะที่ 2 น้ำชะขยะที่เกิดขึ้นระหว่างระยะที่ 3 มักจะเรียกว่า “Stabilized” แต่ที่ระยะนี้บ่อฝังกลบจะเป็นสภาพที่ระดับใช้งานมากที่สุด ความสมดุลทางพลวัต (Dynamic equilibrium) จะเกิดขึ้นในตอนท้ายระหว่างการเกิดแบคทีเรียทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนในระยะที่ 2 และแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทนในระยะที่ 3 (Acetogenic and methanogenic bacteria) และขยะมูลฝอยยังคงย่อยสลายต่อไป น้ำชะขยะที่เกิดขึ้นระหว่างระยะที่ 3 จะมีลักษณะที่โดดเด่นด้วยค่าบีโอดีต่ำและอัตราส่วนของบีโอดีต่อซีโอดีต่ำ อย่างไรก็ตาม แอมโมเนียในโตรเจน (Ammonia nitrogen) ที่ถูกปล่อยออกมาจากระยะแรกของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนยังคงมีอยู่ในน้ำชะขยะในระดับสูง สารอนินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เช่น เหล็ก (Iron) โซเดียม (Sodium) โพแทสเซียม (Potassium) ซัลเฟต (Sulfate) และคลอไรด์ (Chloride) อาจยังคงละลายและชะจากบ่อฝังกลบขยะอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหลายปี

เนื่องจากลำดับขั้นตอนธรรมชาติของการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย น้ำชะขยะที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณของบ่อฝังกลบจะมีลักษณะที่แตกต่างกันและเกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยบางบริเวณอาจเกิดการย่อยสลายระยะที่ 1 ในขณะที่บางบริเวณอาจเกิดที่ระยะอื่น น้ำชะขยะที่ด้านล่างของขยะมูลฝอยมักเป็นผลมาจากกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นที่ด้านบนของขยะ (McBean et al., 1995)

ปัจจัยทั่วไปที่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบและคุณภาพของน้ำชะขยะมีดังนี้ (Ehrig, 1989; Lu, Morrison, and Stearns, 1984; McBean et al., 1995; McGinly & Kmet, 1984; Qasim & Burchinal, 1970; Straub & Lynch, 1982)

1. องค์ประกอบของขยะมูลฝอย
2. ความลึกของขยะมูลฝอย
3. อายุของบ่อฝังกลบขยะ
4. เงื่อนไขการปิดทับชั้นสุดท้าย
5. ระบบการทำงานของบ่อฝังกลบขยะ เช่น การเพิ่มน้ำ การหมุนเวียนของน้ำชะขยะ การบดอัดขยะมูลฝอย ความหนาของชั้นที่เทกองและอัตราการวาง
6. ตัวแปรทางสภาพภูมิอากาศ เช่น ปริมาณน้ำฝนประจำปีและอุณหภูมิโดยรอบ
7. เงื่อนไขทางธรณีวิทยาในบริเวณที่อยู่ใกล้เคียงบ่อฝังกลบขยะ
8. เงื่อนไขภายในบ่อฝังกลบ เช่น ปฏิกริยาทางเคมีและทางชีวภาพ ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ ค่า pH และระดับความเสถียรภาพ

โดยทั่วไปบ่อฝังกลบขยะใหม่จะมีน้ำชะขยะที่เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้สูง ในขณะที่บ่อฝังกลบเก่ามักมีปริมาณการย่อยสลายและการเกิดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน ความแตกต่างของคุณสมบัติและคุณภาพของน้ำชะขยะที่เกิดขึ้นในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยและบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยอันตรายได้ถูกศึกษาโดย USEPA (1988) พบว่าแม้ว่าสารเคมีที่ถูกตรวจพบจากบ่อฝังกลบขยะทั้ง 2 ชนิดจะเป็นชนิดเดียวกันแต่ความเข้มข้นของสารเคมีหลายชนิดที่ตรวจพบในน้ำชะขยะของบ่อฝังกลบของเสียอันตรายมักจะมีค่าเข้มข้นสูงมากกว่า โดยเฉพาะสารเคมีชนิด 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-trichloroethane) ไตรคลอโรอีเทน (Trichloethene) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl chloride) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เพสตีไซด์ (Pesticides) และโพลีคลอริเนตไบฟีนิลหรือพีซีบี (Polychlorinated biphenyls, PCBs) ส่วนประกอบทางเคมีทั่วไปในน้ำชะขยะจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (USEPA, 1988) ดังตารางที่ 2-4 และตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ตัวบ่งชี้และสารอนินทรีย์ในน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะ
มูลฝอย (USEPA, 1988)

พารามิเตอร์ตัวบ่งชี้	ความเข้มข้นของน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่ถูกรวบรวมโดยทั่วไป (ppm)	
	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามากที่สุด
Alkalinity	470	57,850
Ammonia	0.39	1,200
Biological oxygen demand	7	29,200
Calcium	95.9	2,100
Chemical oxygen demand	42	50,450
Chloride	31	5,475
Fluoride	0.11	302
Iron	0.22	2,280
Phosphorus	0.29	117.18
Potassium	17.8	1,175
Sulfate	8	1,400
Sodium	12	2,574
Total dissolved solids	390	31,800
Total suspended solids	23	17,800
Total organic carbon	20	14,500
สารอนินทรีย์ (ppm)		
Aluminum	0.01	5.8
Antimony	0.0015	47
Arsenic	0.0002	0.982
Barium	0.08	5
Beryllium	0.001	0.01

ตารางที่ 2-4 (ต่อ)

พารามิเตอร์ตัวบ่งชี้	ความเข้มข้นของน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่ถูกตรวจพบโดยทั่วไป (ppm)	
	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามากที่สุด
Cadmium	0.0007	0.15
Chromium (total)	0.0005	1.9
Cobalt	0.04	0.13
Copper	0.003	2.8
Cyanide	0.004	0.3
Lead	0.005	1.6
Manganese	0.03	79
Magnesium	74	927
Mercury	0.0001	0.0098
Nickel	0.02	2.227
Vanadium	0.009	0.029
Zinc	0.03	350

ตารางที่ 2-5 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบ (USEPA, 1988)

พารามิเตอร์ตัวบ่งชี้	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่ถูกตรวจพบ (ppm)	
	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามากที่สุด
Acetone	8	11,000
Acrolein	270	270
Aldrin	NA	NA
α -Chlordane	NA	NA
Aroclor-1242	NA	NA
Aroclor-1254	NA	NA

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

พารามิเตอร์ตัวบ่งชี้	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบ ขยะมูลฝอยที่ถูกตรวจพบ (ppm)	
	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามากที่สุด
Benzene	4	1,080
Bromomethane	170	170
Butanol	10,000	10,000
1-Butanol	320	360
2-Butanone (methyl ethyl ketone)	110	27,000
Butyl benzyl phenol	21	150
Carbazole	NA	NA
Carbon tetrachloride	6	397.5
4-Chloro-3-methylphenol	NA	NA
Chlorobenzene	1	685
Chloroethane	11.1	860
Bis(2-Chloroethoxy)methane	18	25
2-Chloroethyl vinyl ether	2	1,100
Chloroform	7.27	1,300
Chloromethane	170	400
Bis(chloromethyl)ether	250	250
2-Chloronaphthalene	46	46
<i>p</i> -Cresol	45.2	5,100
2,4-D	7.4	220
4,4-DDE	NA	NA
4,4-DDT	0.042	0.22
Dibromomethane	5	5
Di-N-butyl phthalate	12	150
1,2-Dichlorobenzene	3	21.9

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

พารามิเตอร์ตัวบ่งชี้	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบ ขยะมูลฝอยที่ถูกตรวจพบ (ppm)	
	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามากที่สุด
1,4-Dichlorobenzene	1	52.1
3,3-Dichlorobenzidine	NA	NA
Dichlorodifluoromethane	10.3	450
1,1-Dichloroethane	4	44,000
1,2-Dichloroethane	1	11,000
1,2-Dichloroethylene (Total)	NA	NA
<i>cis</i> -1,2- Dichloroethylene	190	470
<i>trans</i> -1,2- Dichloroethylene	2	4,800
1,2-Dichloropropane	0.03	500
1,3-Dichloropropane	18	30
Diethyl phthalate	3	330
2,4-Dimethyl phenol	10	28
Dimethyl phthalate	30	55
Endrin	0.04	50
Endrin ketone	NA	NA
Ethanol	23,000	23,000

2. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำชะขยะ (Factors affecting leachate quantity)

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของน้ำชะขยะที่เกิดขึ้นในบ่อฝังกลบขยะมีด้วยกันหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน (Precipitation) ประเภทของบ่อฝังกลบ (Type of site) การแทรกซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater infiltration) การแทรกซึมของน้ำผิวดิน (Surface water infiltration) องค์ประกอบของขยะมูลฝอยและปริมาณความชื้น (Waste composition and moisture content) การจัดการขยะมูลฝอยก่อนฝัง เช่น การมัดหรือการทำให้เป็นก้อนหรือการทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ (Preprocessing of waste) ความหนาแน่นของขยะมูลฝอย (Density of the waste) ความหนาของชั้นขยะมูลฝอย (Thickness of the waste) สภาพภูมิอากาศ (Climate) การระเหย (Evaporation)

การสูญเสียน้ำจากดินโดยการระเหยและคายน้ำ (Evapotranspiration) การผลิตก๊าซ (Gas production) การออกแบบชั้นปิดทับสุดท้าย (Final cover design) และรูปแบบการไหลของพื้นผิว (Surface flow pattern) (Koerner & Daniel, 1997; Reinhart & Townsend, 1998) เป็นต้น การเกิดน้ำชะขยะอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นเมื่อความสามารถในการดูดซึมของขยะหมดไป ปัจจัยต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้

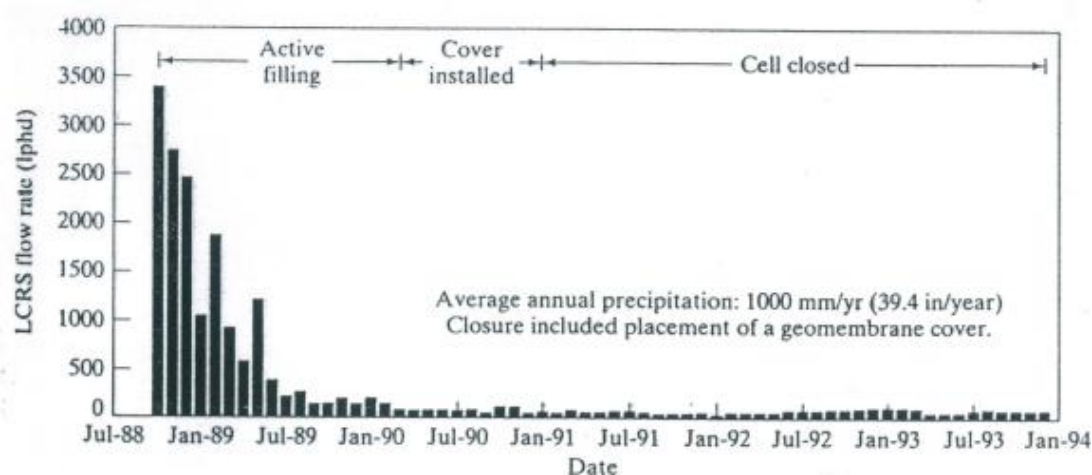
2.1 ปริมาณน้ำฝน เป็นปัจจัยที่กระตุ้นการเกิดน้ำชะขยะมากที่สุดและมีอิทธิพลต่อปริมาณของน้ำชะขยะอย่างมาก เช่นเดียวกับการแทรกซึมของน้ำซึ่งเป็นสถานการณ์ที่วิกฤติที่สุดที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ฝนตกเบาๆ เป็นเวลานานหรือฝนตกหนักเป็นเวลานาน ๆ ส่งผลทำให้วัสดุปิดทับอึดตัวด้วยน้ำอย่างรวดเร็ว

2.2 เงื่อนไขของขยะมูลฝอย ประกอบด้วยส่วนประกอบของขยะมูลฝอย ปริมาณความชื้นของขยะมูลฝอย การจัดการขยะมูลฝอยก่อนฝัง เช่น การมัดหรือทำเป็นก้อนหรือหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ความหนาของขยะมูลฝอยและความหนาแน่นของชั้นขยะมูลฝอย ปริมาณน้ำชะขยะจะเพิ่มขึ้นเมื่อขยะมูลฝอยถูกบีบจากการถมขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นและแน่นขึ้น ขยะมูลฝอยที่ไม่อึดตัวด้วยน้ำจะดูดซับน้ำจนกระทั่งถึงความจุของบ่อฝังกลบ ดังนั้นการกักเก็บขยะมูลฝอยที่ความจุต่ำกว่าความจุของบ่อฝังกลบจะลดการเกิดน้ำชะขยะ ภายหลังจากการบำบัดตะกอนที่เหลือจากบ่อบำบัดที่ถูกหลักสุขาภิบาล ระบบท่อระบายน้ำรวม วัสดุกรองอุตสาหกรรม และวัสดุกึ่งของแข็งอื่น ๆ จะถูกกำจัดด้วยวิธีใดขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและปริมาณของตะกอนที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณของน้ำชะขยะ

2.3 ผลกระทบของชั้นปิดทับสุดท้าย ปริมาณของน้ำชะขยะจะลดลงอย่างมาก ภายหลังจากบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยถูกปิดและปิดทับด้วยชั้นปิดทับสุดท้าย เนื่องจากการเจริญเติบโตของพืชในดินด้านบนของชั้นปิดทับสุดท้ายจะช่วยลดการแทรกซึมของน้ำจากการระเหยหรือการคายน้ำ และชั้นกันซึมที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำจะช่วยลดการซึมผ่านของน้ำได้ นอกจากนี้ปริมาณการแทรกซึมของน้ำไปยังบ่อฝังกลบขยะจะลดลงหากถูกปิดทับด้วยชั้นปิดทับผสม เช่น การใช้จีโอเมมเบรนวางเหนือชั้นดินเหนียวบดอัด (GM/CCL) หรือการใช้จีโอเมมเบรนวางเหนือชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์ (GM/GCL) ชั้นปิดทับที่ถูกออกแบบอย่างถูกต้องเหมาะสมจะชะลอหรือหยุดปริมาณของน้ำชะขยะภายหลังจากบ่อฝังกลบขยะถูกปิดได้ในที่สุด (Bagchi, 1994)

การเกิดน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะในช่วงแรกจะมีอัตราค่อนข้างต่ำและหลังจากนั้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีขยะถูกถมมากขึ้น การเกิดน้ำชะขยะจะถึงจุดสูงสุดก่อนปิดบ่อฝังกลบขยะและหลังจากนั้นจะลดลงอย่างมากเนื่องจากข้อกำหนดของระดับพื้นผิวหรือชั้นปิดทับสุดท้าย

จากงานวิจัยของ Bonaparte (1995) แสดงแนวโน้มของอัตราการเกิดน้ำชะขยะของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่มีชั้นกันซึม 2 ชั้นและมีแผ่นจีโอเมมเบรนปูในชั้นปิดทับสุดท้าย ดังภาพที่ 2-37 พบว่าอัตราการเกิดน้ำชะขยะเฉลี่ยรายเดือนในระหว่างการถมขยะสูงถึง 360 แกลลอนต่อเอเคอร์ต่อวัน อัตราการเกิดน้ำชะขยะใน 3 ปีแรกภายหลังจากปิดบ่อฝังกลบขยะโดยเฉลี่ยเหลือเพียง 7.4 แกลลอนต่อเอเคอร์ต่อวัน

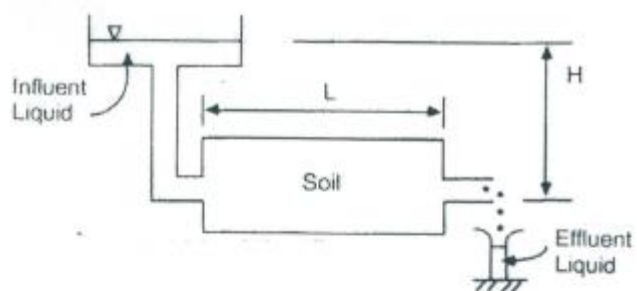


ภาพที่ 2-37 อัตราการเกิดน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย (Bonaparte, 1995)

กลไกการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

สารเคมีในน้ำชะขยะมีทั้งที่เป็นสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์สามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้โดยกลไกการพา (Advection) และการแพร่ (Diffusion)

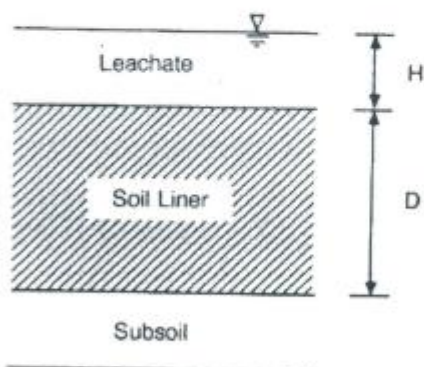
การพา เป็นการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือน้ำชะขยะผ่านตัวกลางความพรุนภายใต้ความชันทางชลศาสตร์ น้ำชะขยะประกอบด้วยของเหลวหรือน้ำที่เป็นตัวพาและตัวถูกละลายทั้งที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์และอินทรีย์ โดยของเหลวหรือน้ำชะขยะจะถูกพาจากบริเวณที่มีระดับน้ำสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีระดับน้ำต่ำกว่า ซึ่งกฎของดาร์ซี (Darcy's law) (ภาพที่ 2-38) จะถูกใช้เพื่อประมาณค่าอัตราการไหลผ่านกลไกการพา โดยการคำนวณค่าความเร็วของการไหลซึมของน้ำในดิน (Seepage velocity) ของการไหลของน้ำ เมื่อความเร็วของการไหลซึมของน้ำในดินสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำคูณค่าความชันทางชลศาสตร์หารด้วยค่าความพรุนประสิทธิผลของดิน ดังภาพที่ 2-39



$$q = k \frac{H}{L} A$$

q = rate of flow
k = hydraulic conductivity

H = head loss
L = length of flow
A = total area



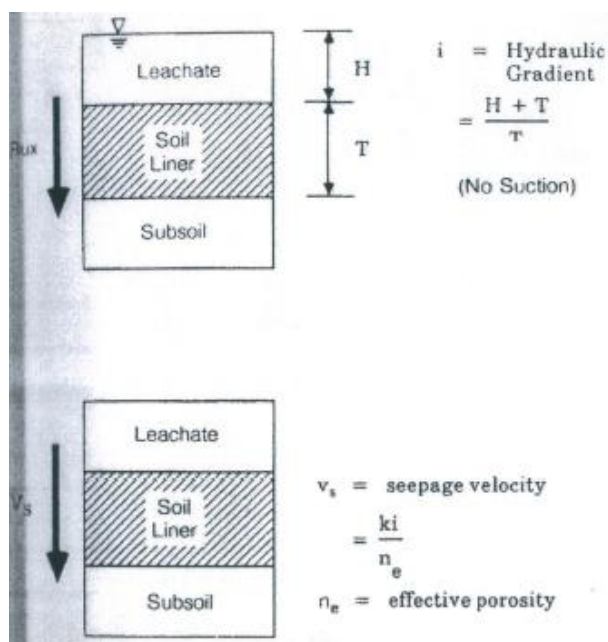
$$q = kiA$$

i = Hydraulic Gradient

$$= \frac{H + D}{D}$$

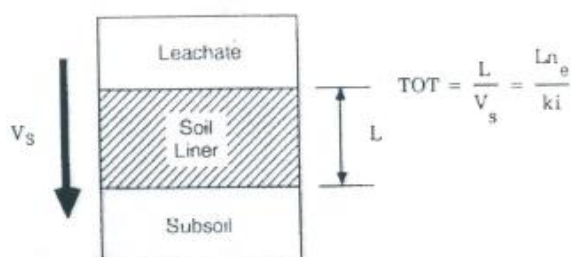
(Assumes No Suction Below Soil Liner)

ภาพที่ 2-38 การประยุกต์ใช้กฎของดาร์ซี (USEPA, 1989)



ภาพที่ 2-39 การเคลื่อนที่แบบการพา (USEPA, 1989)

ถ้าหากของเหลวทะลุผ่านช่องว่างของดินทั้งหมดอย่างสม่ำเสมอจะส่งผลให้ค่าความพรุนประสิทธิผลมีค่าเท่ากับค่าความพรุนทั้งหมด แต่ถ้าหากของเหลวทะลุผ่านช่องว่างของดินน้อยจะทำให้ค่าความพรุนประสิทธิผลน้อยกว่าค่าความพรุนทั้งหมด ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าความพรุนประสิทธิผลถือเป็นหนึ่งในปัญหาของการประเมินค่าความเร็วของการไหลซึมผ่านของน้ำในดิน อย่างไรก็ตามหากทราบค่าความพรุนประสิทธิผลและพารามิเตอร์อื่น ๆ จะสามารถคำนวณหาค่าเวลาทะลุผ่าน (Time of travel, TOT) ของโมเลกุลของเสียที่เคลื่อนที่ด้วยการพาผ่านชั้นดินกันซึมได้ ซึ่งค่าเวลาทะลุผ่านจะมีค่าเท่ากับความยาวของเส้นทางการไหลคูณค่าความพรุนประสิทธิผลหารด้วยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำคูณค่าความชันทางชลศาสตร์ (ภาพที่ 2-40)



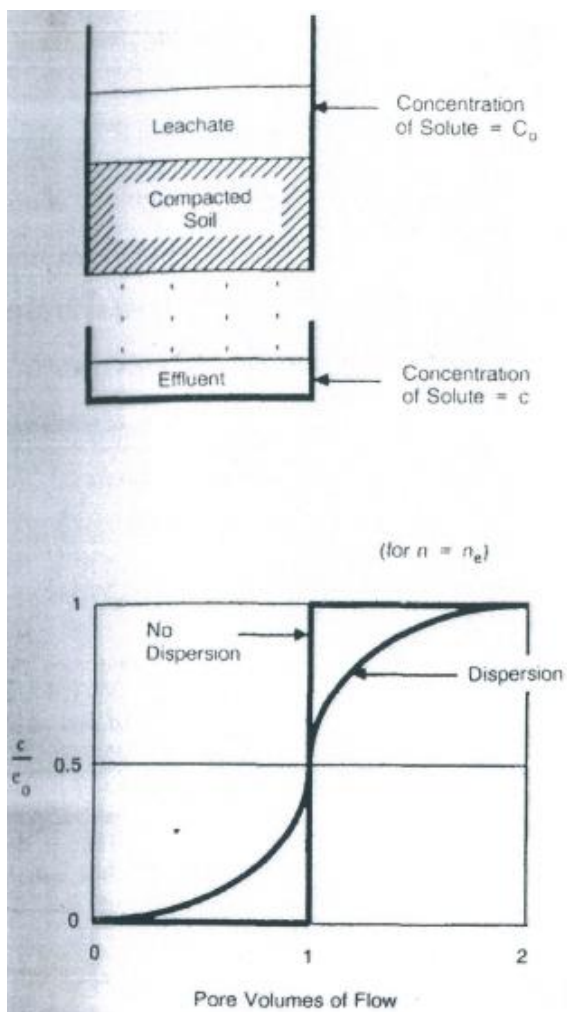
ภาพที่ 2-40 เวลาทะลุผ่าน (USEPA, 1989)

การคำนวณหาค่าความพรุนประสิทธิผลสามารถหาได้จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในห้องปฏิบัติการ โดยทำการบดอัดดินลงในกระบอกทดสอบและใส่น้ำชะขยะหรือของเสียอื่นลงบริเวณด้านบนของตัวอย่างดินบดอัดแล้วปล่อยให้ซึมผ่าน โดยต้องรักษาความเข้มข้นของของเหลวที่ไหลเข้าให้คงที่ด้วย เมื่อเวลาผ่านไปให้ทำการวัดความเข้มข้นของเหลวที่ไหลออก จากนั้นสร้างกราฟการทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของของเหลวที่ไหลออกหารด้วยความเข้มข้นของของเหลวที่ไหลเข้า (C/C_0) และปริมาตรช่องว่างของการไหล ดังภาพที่ 2-41 หนึ่งปริมาตรช่องว่างของการไหลจะเท่ากับปริมาตรของช่องว่างของดิน ซึ่งค่าความพรุนประสิทธิผลของดินสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟการทะลุผ่าน

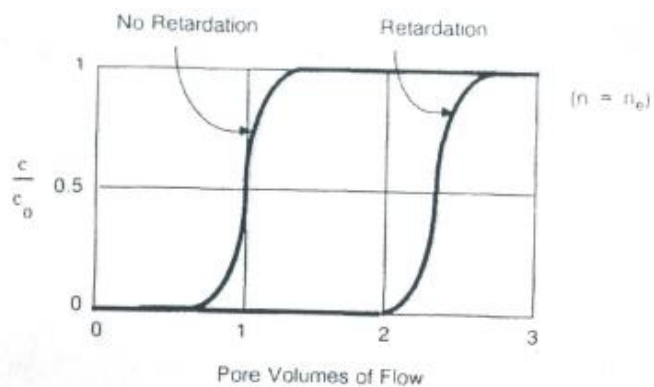
เมื่อน้ำชะขยะซึมผ่านไปยังดิน ของเหลวที่ไหลออกมาในช่วงแรกจะไม่ปรากฏสารเคมีของของเสียแต่จะมีเพียงดินและน้ำเท่านั้น หลังจากนั้นน้ำชะขยะจะซึมผ่านไปตามกระแสไหลผ่านชั้นดินและน้ำชะขยะก็จะทะลุผ่านออกมาผสมกับน้ำในดินผ่านกระบวนการที่เรียกว่ากลไกการแพร่กระจาย

หลายองค์ประกอบของของเสียในน้ำชะขยะจะถูกเจือจางหรือหน่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยาดูดซับด้วยดิน เช่น การเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินอย่างช้า ๆ ขณะที่คลอไรด์และโบรไมด์จะเคลื่อนที่ผ่านดินได้อย่างรวดเร็ว การทะลุผ่านที่เกิดขึ้นที่ C/C_0 ของ 0.5-1 ปริมาตรช่องว่างของการไหลหรือต่ำกว่า (ภาพที่ 2-42) จะไม่มีการเจือจางหรือหน่วงการเกิดปฏิกิริยา ค่าความพรุนประสิทธิผลจะเท่ากับค่าความพรุนทั้งหมดเมื่อการทะลุผ่านของสารเคมีช้ามากและถูกดูดซับหรือเจือจางด้วยดิน

วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการหาค่าความพรุนประสิทธิผล คือ การทดสอบโดยใช้คลอไรด์หรือโบรไมด์ซึ่งจะไม่มีปฏิกิริยาดูดซับด้วยดิน โดยถ้าการทะลุผ่านที่เกิดขึ้นในหนึ่งปริมาตรช่องว่างของการไหลจะได้ค่าความพรุนประสิทธิผลเท่ากับค่าความพรุนทั้งหมด แต่ถ้าการทะลุผ่านที่เกิดขึ้นเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรช่องว่างของการไหลจะได้ค่าความพรุนประสิทธิผลเป็นครึ่งของค่าความพรุนทั้งหมด



ภาพที่ 2-41 ความพรุนประสิทธิผล (USEPA, 1989)

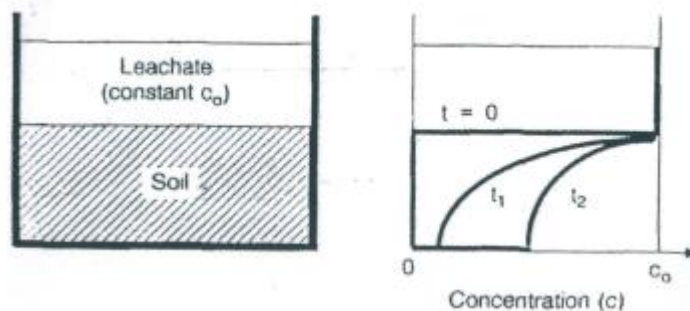


ภาพที่ 2-42 ความพรุนประสิทธิผลของดินที่มีการถ่วงการเกิดปฏิกิริยาและไม่มีถ่วงการเกิดปฏิกิริยาของไอออนของเสีย (USEPA, 1989)

การแพร่ เป็นการเคลื่อนที่ของสารละลายภายใต้ระดับความเข้มข้นของสารเคมี จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำ สารละลายสามารถแพร่ไปในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่แบบการพาก็ได้

ในกรณีของสิ่งกีดขวางที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำมากซึ่งเป็นคุณสมบัติของชั้นกั้นซึมของบ่อฝังกลบขยะ กลไกการแพร่จะมีความสำคัญอย่างมากต่อเส้นทางการรั่วไหล มีหลักฐานจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่สำคัญ (Gillham, Robin, & Dytynshyn, 1984; Crooks & Quigley, 1984; Shackelford, 1988; Johnson, Cherry, and Pankow, 1989; Gray, 1995) แสดงให้เห็นว่า ฟลักซ์ (Flux) ของสารละลายผ่านดินมวลละเอียดจะถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของสิ่งกีดขวางลดลง

การศึกษากลไกการแพร่ของโมเลกุลสารเคมีในชั้นดินสามารถทำได้โดยการบดอัดดินที่ด้านล่างของบีกเกอร์ที่ไม่สามารถซึมผ่านได้และข้างของของเสียหรือน้ำชะขยะไว้ด้านบนของดิน ดังกล่าว จากนั้นเริ่มทำการทดสอบ โดยความเข้มข้นของของเสียที่ไหลเข้า (C) จะเท่ากับ ความเข้มข้นของของเสียที่ไหลออก (C_0) ถึงแม้ว่าจะไม่มีการไหลของน้ำไปยังดินด้วยการพาแต่สารเคมีก็สามารถเคลื่อนที่ไปยังชั้นดินได้โดยกระบวนการของการแพร่ของโมเลกุล และในที่สุดความเข้มข้นของของเสียก็จะซึมผ่านเป็นหนึ่งเดียวกันกับดิน (ภาพที่ 2-43)



ภาพที่ 2-43 การแพร่ของโมเลกุล (USEPA, 1989)

การคำนวณแสดงให้เห็นว่าเมื่อการแพร่ของโมเลกุลเริ่มเคลื่อนที่ผ่านชั้นดินกั้นซึมด้วยโมเลกุลของของเสียที่ 3 พืชจะไม่สามารถซึมผ่านชั้นกั้นซึมได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป 10-30 ปี สารปนเปื้อนก็จะเริ่มทะลุผ่านชั้นดินกั้นซึมเนื่องจากการแพร่ของโมเลกุล

อัตราการแพร่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง สำหรับไอออนที่ไม่ถูกเจือจางหรือไม่ถูกหน่วง การเกิดปฏิกิริยาเวลาในการทะลุผ่านจะใช้เวลาประมาณ 10-30 ปี และสำหรับไอออนที่ถูกเจือจาง

หรือถูกหน่วงการเกิดปฏิกิริยาเวลาในการทะลุผ่านจะใช้เวลายาวนานมาก และอัตราการแพร่ของโมเลกุลจะช้าลงเมื่อสารเคมีเริ่มจะปรากฏออกมาภายในระยะเวลา 10-30 ปี

1. การพาแบบคงที่ (Steady advection)

การพาเป็นกระบวนการที่ตัวถูกละลายเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการไหลของของเหลวหรือตัวทำละลายซึ่งโดยทั่วไปคือน้ำ ในการตอบสนองต่อระดับความดันน้ำรวม (Total hydraulic head) โดยสมมุติให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายของน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบขยะคงที่ อัตราการเคลื่อนที่ของมวลตัวถูกละลายโดยการพาแบบหนึ่งมิติ (Advective mass flux) ต่อหน่วยพื้นที่ที่สามารถคำนวณได้ตามข้อสันนิษฐานของ Darcian ดังสมการที่ 2-5 โดยไม่คำนึงถึงการไหลผ่านข้อบกพร่องของปริมาตรช่องว่าง เช่น รอยแตก ร้าว รอยแยก รู การฉีกขาด เป็นต้น

$$J_A = C_0 \cdot v = C_0 \cdot k \cdot i = C_0 \cdot k \cdot (H + L) / L \quad (2-5)$$

เมื่อ J_A = อัตราการเคลื่อนที่ของมวลตัวถูกละลายโดยการพา ($\text{mg} / \text{cm}^2 / \text{sec}$)

C_0 = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในน้ำที่ด้านบนของชั้นกั้นซึม (mg / cm^3)

v = ความเร็วของการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นกั้นซึมเฉลี่ย (Average seepage velocity)
(cm / sec)

k = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm / sec)

i = ความชันทางชลศาสตร์

H = ความสูงของน้ำชะขยะบนชั้นกั้นซึม (cm)

L = ความหนาของชั้นกั้นซึม (cm)

เพื่อให้เข้าใจการคำนวณศักยภาพของอัตราการไหลผ่านชั้นกั้นซึมภายใต้เงื่อนไขการใช้งานทั่วไปของบ่อฝังกลบขยะ โดยการพา ค่าความชันทางชลศาสตร์มักถูกสมมุติให้มีเสดความสูงของน้ำชะขยะอยู่ที่ 30 เซนติเมตรกระทำด้านบนของชั้นกั้นซึมและมีคุณสมบัติที่สำคัญต่อการคำนวณสำหรับจีโอเมมเบรนและชั้นกั้นซึมดินเหนียวบดอัดดังนี้ (Daniel & Shackelford, 1989)

สำหรับจีโอเมมเบรน

ความสูงของน้ำชะขยะ (h) = 0.3 เมตร

ความหนา (t) = 1.5 มิลลิเมตร

ความพรุน (n) = 0.1

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) = 1×10^{-12} cm / sec

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) = 3×10^{-10} cm^2 / sec

ความชันทางชลศาสตร์ (i) = 115
 สำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด
 ความสูงของน้ำชะขยะ (h) = 0.3 เมตร
 ความหนา (t) = 0.9 เมตร
 ความพรุน (n) = 0.5
 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) = 1×10^{-7} cm/ sec
 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) = 2×10^{-6} cm²/ sec
 ความชันทางชลศาสตร์ (i) = 1.33

ตารางที่ 2-6 อัตราการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายโดยกลไกการพาผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด
 หนา 30 เซนติเมตร ภายใต้ความสูงของน้ำชะขยะ 30 เซนติเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (cm/ sec)	อัตราการไหล	
	แกลลอนต่อเอเคอร์ต่อวัน	ลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน
1×10^{-6}	1,200	1.15
1×10^{-7}	120	0.115
1×10^{-8}	12	0.0115
1×10^{-9}	1.2	0.00115

ตารางที่ 2-6 แสดงอัตราการเคลื่อนที่ของมวลตัวถูกละลายโดยกลไกการพาผ่านชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่าง ๆ ภายใต้ความสูงของน้ำชะขยะ 30 เซนติเมตร โดยแสดงในทอมของแกลลอนต่อเอเคอร์ต่อวัน พบว่าแม้ว่าชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเป็นไปตามข้อกำหนด คือ 1×10^{-7} cm/ sec อัตราการไหลกลับ มีมากถึง 120 แกลลอนต่อเอเคอร์ต่อวัน (0.115 ลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน) หรือเกือบ 44,000 แกลลอนต่อเอเคอร์ต่อปี (42 ลิตรต่อตารางเมตรต่อปี) และหากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้นไม่เป็นไปตามข้อกำหนดอัตราการรั่วไหลก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นจึงควรมีการเข้มงวดการควบคุมคุณภาพการออกแบบและก่อสร้างชั้นกันซึม พยายามลดความสูงของน้ำชะขยะที่เกิดขึ้นบนชั้นกันซึมด้วยวิธีการออกแบบระบบรวบรวมและกำจัดน้ำชะขยะหลักที่ดี และจำเป็นต้องใช้ระบบชั้นกันซึมผสมโดยใช้จีโอเมมเบรนวางเหนือหรือด้านบนของชั้นกันซึมดินเหนียวเพื่อช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำประสิทธิผล

2. การแพร่แบบคงที่ (Steady diffusion)

ตัวถูกละลายในน้ำชะขยะของบ่อฝังกลบสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นกั้นซึมดินเหนียวด้วยการแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion) ซึ่งเป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของสารเคมีที่ตอบสนองต่อระดับความเข้มข้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าความชันทางชลศาสตร์ สมการพื้นฐานสำหรับการแพร่ในดินจะเป็นไปตามกฎข้อแรกของฟิค (Fick's first law) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่หนึ่งมิติ ดังสมการที่ 2-6

$$J_D = D \cdot n \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) = D \cdot n \cdot (\Delta C / L) \quad (2-6)$$

$$\Delta C = C_0 - C_e \quad (2-7)$$

เมื่อ J_D = อัตราการเคลื่อนที่ของมวลตัวถูกละลายโดยกลไกการแพร่ (Diffusive mass flux, $\text{mg} / \text{cm}^2 / \text{sec}$)

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient, cm^2 / sec)

n = ความพรุนของดิน

$\partial C / \partial z$ = ความลาดเชิงความเข้มข้น

ΔC = ความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างด้านบนและด้านล่างของชั้นกั้นซึม (mg / cm^3)

C_0 = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ด้านบนของชั้นกั้นซึม (mg / cm^3)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ฐานของชั้นกั้นซึม (mg / cm^3)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลขึ้นอยู่กับสารเคมีที่สนใจ (เช่น ขนาดไอออนิก ประจุ และความจุของตัวถูกละลาย) และเงื่อนไขของการแพร่ (เช่น การแพร่ผ่านสารละลายอิสระ และน้ำในโพรงของดินและความคดเคี้ยวของช่องว่าง) การแพร่ของตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ผ่านน้ำในโพรงของดินช้ามากกว่าในสารละลายอิสระ

3. การแพร่แบบไม่คงที่ (Unsteady diffusion)

กฎข้อแรกของฟิคจะอธิบายถึงอัตราการเคลื่อนที่ของมวลตัวถูกละลายโดยการแพร่แบบคงที่ แต่สำหรับการแพร่ไม่คงที่จะขึ้นอยู่กับเวลาการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายที่ไม่เกิดปฏิกิริยาในดิน ดังสมการที่ 2-8

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2-8)$$

เป็นที่ทราบดีว่ากฎข้อสองของฟิกจะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่และเวลาของการแพร่ของตัวถูกละลายในตัวกลางความพรุน วิธีแก้ปัญหสำหรับสมการนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต โดยสมมติให้ที่เวลา $t=0$ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ด้านบนของชั้นกันซึมมีค่าเป็น C_0 ($C_0 > 0$) และความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ฐานของชั้นกันซึมมีค่าเป็นศูนย์ และถ้าหากความเข้มข้นของตัวถูกละลาย C_0 คงที่ที่ด้านบนของชั้นกันซึมที่เวลาใด ๆ วิธีแก้ปัญหของสมการข้างต้นสามารถทำได้โดย (Crank, 1956)

$$C(z,t) = C_0 \cdot \text{erfc} \left[z / (4 \cdot D \cdot t)^{0.5} \right] \quad (2-9)$$

เมื่อ $C(z,t)$ = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ความลึก z และที่เวลา t (mg/cm^3)

z = ความลึก (m)

t = เวลา (s)

erfc = ฟังก์ชันของความผิดพลาด (ได้จากตารางที่ 2-7)

4. การเคลื่อนที่รวมกันโดยกลไกการพาและการแพร่ (Combined advection-diffusion)

รูปแบบสมการการเคลื่อนที่โดยกลไกการพาและการแพร่แบบหนึ่งมิติสำหรับสารละลายที่ไม่เกิดปฏิกิริยาในดินเนื้อเดียวกันอิมตัวด้วยน้ำที่มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทุกทางภายใต้การไหลคงที่สม่ำเสมอ ดังสมการที่ 2-10

$$\partial C / \partial t = D_1 \cdot \left(\partial^2 C / \partial z^2 \right) - v_s \cdot (\partial C / \partial z) \quad (2-10)$$

เมื่อ D_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (cm^2/sec)

v_s = ความเร็วของการไหลซึมของน้ำในดิน (เช่น ความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านช่องว่างของชั้นกันซึม) (cm/s)

วิธีแก้ปัญหสำหรับสมการนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งเงื่อนไขในกรณีที่เราจะพิจารณาคือ 1) เมื่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ด้านบนของชั้นกันซึมคงที่ 2) เมื่อไม่มีการดูดซึมของสารละลายบนสิ่งกีดขวางที่เป็นของแข็ง และ 3) เมื่อความชันทางอุทกพลศาสตร์กระทำในทิศทางเดียวกับระดับความเข้มข้นของสารละลาย

หากสมมติให้เงื่อนไขขอบเขตเป็นกรณีที่สุดสำหรับชั้นกั้นซึมในบ่อฝังกลบ คือ

$$C(z, 0) = 0, z \geq 0$$

$$C(0, t) = C_0, t \geq 0$$

$$C(\infty, 0) = 0, t \geq 0$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้ วิธีแก้ปัญหของสมการดังกล่าวสำหรับตัวกลางความพรุนที่อิ่มตัวด้วยน้ำและเป็นเนื้อเดียวกัน (Ogata & Banks, 1961) สามารถทำได้โดย

$$C(z,t)/C_0 = 0.5 \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{(z - v_s \cdot t)}{(4 \cdot D_1 \cdot t)^{0.5}} \right] + \exp(v_s \cdot z / D_1) \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(z + v_s \cdot t)}{(4 \cdot D_1 \cdot t)^{0.5}} \right] \right\} \quad (2-11)$$

เมื่อ $C(z,t)$ = ความเข้มข้นของสารละลายที่ความลึก z และเวลา t (mg/cm^3)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic dispersion coefficient) คือ ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงกล (Mechanical dispersion coefficient, D_m) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิ์ผล (Effective diffusion coefficient, D) ดังสมการที่ 2-12 (Freeze & Cherry, 1979)

$$D_1 = D_m + D \quad (2-12)$$

เมื่อ D_m = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงกล (cm^2/sec)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอุทกพลศาสตร์เป็นฟังก์ชันของความเร็วของการไหลซึมของน้ำในดิน ที่ความเร็วของการไหลซึมของน้ำในดินเข้าใกล้ศูนย์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงกลก็เข้าใกล้ศูนย์ การศึกษานี้นำเสนออยู่บนพื้นฐานของ Shackelford and Redmond (1995) การแพร่จะครอบคลุมการเคลื่อนที่ของสารละลายที่อัตราการไหลต่ำซึ่งมักพบบ่อยในชั้นดินเหนียวกั้นซึม ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้การแพร่กระจายเชิงกลจะไม่สำคัญ (เช่น $D_m \approx 0$ และ $D_1 \approx D$) ดังนั้นสมการที่ 2-11 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$C(z,t)/C_0 = 0.5 \cdot \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{(z - v_s \cdot t)}{(4 \cdot D \cdot t)^{0.5}} \right] + \exp(v_s \cdot z / D) \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(z + v_s \cdot t)}{(4 \cdot D \cdot t)^{0.5}} \right] \right\} \quad (2-13)$$

เมื่อ $C(z,t)/C_0$ = อัตราส่วนความเข้มข้นที่ความลึก z และเวลา t (ไม่มีหน่วย)

v_s = ความเร็วของการไหลซึมของน้ำในดินผ่านชั้นกั้นซึม (cm/ sec)

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของชั้นกั้นซึม (cm^2/sec)

z = ความลึก (cm)

t = เวลา (sec)

ถ้ารับชั้นกั้นซึมในบ่อฝังกลับ ความเข้มข้นที่ฐานชั้นกั้นซึมที่เวลา t ใด ๆ สามารถประมาณได้โดยการกำหนดให้ $D_l = D$ ในสมการที่ 2-11 จะได้

$$C_e(t)/C_0 = 0.5 \cdot \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{(L - v_s \cdot t)}{(4 \cdot D \cdot t)^{0.5}} \right] + \exp(v_s \cdot L / D) \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(L + v_s \cdot t)}{(4 \cdot D \cdot t)^{0.5}} \right] \right\} \quad (2-14)$$

เมื่อ $C(z,t)/C_0$ = อัตราส่วนความเข้มข้นที่ความลึก z และเวลา t (ไม่มีหน่วย)

v_s = ความเร็วของการไหลซึมของน้ำในดินผ่านชั้นกั้นซึม (cm/ sec)

D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของชั้นกั้นซึม (cm^2/sec)

L = ความหนาของชั้นกั้นซึม (cm)

t = เวลา (sec)

ตารางที่ 2-7 ฟังก์ชันความผิดพลาด (*erfc*)

$$erf(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\beta} \exp(-\varepsilon^2) d\varepsilon$$

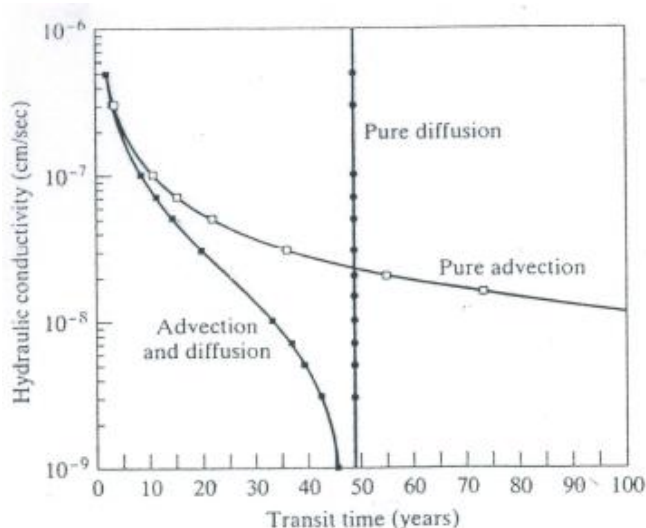
$$erf(-\beta) = -erf(\beta)$$

$$erfc(\beta) = 1 - erf(\beta)$$

β	$erf(\beta)$	$erfc(\beta)$
0	0	1.0
0.05	0.056372	0.943628
0.1	0.112467	0.887537
0.15	0.167996	0.832004
0.2	0.222703	0.777297
0.25	0.276326	0.723674
0.3	0.328627	0.671373
0.35	0.379382	0.620618
0.4	0.428392	0.571608
0.45	0.475482	0.524518
0.5	0.520500	0.479500
0.55	0.563323	0.436677
0.6	0.603856	0.396144
0.65	0.642029	0.357971
0.7	0.677801	0.322199
0.75	0.711156	0.288844
0.8	0.742101	0.257899
0.85	0.770668	0.229332
0.9	0.796908	0.203092
0.95	0.820891	0.179109
1.0	0.842701	0.157299
1.1	0.880205	0.119795
1.2	0.910314	0.089686
1.3	0.934008	0.065992
1.4	0.952285	0.047715
1.5	0.966105	0.033895
1.6	0.976348	0.023652
1.7	0.983790	0.016210
1.8	0.989091	0.010909
1.9	0.992790	0.007210
2.0	0.995322	0.004678
2.1	0.997021	0.002979
2.2	0.998137	0.001863
2.3	0.998857	0.001143
2.4	0.999311	0.000689
2.5	0.999593	0.000407
2.6	0.999764	0.000236
2.7	0.999866	0.000134
2.8	0.999925	0.000075
2.9	0.999959	0.000041
3.0	0.999978	0.000022

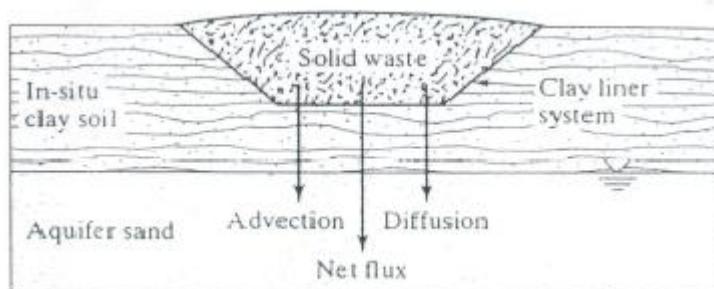
ความสัมพันธ์ที่สำคัญของกลไกการพาและการแพร่เป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของชั้นกันซึม จากการศึกษาของ Shackelford (1988) เวลาการทะลุผ่าน (เวลาสำหรับความเข้มข้นที่ไหลออกจนถึง 50% ของความเข้มข้นที่ไหลเข้าหรือความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่ไหลออก $C/C_0 = 0.5$) เป็นการสร้างกราฟสำหรับการเคลื่อนที่โดยกลไกการพา กลไกการการแพร่ และการเคลื่อนที่รวมกันของกลไกการพาและการแพร่ ดังภาพที่ 2-44 สำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดหนา 0.90 เมตร และมีความพรุนเฉลี่ยของดินเท่ากับ 0.5 สมมุติให้ค่าความชันทางชลศาสตร์เท่ากับ 1.33 (สอดคล้องกับน้ำชะขยะสูง 0.30 เมตร บนชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด) และอัตราการแพร่คงที่ที่ $6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ จากเส้นโค้งในภาพที่ 2-44 สามารถสรุปได้ 3 ข้อสรุปที่สำคัญ คือ

1. กลไกการแพร่ทำให้ระยะเวลาการทะลุผ่านลดลงแม้ว่าชั้นกันซึมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากับ $1 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{sec}$ ซึ่งเป็นค่าที่ระบุตามข้อกำหนดสำหรับชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ
2. การใช้กลไกการพาเพียงอย่างเดียวในการคาดการณ์เวลาการทะลุผ่านที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า $5 \times 10^{-8} \text{ cm}/\text{sec}$ จะมีความไม่ปลอดภัยอย่างมาก
3. กลไกการแพร่เป็นกระบวนการการเคลื่อนที่ที่มีบทบาทสำคัญเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า $2 \times 10^{-8} \text{ cm}/\text{sec}$ (เส้นโค้งการพากระจายเข้าใกล้เส้นโค้งการแพร่)



ภาพที่ 2-44 เวลาการทะลุผ่าน (ที่ $C/C_0 = 0.5$) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสำหรับการไหลประเภทต่าง ๆ (Shackelford, 1988)

การลดความสูงของน้ำชะขยะบนชั้นกันซึม (สอดคล้องกับค่าความชันทางชลศาสตร์) โดยการใช้ชั้นรวบรวมน้ำชะขยะหลักไม่สามารถกำจัดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารเคมีได้ซึ่งเป็นผลให้เกิดกลไกการแพร่ ดังนั้นบ่อฝังกลบขยะควรตั้งอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินเพื่อป้องกันการทำงานร่วมกันของกลไกการพาและการแพร่ทำให้เพิ่มการรั่วไหล ดังภาพที่ 2-45



ภาพที่ 2-45 การออกแบบบ่อฝังกลบแบบดั้งเดิมที่แสดงการไหลแบบการพาและการแพร่กระทำในทิศทางเดียวกัน (Qian et al., 2002)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Daniel and Benson (1990) ได้ศึกษาทฤษฎีของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นสำหรับชั้นดินกันซึมบดอัด โดยทำการบดอัดชั้นดินกันซึมแบบดั้งเดิมในสนามเพื่อกำหนดช่วงของปริมาณความชื้นในการบดอัดและคำนวณน้ำหนักขั้นต่ำเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ ซึ่งค่านี้เป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากในการปฏิบัติงาน เนื่องจากในการก่อสร้างชั้นดินกันซึมต้องแน่ใจว่ามีความแข็งแรงเพียงพอและการบดอัดที่ยอมรับได้ วิธีแนะนำสำหรับการกำหนดเกณฑ์ของปริมาณความชื้นและความหนาแน่นทำได้โดยใช้พลังงานการบดอัดสามพลังงานเพื่อสร้างขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและกำลังรับแรงเฉือนในการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างชั้นดินกันซึม

Daniel and Wu (1993) ได้ศึกษาการหาปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งของดินเหนียวบริเวณแห้งแล้งสำหรับชั้นดินกันซึมบดอัดและชั้นปกคลุม โดยการบดอัดตัวอย่างดินเหนียวด้วยพลังงานการบดอัดสามพลังงานที่ปริมาณความชื้นแตกต่างกันเพื่อให้มี 1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-9} m/s 2) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรไม่เกิน 4% 3) ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa จากนั้นนำผลการทดสอบทั้งสามมาสร้างขอบเขต

ที่ยอมรับได้และนำมาซ้อนทับกันเพื่อสร้างขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ซึ่งช่วงของปริมาณความชื้นที่ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำค่ามีช่วงกว้าง เพื่อป้องกันตัวอย่างเป็ยกเกิดการหดตัวมากเมื่อแห้งดังนั้นค่าปริมาณความชื้นที่จะนำไปใช้ต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและใช้พลังงานการบดอัดสูงเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและการหดตัวต่ำ โดยค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต้องมากกว่า 96-98% ของค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดสำหรับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D1557) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ มีการหดตัวน้อยที่สุด และมีกำลังรับแรงเฉือนเพียงพอซึ่งสามารถใช้ในการสร้างชั้นกันซึมและชั้นปกคลุมในบริเวณแห้งแล้งได้

Boynton and Daniel (1985) ได้ศึกษาการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวบดอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ทิศทางการไหลของน้ำผ่านชั้นของดินเหนียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ ระยะเวลาการบ่ม และรอยแตกร้าวเนื่องจากการแตกแห้ง โดยทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำด้วยชุดทดสอบแบบ Compaction mold แบบ Consolidation cell และแบบผนังยืดหยุ่น (Flexible wall) จากผลการทดสอบพบว่าชั้นที่มีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นที่ดีจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากันทุกทิศทาง ตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร จะมีการซึมผ่านเป็น 2 เท่าของตัวอย่างทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร แต่ความแตกต่างนี้จะส่งผลกระทบต่อผลกระทบน้อยมาก ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวเนื่องจากการแตกแห้งในดินเหนียวบดอัดจะปิดเพียงบางส่วนเท่านั้นเมื่อดินเหนียวถูกทำให้เปียกชื้นและถูกซึมผ่านยกเว้นว่าหากใช้ความเครียดประสิทธิผล (Effective stress) มากก็จะช่วยปิดรอยแตกร้าวได้

Mohamedzein, Al-Rawas, Al-Aghbari, Qatan, and Al-Rawas (2005) ได้ศึกษาการนำหินบดมาใช้เป็นชั้นกันซึมบดอัดในบ่อฝังกบขยะ โดยใช้หินบด 2 ชนิด คือ Al-Fulaij และ Fanja มาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ การทดสอบการบดอัด การทดสอบการบวมตัว การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ การทดสอบ XRD (X-ray diffraction) การทดสอบ SEM (Scanning electron microscope) และการวิเคราะห์ทางเคมี พบว่าหินบดทั้ง 2 ชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของชั้นกันซึมในบ่อฝังกบขยะ และจากผลการทดสอบ XRD และ SEM แสดงให้เห็นว่าหินบดทั้ง 2 ชนิดมีค่า activity ต่ำ และเมื่อทำการซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในหินบดที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก มีค่าการยุบอัดตัว (Compressibility) ต่ำ และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนอยู่ในช่วงที่กำหนดสำหรับชั้นดินกันซึม

Kalkan (2006) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวโดยใช้โคลนแดงและซีเมนต์เพื่อใช้เป็นชั้นดินเหนียวกันซึม โดยใช้อัตราส่วนโคลนแดง 5 10 15 20 และ 50% โดยน้ำหนักและอัตราส่วนซีเมนต์ 1 1.25 และ 5% โดยน้ำหนัก ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของโคลนแดง ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดแกนเดียว ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ และค่าการบวมตัวเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมดินเหนียวคอดัด ผลการทดสอบพบว่าดินเหนียวผสมโคลนแดงและดินเหนียวผสมโคลนแดงและซีเมนต์จะให้ค่ากำลังอัดสูงและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและค่าการบวมตัวต่ำเมื่อเทียบกับตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติ ซึ่งดินเหนียวผสมโคลนแดงและดินเหนียวผสมโคลนแดงและซีเมนต์สามารถใช้เป็นชั้นดินเหนียวกันซึมสำหรับการใช้งานทางด้านปฐพีได้

Cokca (2001) ได้ศึกษาผลกระทบของเกลือต่อดินที่มีการขยายตัว (Expansive soils) โดยใช้ถ่านหิน 2 ชนิด คือ ถ่านหิน Soma และถ่านหิน Tuncbilek ผสมกับดินที่มีการขยายตัวที่ 0-25% และระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน หลังจากนั้นทดสอบโดยใช้ Oedometer ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเกลือและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index) ค่า activity และค่าการบวมตัวของตัวอย่างดินลดลง และปริมาณเกลือที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าการบวมตัวลดลง คือ 20% การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และการบวมตัวเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณอนุภาคตะกอนบางส่วนและเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีที่ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวแบบราบเรียบทันทีทันใดและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและคุณสมบัติการแข็งตัวของเกลือเอง ดังนั้นทั้งเกลือ Class C ที่มีแคลเซียมสูงและต่ำสามารถใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของดินที่มีการขยายตัวได้

Pandian, Krishna, and Leelavathamma (2002) ได้ศึกษาผลกระทบของถ่านหิน 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านหิน Raichur (Class F) และถ่านหิน Neyveli (Class C) ต่อค่า CBR ของดิน Black cotton โดยเพิ่มปริมาณเกลือจาก 0 จนถึง 100% ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือไปยังดิน Black cotton จะส่งผลให้ค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือเกินกว่าปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลให้ค่า CBR ลดลงถึง 60% และหลังจากนั้นค่า CBR จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกลือ Neyveli จะมีค่ากำลังเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกลือชนิดนี้จะเพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานิกในรูปแบบสารประกอบซีเมนต์ส่งผลให้เกิดการเชื่อมแน่นระหว่างอนุภาคดิน Black cotton และเกลือ

Phani kumar and Sharma (2004) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเกลือเพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่มีการขยายตัว โดยศึกษาผลกระทบของ

ปริมาณเถ้าลอยต่อค่าดัชนีการบวมตัวอย่างอิสระ (Free swelling index) ค่าการบวมตัว ค่าความดันการบวมตัว (Swelling pressure) ค่าความเป็นพลาสติก ค่าการบดอัด ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่มีการขยายตัว โดยผสมดินที่มีการขยายตัวกับเถ้าลอยที่ปริมาณ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนักแห้ง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นค่าความเป็นพลาสติกมีค่าลดลง และค่าดัชนีการบวมตัวลดลงประมาณ 50% เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็น 20% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่มีการขยายตัวผสมกับเถ้าลอยมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่าลดลง ผลกระทบของเถ้าลอยจะคล้ายกับการเพิ่มขึ้นของพลังงานการบดอัด ด้วยเหตุนี้ดินที่มีการขยายตัวจึงมีเสถียรภาพมากขึ้น และค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) ของดินที่มีการขยายตัวผสมกับเถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

Phani kumar and Sharma (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียว 2 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ ดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูงและดินเหนียวที่ไม่มีการขยายตัว (Non-expansive clay) โดยศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยต่อค่าดัชนีการบวมตัว ค่าการบวมตัว และค่าความดันการบวมตัวของดินที่มีการขยายตัว นอกจากนี้ค่าดัชนีการยุบอัดตัว (Compression index) และการยุบตัวคายน้ำทุติยภูมิ (Secondary consolidation) ของดินที่มีการขยายตัวและดินที่ไม่มีการขยายตัวจะถูกทดสอบ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อทดสอบตัวอย่างดินที่หน่วยน้ำหนักแห้งคงที่ค่าการบวมตัวและค่าความดันการบวมตัวจะลดลงเกือบ 50% และเมื่อทดสอบที่น้ำหนักดินเหนียวคงที่ค่าการบวมตัวและค่าความดันการบวมตัวจะเพิ่มขึ้นเกือบ 60% ที่ปริมาณเถ้าลอย 20% ค่าดัชนีการยุบอัดตัวและค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัวคายน้ำทุติยภูมิของดินเหนียวทั้ง 2 ชนิดจะลดลงถึง 40% ที่ปริมาณเถ้าลอย 20%

Mollamahmutoglu, Yilmaz , and Gungor (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติทางปฏิพิของดินที่มีการขยายตัว โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางแร่ ทดสอบการบวมตัวและความดันการบวมตัวบนตัวอย่างบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยการบดอัดดินแบบมาตรฐาน การเปลี่ยนแปลงทางด้านกำลัง พฤติกรรมการบวมตัวของดินผสมเถ้าลอยกับระยะเวลาการบ่ม ผลกระทบของคุณสมบัติของเถ้าลอยและปริมาณแร่ของดินเหนียวต่อพฤติกรรมการขยายตัวจะถูกทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าที่ปริมาณเถ้าลอย 35% จะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของตัวอย่างดินที่มีการขยายตัวให้เป็นวัสดุถมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้กำลังของตัวอย่างดินจะเพิ่มขึ้นกับระยะเวลาการบ่ม แต่ค่าขีดพิกัดเหลว ค่าดัชนีความเป็นพลาสติก ค่าการบวมตัวและค่าความดันการบวมตัวจะลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

Mir and Sridharan (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยต่อพฤติกรรมการบดอัด คุณสมบัติการบวมตัว และคุณสมบัติทางกายภาพของดิน Black cotton ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอย Neyveli Class C ที่มีแคลเซียมสูงและเถ้าลอย Badarpur Class F ที่มีแคลเซียมต่ำ ที่สัดส่วนเถ้าลอยแตกต่างกันที่ 10 20 40 60 และ 80% โดยน้ำหนัก ผสมกับดิน Black cotton จากอินเดีย ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทดสอบการบดอัดดิน และทดสอบการบวมตัว ผลการศึกษาพบว่าค่าพิสัยความคงตัว (Consistency limits) ค่าการบดอัด และค่าการบวมตัวของดินที่มีการขยายตัวผสมกับเถ้าลอยจะถูกปรับแก้และถูกปรับปรุงอย่างมาก โดยที่ปริมาณเถ้าลอย 40% คือ ปริมาณที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงคุณสมบัติความเป็นพลาสติกของดิน Black cotton เถ้าลอยจะให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดิน Black cotton เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยไปยังดิน Black cotton ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดิน Black cotton ผสมเถ้าลอยมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเถ้าลอย Neyveli 10% คือ ปริมาณที่เหมาะสมที่ช่วยลดค่าการบวมตัวเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าลอย Badarpur 40%

Musso, Roehl, Pettinari, and Valles (2010) ได้ศึกษาการนำ Smectite-rich claystones จาก Northpatagonia มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ โดยใช้ Northpatagonia claystones 2 ชนิด คือ โซเดียมเบนโทไนต์และ Smectite-rich claystones จาก Upper Cretaceous Allen Formation มาทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ การบดอัด การอัดตัวคายน้ำ และการบวมตัว ทดสอบคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การทดสอบ CEC (Cation exchange capacity) และการวิเคราะห์ทางเคมีทั้งหมด และทดสอบคุณสมบัติทางแร่ ได้แก่ การทดสอบ XRD และ SEM จากผลการทดสอบพบว่า claystones ทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยสามารถจำแนก Smectite-rich claystones ได้เป็นเบนโทไนต์ มีค่าการยุบอัดตัวสูงเหมือนกับโซเดียมเบนโทไนต์ซึ่งไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุกันซึมโดยตรง เมื่อนำ Smectite-rich claystones มาผสมกับทรายที่มีขนาดละเอียดพบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าข้อกำหนดสำหรับชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย คือ 1×10^{-9} m/s

Puri and Soni (2013) ได้ศึกษาการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและการทดสอบการบดอัดของอัตราส่วนเบนโทไนต์ต่อดินตะกอนและศึกษาผลกระทบของปริมาณเบนโทไนต์ที่ผสม โดยใช้ดินตะกอน 2 ชนิด คือ ดินตะกอนที่มีความเป็นพลาสติก (Plastic silt) และที่ไม่มีความเป็นพลาสติก (Non-plastic silt) จากนั้นทำการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบความดันน้ำเปลี่ยนแปลงของดินตะกอนทั้ง 2 ชนิดต่อเบนโทไนต์ 3 6 9 12 และ 15% โดยน้ำหนักแห้ง จากผลการทดสอบพบว่าดินตะกอนทั้ง

สองชนิดจะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลดลงเมื่อปริมาณดินตะกอนเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของทุกอัตราส่วนผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณดินตะกอนเพิ่มขึ้น

Tsakiridis et al. (2016) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ Spilitic เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการก่อสร้างชั้นกันซึมบดอัดในบ่อฝังกลบขยะ โดยแปรผันอัตราส่วนเบนโทไนต์ 2.5 และ 3% ทำการทดสอบคุณสมบัติของ Spilitic โดยการหาขนาดผลึก การวิเคราะห์ทางเคมี การวิเคราะห์แร่ด้วย XRD การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TG-DGT) และการทดสอบ SEM และ TEM (Thermogravimetric electron microscopy) และทดสอบหาค่าคุณสมบัติของ Spilitic ผสมเบนโทไนต์ โดยทดสอบหาค่าพิกัดเหลว ค่าดัชนีพลาสติก ปริมาณสารอินทรีย์ การบดอัด และการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ จากผลการทดสอบพบว่า Spilitic ผสมเบนโทไนต์ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะ

ธนิต เกลิมยานนท์, สุรพล อารีย์กุล และ นันทนิตย์ เจริญไชสง (2550) ได้ศึกษาหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยใช้การทดสอบ 2 แนวทาง ได้แก่ การหาค่าแฟกเตอร์การหน่วงโดยคำนวณจากสัมประสิทธิ์การแบ่งที่ได้จากการทำการทดสอบแบบแบทช์ (Batch adsorption test) และการหาค่าแฟกเตอร์โดยตรงจากการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column test) ในการทดสอบจะใช้ดินเหนียว 2 ชนิด คือ ดินลูกรังและดินเหนียวมาริน โดยใช้สารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ผลการทดสอบพบว่าดินเหนียวมารินมีความสามารถในการหน่วงมากกว่าดินลูกรัง ลำดับการหน่วงจากมากไปน้อยของดินทั้ง 2 ชนิดต่อสารละลายโลหะหนักสอดคล้องกันและสามารถเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่าค่าแฟกเตอร์การหน่วงที่ได้จากการทดสอบแบบคอลัมน์มีค่าต่ำกว่าและถูกต้องมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบแบทช์

ชัยเจริญ มัจฉาสาระ และธนิต เกลิมยานนท์ (2552) ได้ศึกษาการใช้ดินในพื้นที่จังหวัดสงขลา ได้แก่ ดินลูกรัง ดินเหนียวนา ดินเหนียวทะเล และทรายผสมเบนโทไนต์ 5% มาประเมินความเหมาะสมสำหรับเป็นชั้นกันซึมตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson (1990) ดังนี้

1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำไม่มากกว่า 1×10^{-7} cm/ s 2) ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa และ 3) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรไม่เกิน 4% จากผลการทดสอบพบว่าดินลูกรัง ดินเหนียวนา ดินเหนียวทะเล เมื่อบดอัดด้วยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและแบบมาตรฐานจะมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะใช้เป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบได้

ทวิศักดิ์ วังไพศาล และนท แสงเทียน (2554) ได้ศึกษาการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินทรายแป้งเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึม พบว่าเมื่อผสม โซเดียมเบนโทไนต์ ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักกับตัวอย่างดินทรายแป้งจะทำให้ได้ดินกันซึมบดอัดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-7} cm/s จากการทดสอบคุณสมบัติของดินทรายแป้งผสมเบนโทไนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมระยะยาว พบว่า 1) การแลกเปลี่ยนไอออนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินทรายแป้งผสมเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น แต่การทำให้ดินมีความอึดตัวก่อนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจะทำให้ดินทรายแป้งผสมเบนโทไนต์สามารถรักษาประสิทธิภาพในการเป็นชั้นกันซึมได้ 2) วัฏจักรการเปียกและแห้งร่วมกับการแลกเปลี่ยนไอออนจะทำให้คุณสมบัติของเบนโทไนต์เปลี่ยนแปลงได้หากผ่านวัฏจักรการเปียกและแห้งหลายรอบ แม้ว่าน้ำที่สัมผัสกับเบนโทไนต์แห้งจะมีความเข้มข้นของไอออนบวกต่ำอาจทำให้ชั้นดินกันซึมสูญเสียประสิทธิภาพการใช้งานในระยะยาวได้ ในประเทศเขตร้อนชื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามฤดูกาลอย่างชัดเจนควรป้องกันปัญหาดังกล่าวได้โดยการทำให้ชั้นดินกันซึมบดอัดมีความอึดตัวด้วยน้ำก่อนการเปิดใช้งาน

สุภโชค สันติวัฒนาพร, ธนิต เถлимยานนท์ และสุเมธ ไชยประพัทธ์ (2555) ได้ศึกษาการนำตะกอนประปามาประยุกต์ใช้เป็นชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบ โดยตะกอนประปาถูกปรับปรุงคุณภาพโดยนำไปผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนขาว อัตราส่วนตะกอนประปาและวัสดุผสมที่เหมาะสมที่สุดพิจารณาจากคุณสมบัติที่สำคัญของชั้นกันซึมคือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของตะกอนประปาผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนขาว คือ 1.00 : 0.00 : 0.15 โดยตะกอนประปาผสมนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 5.30×10^{-8} เซนติเมตรต่อวินาที มีค่ากำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผสมบ่มที่เวลา 0 7 และ 28 วันเท่ากับ 453 614 และ 752 kPa ตามลำดับ และมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรเท่ากับ 2.29%

Peirce, Sallfors, Peel, and Witter (1987) ได้ศึกษาผลกระทบของการเลือกใช้สารเคมีอนินทรีย์ (Ferric chloride และ Nickel nitrate) และประเภทของชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (แบบ Fixed wall cell และแบบ Flexible wall cell) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินเหนียวบดอัด 3 ชนิด ได้แก่ White Store Hoytville และ Faceville ผลการศึกษาพบว่าดินเหนียวทั้ง 3 ชนิดที่ซึมผ่านด้วยสารเคมีอนินทรีย์ที่ความเข้มข้นของการทดสอบจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับที่ซึมผ่านด้วยน้ำ

Ruhl and Daniel (1997) ได้ศึกษาการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำบนชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์ (Geosynthetic clay liners, GCLs) โดยซึมผ่านด้วยของเหลว 7 ชนิดและ

3 เงื่อนไขของการทำให้เปียก ผลการทดสอบ พบว่า เงื่อนไขของการทำให้เปียกมีความสำคัญอย่างมาก โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะมีค่าต่ำมากเมื่อซึมผ่านครั้งแรกด้วยน้ำค่อนข้างมากกว่าซึมผ่านครั้งแรกด้วยสารละลายเคมีหรือน้ำชะขยะ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์จะมีค่าสูงมากเมื่อซึมผ่าน โดยตรงด้วย 1) น้ำชะขยะมูลฝอยที่จำลองขึ้นที่อุดมด้วยแคลเซียม 2) สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดรุนแรง หรือ 3) สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างรุนแรง ชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ (1×10^{-8} - 1×10^{-10} cm/s) เมื่อซึมผ่านด้วย 1) น้ำชะขยะอันตราย (Hazardous waste) ที่จำลองขึ้น 2) น้ำชะขยะจริง หรือ 3) น้ำชะเถ้าลอยที่จำลองขึ้น ชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์ที่มีเบนโทไนต์ชนิดต้านทานสารปนเปื้อนบรรจุอยู่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำกว่าชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์ที่มีเบนโทไนต์ปกติบรรจุอยู่สำหรับของเหลวบางชนิดที่ซึมผ่านแต่ไม่ใช่ทั้งหมด

Rahman, Kodikara, and Bouazza (2001) ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของดิน Victorian 2 ชนิด ได้แก่ Werribee และ Echuca ด้วยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในห้องปฏิบัติการ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะถูกรวบรวมเวลาด้วยการซึมผ่านด้วยน้ำ น้ำชะขยะ เมทานอล และน้ำชะขยะที่ถูกปรับปรุงขึ้นโดยใช้ชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบผนังยึดหยุ่น ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบ consolidation cell ชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำแบบ โมลด์อัด (Compaction mould) ผลการศึกษาพบว่าผลของความเข้ากันได้จะขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบ และโดยทั่วไปการใช้วิธีแบบผนังยึดหยุ่นมักจะไม่ส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงในค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ แต่ว่าการใช้วิธีแบบ consolidation cell และแบบ โมลด์อัด จะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ความจำเป็นสำหรับวิธีการทดสอบที่ดีกว่าคือการนำเทคนิคการทดสอบใหม่ของเงื่อนไขความเครียดด้านข้างเป็นศูนย์ (Zero lateral strain boundary) มาใช้

Jo, Benson, Shackelford, Lee, and Edil (2005) ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในระยะยาวของชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์ด้วยสารละลายเกลืออนินทรีย์ โดยใช้สารละลายเกลือชนิดเดียว (NaCl KCl หรือ CaCl_2) เพื่อ 1) ประเมินค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในระยะยาว คือ ส่งผลต่อความเข้มข้นของไอออนบวกและวาเลนซ์ และ 2) แสดงความสัมพันธ์และความสำคัญของการสิ้นสุดเมื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของชั้นกันซึมดินเหนียวสังเคราะห์ด้วยสารละลายเกลือ ผลการศึกษา พบว่า การซึมผ่านด้วยสารละลาย CaCl_2 จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น 10 เท่าหรือมากกว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย โดยการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นช้ามาก (1 ปีหรือ 100 ปริมาตรของการไหล) เมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ในทางตรงกันข้ามเมื่อซึมผ่านด้วย

สารละลาย NaCl หรือ KCl ที่ความเข้มข้น 100 mM หรือน้ำปราศจากอากาศ (de-ionized water, DI) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะไม่เห็นผลชัดเจนไม่ว่าจะด้วยระยะเวลาการซึมผ่านหรือจำนวนของปริมาตรของการไหล ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ทดสอบได้ตาม ASTM D5084 และ D6766 (K_{5084} และ K_{6766}) จะเท่ากับกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในระยะยาวเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl KCl หรือ CaCl_2 ที่มีความเข้มข้นสูง (≥ 50 mM) ในทางตรงกันข้ามเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลาย CaCl_2 ที่มีความเข้มข้นต่ำ (≤ 20 mM) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ทดสอบได้ตาม ASTM D5084 และ D6766 (K_{5084} และ K_{6766}) จะต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในระยะยาว 2-13 เท่า

Francisca and Glatstein (2010) ได้ศึกษาผลของปฏิกิริยาทางชีวภาพ ทางกายภาพ และทางเคมีต่อการซึมผ่านของน้ำชะขยะผ่านชั้นดินบดอัด โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในระยะยาวของดินตะกอนผสมเบนโทไนต์บดอัดจะถูกวัดด้วยน้ำกลั่น น้ำชะขยะในบ่อฝังกลบ และสารละลายธาตุอาหาร (Nutrient solution) ผลการศึกษา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินจะลดลงอย่างมากกับเวลาเมื่อของเหลวที่ซึมผ่านมีจุลินทรีย์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลงเนื่องมาจากการลดลงของความพรุนประสิทธิผล เนื่องจากการอุดตันช่องว่าง การอุดตันช่องว่างจะถูกวิเคราะห์โดยการพิจารณาด้วยกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ผลกระทบของจุลินทรีย์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของชั้นดินกันซึมที่ถูกซึมผ่านด้วยน้ำชะขยะจะส่งผลกระทบต่อมากกว่าผลกระทบที่เกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี การมีอยู่ของจุลินทรีย์จะถูกยืนยันด้วยการการสังเกตจำนวนของจุลินทรีย์ในของเหลวที่ซึมผ่านด้วย microbial exopolysaccharides (EPS) ที่ถูกตรวจพบในช่องว่างดินและจากการวิเคราะห์กลับของโมเดล การอุดตันช่องว่าง การมีอยู่ของจุลินทรีย์ในการบดอัดและของเหลวที่ซึมผ่านจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในระยะยาวลดลงจนถึง 100 เท่า

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การศึกษาความเป็นไปได้และปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย สามารถแบ่งการทดสอบที่ศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ดินที่ถูกขุดลอก

ท่าเรือถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของระบบการขนส่งสินค้าทางน้ำเนื่องจากเป็นการขนส่งที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยท่าเรือจะมีการบำรุงรักษาด้วยการขุดลอกอยู่เสมอเพื่อรักษาระดับความลึกของท่าเทียบและร่องน้ำให้เรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่สามารถเข้าจอดเทียบท่าเพื่อขนส่งสินค้าได้

ท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบังเป็นท่าเรือหลักของประเทศไทยในการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ ตั้งอยู่ชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยที่ ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตหีบ และอำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ประมาณ 120 กม ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ ท่าเรือมีพื้นที่ประมาณ 6,340 ไร่ เริ่มเปิดใช้เมื่อ พ.ศ. 2534 ปัจจุบันได้พัฒนาไป 2 เฟส โดยมีความลึกของพื้นน้ำ 18 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง และสามารถรองรับปริมาณตู้สินค้าได้ 10-11 ล้าน TEU/ปี (54% ของการส่งออกและนำเข้าของประเทศไทย) ซึ่งถือเป็นอันดับที่ 23 ของโลก และมีแผนการก่อสร้างเฟส 3 โดยตั้งเป้าหมายให้ท่าเรือแหลมฉบังติดอันดับท่าเรือที่ทันสมัย 1 ใน 10 ของโลก

ดินที่ถูกขุดลอกเป็นตะกอนเนื้อละเอียดที่เกิดจากการสะสมของวัสดุต้นกำเนิดบริเวณชายฝั่งที่ทับถมกันเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำและระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ดินที่ถูกขุดลอกภายหลังการขุดลอกถือเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่ไม่มีประโยชน์หรืออาจเรียกได้ว่าเป็น “ขยะทางสิ่งแวดล้อม” อย่างไรก็ตามปริมาณดินที่ถูกขุดลอกจำนวนมากที่ได้จากการขุดลอกสามารถก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา ซึ่งวิธีการกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมแบบดั้งเดิม เช่น การทิ้งในทะเลลึก ปัจจุบันถือว่ามียกจำกัดทางกฎหมายทั้งในและระหว่างประเทศ นอกจากนี้วิธีการกำจัดแบบอื่น เช่น การทิ้งบนบก ก็ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านค่าดำเนินการตลอดจนปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับขยะจำนวนมาก (Dubois, Abriak, Zentar, & Ballivy, 2009) ดังนั้นการจัดการขยะทางสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ

ดินที่ถูกขุดลอกเป็นดินเนื้อละเอียด สีเทา ที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังที่ระดับความลึกจากระดับดินเดิม 0.5-1 เมตร แยกเศษวัชพืชและวัสดุปนเปื้อนออก นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเข้าเครื่องบดเพื่อย่อยดินให้เป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) เก็บใส่ถุงพลาสติกให้แน่นหนาเพื่อป้องกันความชื้นเพื่อใช้เป็นตัวอย่างทดสอบต่อไป

2. แก้วลอย

แก้วลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแก้วที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 และมีองค์ประกอบทางเคมี

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 75.03 และ CaO เท่ากับร้อยละ 13.72 สามารถจำแนกเป็นวัสดุ
ปอซโซลานประเภท Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618



(a) ดินที่ถูกขุดลอก



(b) เถ้าลอย

ภาพที่ 3-2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วิธีการวิจัย

การศึกษาคือความเป็นไปได้และปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อ
ประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 ส่วน
(ภาพที่ 3-1) ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย ประกอบด้วย

1.1 การทดสอบขีดพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) ตามมาตรฐาน ASTM D4318

Method A

1.2 การทดสอบขีดพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ตามมาตรฐาน ASTM D4318

1.3 การทดสอบหาขนาดผละของเม็ดวัสดุโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบด้าง (Grain
size analysis, sieve wash) ตามมาตรฐาน ASTM D422

1.4 การทดสอบหาขนาดผละของเม็ดวัสดุโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ตาม
มาตรฐาน ASTM D422-63

1.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ตามมาตรฐาน ASTM
D854-02

1.6 การทดสอบการจำแนกดิน (Soil classification, USCS) ตามมาตรฐาน ASTM D 2488

2. การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมเกล้าลอย โดยแปรผันสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักแห่งระหว่างดินที่ถูกขุดลอกต่อเกล้าลอย คือ 100 : 0 และ 80 : 20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 0 7 และ 28 วัน ประกอบด้วย

2.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction) โดยใช้พลังงานการบดอัด 3 พลังงาน ได้แก่

2.1.1 การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor, MP) ตามมาตรฐาน ASTM D 1557

2.1.2 การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor, SP) ตามมาตรฐาน ASTM D 698

2.1.3 การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced proctor, RP) ตาม Daniel and Benson (1990)

2.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity, k) โดยวิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ตามมาตรฐาน ASTM D2435-96 และการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ แบบความดันน้ำคงที่ (Constant head) ตามมาตรฐาน ASTM D2434-68 สำหรับการซึมผ่านด้วยสารเคมี

2.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM D2166

2.4 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric strain) ตาม Daniel and Wu (1993)

3. การสร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone) ตาม Daniel and Benson (1990); Daniel and Wu (1993)

4. การศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารเคมีแต่ละชนิด

5. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) ของสารเคมีต่าง ๆ และคำนวณหาเวลาการไหลทะลุผ่าน (Breakthrough time) ของน้ำชะขยะภายใต้ปรากฏการณ์การพา (Advection) และการแพร่ (Diffusion)

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) โดยใช้ก้อนมาตรฐานหนัก 10 ปอนด์ (45 นิวตัน) ระยะยก 18 นิ้ว (460 มิลลิเมตร) บดอัดจำนวน 5 ชั้นเท่า ๆ กัน และบดอัดดิน 25 ครั้งต่อชั้น

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

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

การบดอัดดินด้วยพลังงาน 3 พลังงานเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในการสร้างกราฟการบดอัดและใช้เตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity)

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำใช้วิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ตามมาตรฐาน ASTM D2435-96 โดยนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัด แล้วนำไปบรรจุลงพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นนำดินตัวอย่างไปบดอัดในวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตรด้วยพลังงานการบดอัดดังกล่าวมาแล้วข้างต้น แล้วนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบแล้วแขวนน้ำหนัก 0.5 1 2 และ 5 kg เมื่อสิ้นสุดการให้น้ำหนักจึงนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่อไป

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength)

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวเป็นการทดสอบหาลำดับด้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยให้แรงกดในแนวตั้งต่อตัวอย่างโดยไม่มีแรงดันทางด้านข้างตามมาตรฐาน ASTM D2166 โดยนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัด แล้วนำไปบรรจุลงในถุงพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นบดอัดตัวอย่างดินด้วยพลังงานบดอัดทั้ง 3 พลังงานในกระบอกบดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร เสร็จแล้วดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกแล้วนำเข้าเครื่องทดสอบเพื่อหาลำดับกำลังอัดแกนเดียวต่อไป โดยก่อนทำการทดสอบวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่าง และให้แรงกดที่อัตราการกดคงที่ที่ 0.05 in/min จากนั้นนำผลการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อหาลำดับกำลังอัดแกนเดียวซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการกดตัวอย่าง 3 ก้อนที่สัดส่วนผสมเดียวกัน

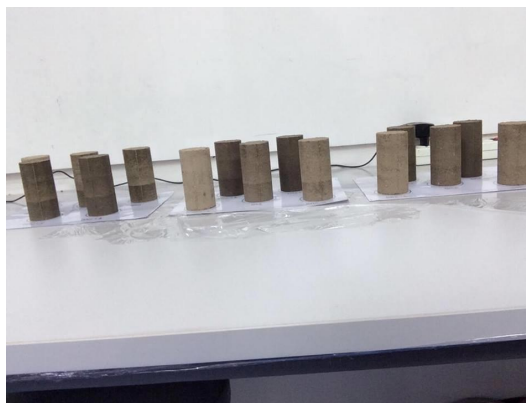


ภาพที่ 3-3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage)

การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ตาม Daniel and Wu (1993) สามารถทดสอบได้โดยนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นจากการทดสอบการบดอัด แล้วนำไปบรรจุลงในถุงพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นบดอัดตัวอย่างดินด้วยพลังงานบดอัดทั้ง 3 พลังงาน จากนั้นดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกบดอัดแล้ววางทิ้งไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกและควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการวัดขนาด

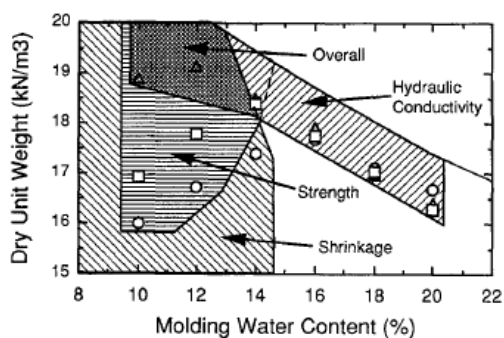
เส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างดินทุก ๆ 12 ชั่วโมงจนกระทั่งตัวอย่างมีปริมาตรคงที่
แล้วนำผลการทดสอบที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต่อไป



ภาพที่ 3-4 การทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร

ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกั้นซึมบดอัด (Overall acceptable zone)

เพื่อประเมินความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นกั้นซึมตามข้อกำหนดของ Daniel and Benson และ Daniel and Wu ที่กำหนดขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกั้นซึมบดอัดภายใต้ข้อกำหนดของ 3 ประการ คือ 1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต้องไม่เกิน 1×10^{-9} m/s 2) ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และ 3) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรต้องมีค่าไม่เกิน 4% การประเมินความเหมาะสมสามารถทำได้โดยการนำพื้นที่ผลการทดสอบต่าง ๆ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้นที่ผ่านข้อกำหนดมาซ้อนทับกัน และพื้นที่ที่ยอมรับได้สามรูปซ้อนทับกัน คือ ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด



ภาพที่ 3-5 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกั้นซึมบดอัด (Daniel & Wu, 1993)

การศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารเคมีแต่ละชนิด

การศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินที่ถูกขุดลอกผสมแก้าลอย 3 สัดส่วนผสม โดยเลือกสัดส่วนผสมที่มีคุณสมบัติเหมาะสม 3 อันดับแรก และสารเคมีในน้ำชะขยะที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ถูกสังเคราะห์ขึ้นเอง ได้แก่

1. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อศึกษาผลกระทบของสารอนินทรีย์ (Inorganic leachate) ในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินที่ถูกขุดลอกผสมแก้าลอย

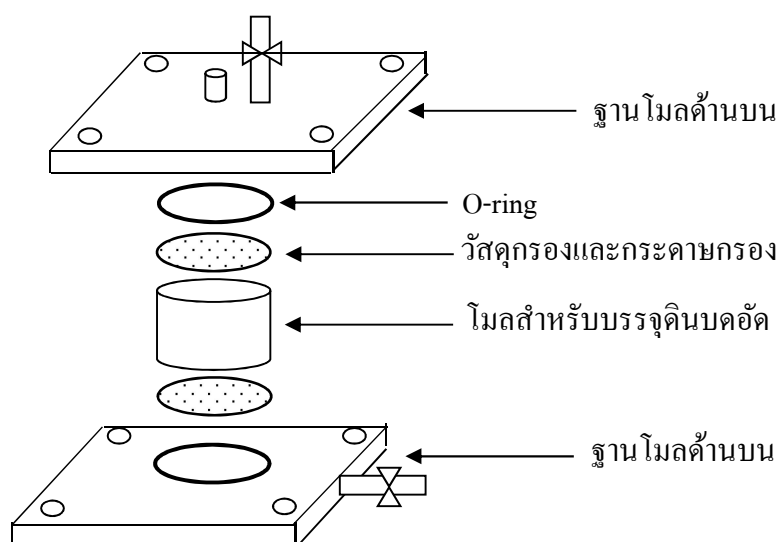
2. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อศึกษาผลกระทบของสารอนินทรีย์ (inorganic leachate) ในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินที่ถูกขุดลอกผสมแก้าลอย

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในส่วนนี้จะใช้เครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็ง (Rigid wall permeameter) ตามมาตรฐาน ASTM D2434-68 โดยบดอัดดินลงในโมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.14 เซนติเมตร สูงประมาณ 4.54-6.05 เซนติเมตร และใช้วิธีการทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ (Constant head) ที่ 10-500 kPa และให้ความดันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ประมาณ 22.03-1314.98 และกำหนดทิศทางการไหลของน้ำและสารละลายผ่านตัวอย่างจากด้านล่างขึ้นด้านบนเพื่อกำจัดฟองอากาศออกจากตัวอย่างดิน

เครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็ง ประกอบด้วย โมลสแตนเลสสำหรับบดอัดดิน o-ring 2 อัน วัสดุกรอง 2 แผ่น กระจายกรอง 2 แผ่น ฐานด้านล่างและบนของโมล โดยฐานด้านล่างจะถูกเจาะรูด้านข้างเพื่อใส่วาล์วทองเหลืองสำหรับให้น้ำเข้า และฐานด้านบนจะถูกเจาะรูเพื่อให้น้ำออก

การประกอบเครื่องมือทดสอบสำหรับการซึมผ่านด้วยน้ำจะเริ่มจากวาง o-ring 1 อันบนฐานด้านล่างตามด้วยวัสดุกรอง 1 แผ่น กระจายกรอง 1 แผ่น จากนั้นนำโมลที่บรรจุดินบดอัดมาวางตามด้วยกระจายกรอง 1 แผ่น วัสดุกรอง 1 แผ่น และนำฐานด้านบนมาประกบทับแล้วขันนอตยึดให้แน่น จากนั้นต่อสายยางน้ำเข้าที่ฐานด้านล่างและปลายด้านหนึ่งของสายยางต่อเข้ากับเครื่อง GDS STDDPC (GDS Standard digital pressure controller) สำหรับดันน้ำเข้าตัวอย่างดิน และต่อสายยางอีกอันเข้ากับฐานด้านบนสำหรับรองรับน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินเข้าสู่ภาชนะรองรับ ดังภาพที่ 3-7(a)

การประกอบเครื่องมือทดสอบสำหรับการซึมผ่านด้วยสารละลายจะเหมือนกันกับการซึมผ่านด้วยน้ำ แต่แตกต่างกันที่การต่อสายยางน้ำเข้าที่ฐานด้านล่างซึ่งจะมีการใช้ Toxic interface chamber (TIC) สำหรับบรรจุสารละลาย โดยเมื่อประกอบชุดอุปกรณ์ทดสอบแบบผนังแข็งเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะทำการต่อสายยางน้ำเข้าที่ฐานด้านล่างส่วนปลายสายยางอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับด้านล่างของเครื่อง TIC และนำสายยางอีกเส้นมาต่อเข้ากับด้านบนของเครื่อง TIC ปลายด้านหนึ่งของสายยางต่อเข้ากับเครื่อง GDS STDDPC สำหรับใช้น้ำคั้นสารละลายที่อยู่ในเครื่อง TIC ให้ไหลเข้าสู่ตัวอย่างดิน จากนั้นต่อสายยางอีกอันเข้ากับฐานด้านบนของชุดอุปกรณ์ทดสอบผนังแข็งสำหรับรองรับน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินเข้าสู่ภาชนะรองรับ ดังภาพที่ 3-7(b)



ภาพที่ 3-6 การประกอบเครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็ง

การทดสอบทำได้โดยนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบการบดอัด แล้วนำไปบรรจุลงในพลาสติกให้แน่นบ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นกระจายทั่วมวลดิน จากนั้นนำดินตัวอย่างไปบดอัดในโมลด้วยพลังงานการบดอัดดังกล่าวมาแล้วข้างต้น แล้วนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบกำหนดความดันคงที่โดยซึมผ่านด้วยน้ำ พร้อมทั้งอ่านค่าปริมาณน้ำเข้าและวัดปริมาณน้ำออกจากตัวอย่างดินทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งปริมาณน้ำเข้าเท่ากับปริมาณน้ำออกและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำคงที่ติดต่อกัน 4-5 ค่า จากนั้นเปลี่ยนจากการซึมผ่านด้วยน้ำเป็นสารละลาย NaCl และ CaCl_2 1 โมลาร์ และทำการทดสอบเช่นเดียวกับการซึมผ่านด้วยน้ำ โดยอ่านค่าปริมาณสารละลายที่เข้าและวัดปริมาณสารละลายที่ออกจากตัวอย่าง

ดินทุก ๆ 25 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายต่อไป ทำการซึมผ่านจนกระทั่งสารละลายซึมผ่านตัวอย่างดินได้อย่างน้อย 3 Pore volume และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายคงที่ติดต่อกัน 4-5 ค่า จึงหยุดการทดสอบ

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยวิธีการทดสอบแบบความดันคงที่มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$k = \frac{QL}{\Delta hAt} \quad (3-1)$$

โดยที่ Q = ปริมาณการไหลของน้ำผ่านตัวอย่างดิน (cm^3)

L = ความสูงของตัวอย่างดินในโมล (cm)

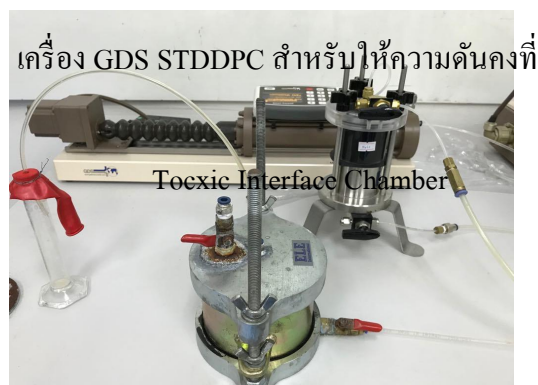
Δh = ผลต่างของความดันของน้ำเข้าและน้ำออก (cm)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินที่น้ำไหลผ่าน (cm^2)

t = เวลาที่น้ำไหลผ่าน (sec)



(a) สำหรับทดสอบด้วยน้ำ



(b) สำหรับทดสอบด้วยสารละลาย

ภาพที่ 3-7 ชุดทดสอบแบบผนังแข็งสำหรับทดสอบแบบความดันน้ำคงที่

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลาย จะวิเคราะห์ตามมาตรฐาน IS: 3025 (Part 32)—Reaffirmed 2003 โดยทำการปิเปตน้ำตัวอย่าง 20 mL เทใส่ขวดรูปชมพู่ จากนั้นเติม Potassium chromate indicator ลงไปในน้ำตัวอย่างปริมาณ 1 mL น้ำตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นสีเหลือง ทำการไตเตรตน้ำตัวอย่างด้วยสารละลาย silver nitrate จนกระทั่งน้ำตัวอย่างเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดงจึงสิ้นสุดการไตเตรต สูตรการคำนวณหาความเข้มข้น มีดังนี้

$$\text{Cl}^- (\text{mg/L}) = \frac{(V_S - V_B) \times \text{Normality} \times 35.45 \times 1000}{V_{\text{sample}}} \quad (3-2)$$

เมื่อ V_{sample} = ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการไตเตรต (mL)

V_S = ปริมาตรของสารละลาย silver nitrate ที่ใช้ในการไตเตรตน้ำตัวอย่าง (mL)

V_B = ปริมาตรของสารละลาย silver nitrate ที่ใช้ในการไตเตรตน้ำกลั่น (mL)

Normality = Normality ของสารละลาย silver nitrate

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient) และเวลาการไหลทะลุผ่าน (Breakthrough time) ของสารเคมีต่าง ๆ ภายใต้ปรากฏการณ์การพา (Advection) และการแพร่ (Diffusion)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและเวลาการไหลทะลุผ่าน สามารถหาได้จากการหาค่าความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายที่ไหลทะลุผ่านออกจากตัวอย่างดินที่เวลาใด ๆ (C_t) มาหารด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ของสารละลายเคมีที่ใช้ในการทดสอบ จะได้ค่าอัตราส่วน C_t/C_0 แล้วนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับเวลา และสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วน C_t/C_0 กับเวลาอีกกราฟ ซึ่งค่า C_t/C_0 นี้จะได้จากการคำนวณในสมการที่ 2-13 ซึ่งเป็นการลองผิดลองถูกค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมประสิทธิ์ที่ได้มาจำลองสภาพเงื่อนไขการใช้งานจริงในสนาม แล้วใช้สมการที่ 2-13 คำนวณค่าอัตราส่วน C/C_0 จากนั้นนำค่าอัตราส่วน C/C_0 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความลึกของชั้นกันซึมบดอัด จะได้เวลาการไหลทะลุผ่านของสารเคมี

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาความเป็นไปได้และปรับปรุงคุณภาพดินที่ถูกขุดลอกจากท่าเรือแหลมฉบัง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย สามารถแบ่งผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาคูสมบัติน้ำของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย
2. ผลการศึกษาคูสมบัติทางเคมีของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย
3. ผลการศึกษาคูสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย
4. ผลการสร้างกราฟแสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัด (Overall acceptable zone)
5. ผลการศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
6. ผลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและการคำนวณเวลาการไหลทะลุผ่านของสารเคมีต่าง ๆ ภายใต้ปรากฏการณ์การพาและการแพร่

ผลการศึกษาคุณสมบัติดัชนีของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย

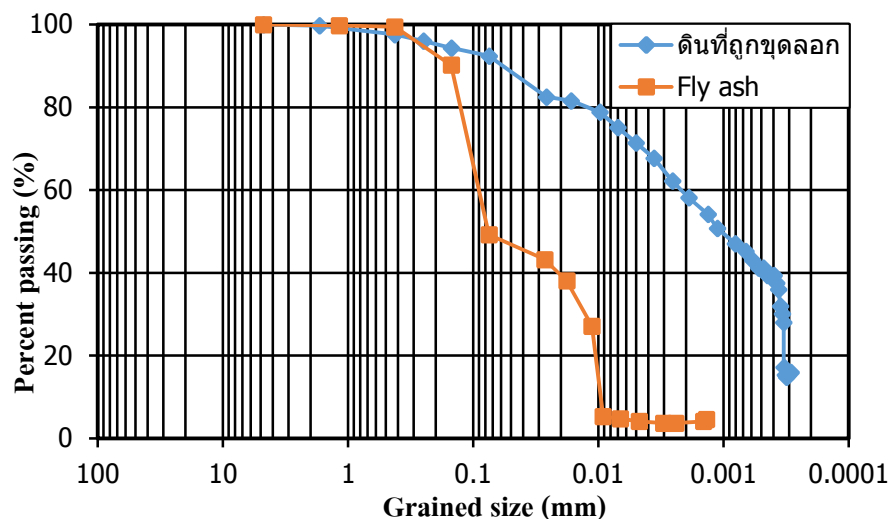
การศึกษาคูสมบัติน้ำของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย จัดอยู่ในแนวทางการวิจัยส่วนที่ 1 ประกอบด้วย การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) การทดสอบหาค่าขีดจำกัดแอตเตอร์เบิร์ก (Atterberg limit) ได้แก่ ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit) และค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index) การทดสอบหาขนาดคละของมวลดิน (Grain size analysis: Sieve wash) และการจำแนกชนิดดินตามมาตรฐาน Unified Soil Classification System, USCS (Soil classification) ผลการศึกษา ดังตารางที่ 4-1 พบว่า

ดินที่ถูกขุดลอก มีองค์ประกอบของเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว มีค่าขีดจำกัดเหลว เท่ากับ 54% ค่าขีดจำกัดพลาสติก เท่ากับ 25% และค่าดัชนีพลาสติก เท่ากับ 29% สามารถจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน Unified soil classification system (USCS) ได้เป็นดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง (high plasticity clay, CH) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดคละของดินที่ถูกขุดลอก ดังภาพที่ 4-1

เถ้าลอย ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน ลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ลักษณะการกระจายตัวของ ขนาดคละของเถ้าลอย ดังภาพที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย

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



ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวของขนาดคละของดินที่ถูกขุดลอกและเถ้าลอย

จากกราฟการกระจายตัวของขนาดคละ (Grain size distribution) ของดินตัวอย่าง ดังภาพที่ 4-1 พบว่า ดินที่ถูกขุดลอกและเฝ้าลอยมีปริมาณทราย (Sand content) เท่ากับ 10% และ 50% ตามลำดับ มีปริมาณตะกอนทราย (Silt content) เท่ากับ 35% และ 45% ตามลำดับ และมี ปริมาณดินเหนียว (Clay content) เท่ากับ 55% และ 5% ตามลำดับ

ค่าขีดจำกัดเหลว Benson et al. (1994) แนะนำว่าสำหรับดินที่ใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึม ควรจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20% เพราะดินที่มีค่าขีดจำกัดเหลวสูงจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำต่ำ และจากผลการทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลวของดินที่ถูกขุดลอก พบว่า มีค่า เท่ากับ 54% จึงมีความเป็นไปได้ว่าดินที่ถูกขุดลอกนี้มีคุณสมบัติในการซึมผ่านน้ำต่ำซึ่งเหมาะ สำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุกันซึมได้

สำหรับค่าดัชนีพลาสติก ตามข้อกำหนดของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐหรือ อีพีเอ (Environmental Protection Agency, EPA) และ Daniel (1993) แนะนำว่าดินที่ใช้เป็น วัสดุชั้นกันซึมควรจะต้องมีค่าดัชนีพลาสติกไม่น้อยกว่า 7-10% และไม่มากกว่า 30-40% เพราะถ้า ดินมีค่าดัชนีพลาสติกสูงมาก เมื่อแห้งดินจะเป็นก้อนแข็งและเมื่อเปียกดินจะเหนียวมากทำให้ การบดอัดในสนามทำได้ยาก จากผลการทดสอบหาค่าดัชนีพลาสติกของดินที่ถูกขุดลอก พบว่า มีค่าเท่ากับ 29% ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดจึงมีความเป็นไปได้ว่าดินที่ถูกขุดลอกเหมาะสำหรับ นำไปใช้เป็นวัสดุกันซึมได้

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินที่ถูกขุดลอกและเฝ้าลอย

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดินที่ถูกขุดลอกและเฝ้าลอย สามารถวิเคราะห์ โดยการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) โดยองค์ประกอบทางเคมีของดินที่ถูก ขุดลอกและเฝ้าลอย แสดงดังตารางที่ 4-2 พบว่าดินที่ถูกขุดลอกมีส่วนประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 เท่ากับ 63.56% และ 22.19% ตามลำดับ และเฝ้าลอย มีองค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4-2) $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 75.03% และ CaO เท่ากับ 13.72% สามารถจำแนกเป็นวัสดุพอซโซลานประเภท Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของดินที่ถูกขุดลอกและถ้ำลอย

องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)	ดินที่ถูกขุดลอก	ถ้ำลอย
SiO ₂	63.56	43.16
Al ₂ O ₃	22.19	20.55
Fe ₂ O ₃	3.67	11.32
K ₂ O	3.04	1.98
Na ₂ O	2.07	1.83
Cl	1.68	0.02
MgO	1.34	1.97
CaO	1.02	13.72
TiO ₂	0.80	0.48
SO ₃	0.25	4.37
P ₂ O ₅	0.07	0.21
MnO	0.03	0.07
SrO	0.01	0.06
BaO	0.04	0.10

ผลการศึกษาคูณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย

การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ทางวิศวกรรมของสัคส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกต่อถ้ำลอย จัดอยู่ในแนวทางการวิจัยส่วนที่ 2 ประกอบด้วย การทดสอบการบดอัดดิน 3 พลังงาน ได้แก่ การบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว และการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตร ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ ของสัคส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกต่อถ้ำลอย มีดังนี้

1. ผลการทดสอบการบดอัด (Compaction test)

การทดสอบการบดอัดดินจะใช้พลังงานในการบดอัด 3 พลังงาน ได้แก่ การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor, MP) แบบมาตรฐาน (Standard proctor, SP) และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน (Reduced proctor, RP) โดยแปรผันสัดส่วนผสมของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักรวมทั้งหมด โดยทำการบดอัดด้วยโมลมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร สูง 10.55 เซนติเมตร และมีปริมาตร 936.40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight, γ_{dry}) และปริมาณความชื้น (Water content, w) ดังตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-2

ผลการทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 พลังงาน แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นและบดอัดดินทางด้านแห้ง (Dry side) ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นถึงปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ดินจะมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด เรียกว่า ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry unit weight, $\gamma_{dry,max}$) หลังจากนั้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นอีกและบดอัดทางด้านเปียก (Wet side) ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของดินก็จะลดลง เนื่องจากน้ำแทรกตัวเข้าไปในอนุภาคของเม็ดดินทำให้ความหนาแน่นของดินลดลง

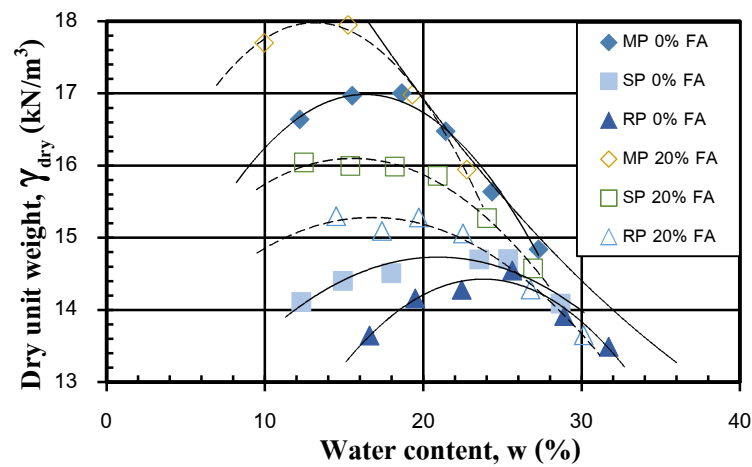
ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

พลังงาน การบด อัด	เถ้าลอย 0%		เถ้าลอย 20%	
	ปริมาณความชื้น w (%)	หน่วยน้ำหนักแห้ง γ_{dry} (kN/ m ²)	ปริมาณความชื้น w (%)	หน่วยน้ำหนักแห้ง γ_{dry} (kN/ m ²)
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

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

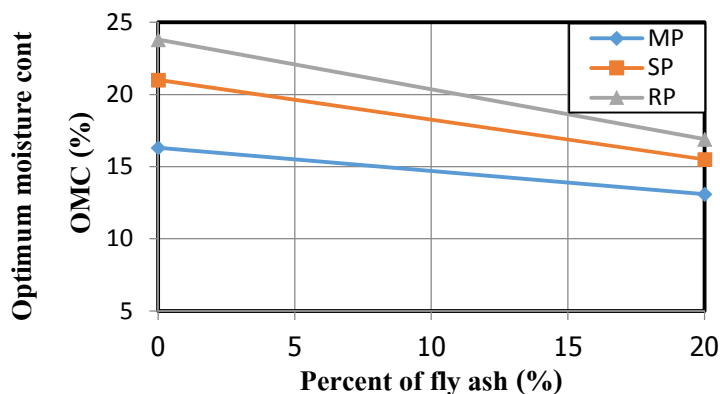
พลังงาน การบด อัด	เถ้าย 0%		เถ้าย 20%	
	ปริมาณความชื้น w (%)	หน่วยน้ำหนักแห้ง γ_{dry} (kN/ m ²)	ปริมาณความชื้น w (%)	หน่วยน้ำหนักแห้ง γ_{dry} (kN/ m ²)
SP	15 (OMC-6)	14.40	9.5 (OMC-6)	15.68
	18 (OMC-3)	14.64	12.5 (OMC-3)	16.00
	21 (OMC)	14.73	15.5 (OMC)	16.11
	24 (OMC+3)	14.66	18.5 (OMC+3)	16.00
	27 (OMC+6)	14.42	21.5 (OMC+6)	15.68
	17.8 (OMC-6)	13.88	10.9 (OMC-6)	14.95
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

หมายเหตุ MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน, RP=การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

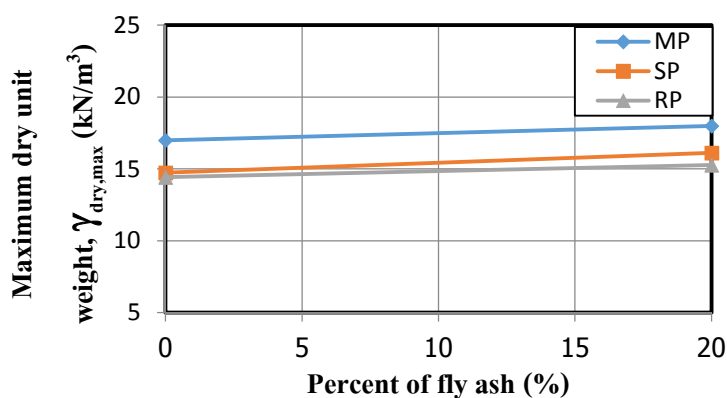


ภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แบบมาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากผลการทดสอบการบดอัดดินทั้ง 3 พลังงานของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักรวมทั้งหมด (ภาพที่ 4-2) พบว่าที่สัดส่วนผสมเถ้าลอย 0% ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 16.32–16.90 kN/ m³ และ 10.3–22.3% สำหรับการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน อยู่ระหว่าง 14.40–14.73 kN/ m³ และ 15–27% สำหรับการบดอัดดินแบบมาตรฐาน และอยู่ระหว่าง 13.88–14.42 kN/ m³ และ 17.8–29.8% สำหรับการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ และที่สัดส่วนผสมเถ้าลอย 20% ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 17.15–17.99 kN/ m³ และ 7.1–19.1% สำหรับการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน อยู่ระหว่าง 15.68–16.11 kN/ m³ และ 9.5–21.5% สำหรับการบดอัดดินแบบมาตรฐาน และอยู่ระหว่าง 14.95–15.28 kN/ m³ และ 10.9–22.9% สำหรับการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ตามลำดับ



(a) ผลของพลังงานการบดอัดและปริมาณเถ้าลอยอัดต่อค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม



(b) ผลของพลังงานการบดอัดและปริมาณเถ้าลอยต่อค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง

ภาพที่ 4-3 ผลกระทบของพลังงานการบดอัดดินและปริมาณเถ้าลอยต่อผลการทดสอบการบดอัด

จากการพิจารณาผลกระทบของพลังงานการบดอัดและปริมาณเถ้าลอยต่อค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ดังภาพที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานการบดอัดดินเพิ่มขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะลดลงทุกอัตราส่วนผสม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในส่วนผสมจาก 0% เป็น 20% จะทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นอนุภาคของตะกอน (Silt) ที่มีลักษณะกลมและมีความไม่เป็นพลาสติก

(Non-plastic) ในดินตัวอย่างจะทำให้แรงต้านทานในการเคลื่อนที่และการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินลดลง ส่งผลให้ต้องการปริมาณความชื้นสำหรับการจัดเรียงตัวของอนุภาคระหว่างกระบวนการบดอัดน้อยลงอนุภาคเม็ดดินสามารถเคลื่อนตัวชิดกันได้มากขึ้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างดินเพิ่มสูงขึ้น ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phani kumar and Sharma (2007); Phani kumar and Sharma (2004)

2. ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Hydraulic conductivity test)

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะดำเนินการทดสอบด้วยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ตามมาตรฐาน ASTM D2434-68 โดยใช้ Oedometer test โดยแปรผันสัดส่วนผสมของดินที่ถูกขุดลอกต่อถ้ำลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักแห้งรวมทั้งหมด และแปรผันระยะเวลาการบ่มที่ 0 7 และ 28 วัน เนื่องจากถ้ำลอยต้องการระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อพัฒนากำลึง ผลการทดสอบจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุดกับปริมาณความชื้น ดังตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-4

จากภาพที่ 4-4 พบว่า เมื่อพลังงานการบดอัดสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณถ้ำลอยต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ้ำลอยเข้าไปในสัดส่วนผสมที่ 20% ถ้ำลอย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน แต่ระยะเวลาการบ่มกลับไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของถ้ำลอยซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมเข้าไปอุดช่องว่างภายในอนุภาคของดินที่ถูกขุดลอก เมื่อทำการบดอัดจะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น การหดตัวและบวมตัวลดลง เป็นผลทำให้ดินมีความทึบน้ำมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินลดต่ำลง ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phani kumar and Sharma (2004); Bhuvaneshwari et al. (2005)

นอกจากนั้น พบว่าที่พลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกต่อถ้ำลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักแห้งรวมทั้งหมด ทุกหน่วยน้ำหนักแห้ง และทุกปริมาณความชื้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-9} m/s ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดที่ยอมรับได้สำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นกันซึมดินบดอัดของ Daniel and Benson (1990); Daniel and Wu (1993)

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

พลังงาน การบดอัด	เถ้าลอย 0%		เถ้าลอย 20%					
	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
			ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ 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}

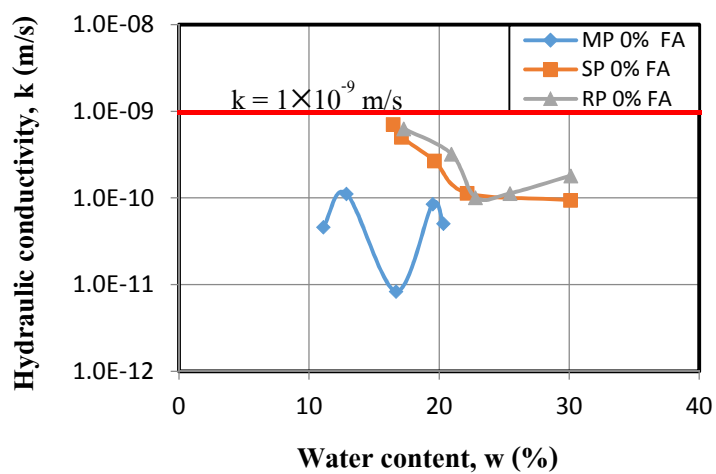
ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

พลังงาน การบดอัด	เถ้าลอย 0%		เถ้าลอย 20%					
	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ระยะเวลาบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาบ่ม 28 วัน	
			ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)
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}

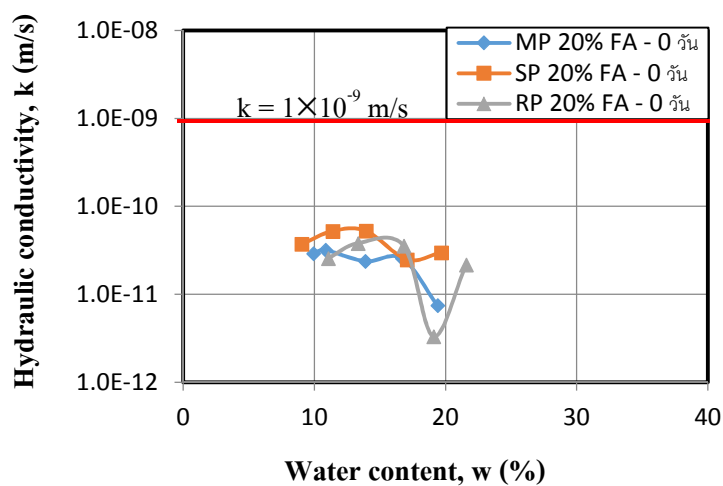
ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

พลังงาน การบดอัด	เถ้าลอย 0%		เถ้าลอย 20%					
	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ระยะเวลาบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาบ่ม 28 วัน	
			ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่า สัมประสิทธิ์ การซึมผ่าน ของน้ำ k (m/s)
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}

หมายเหตุ MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน, RP=การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

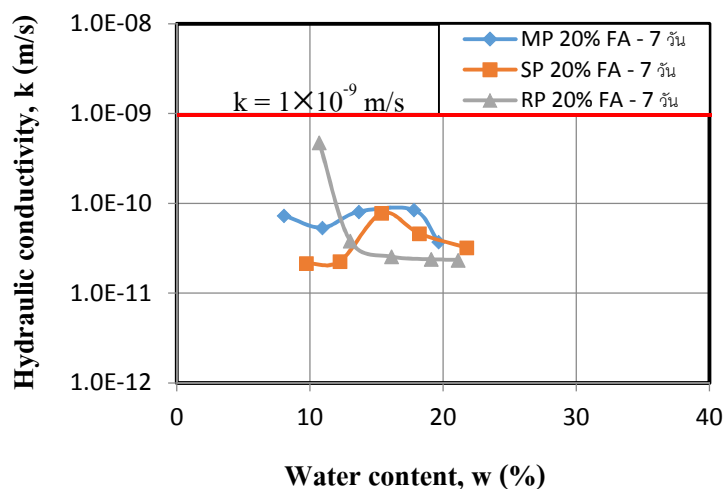


(a) ใ้ลลอย 0% ระยยะเวลลอบ่ม 0 วัน

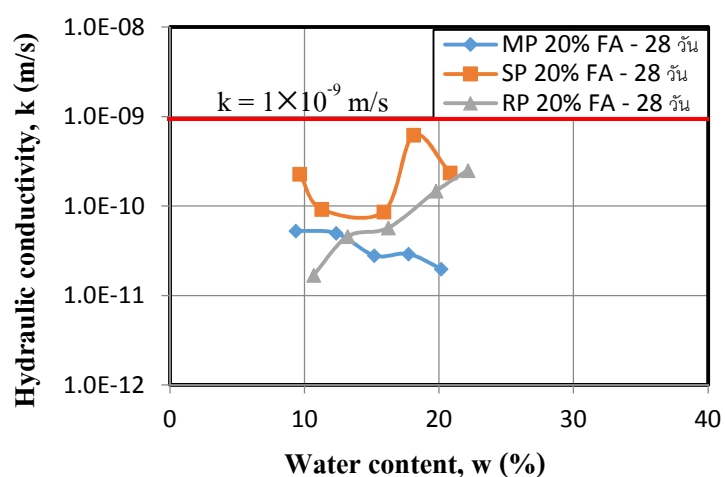


(b) ใ้ลลอย 20% ระยยะเวลลลการบ่ม 0 วัน

ภาพที่ 4-4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกต่อใ้ลลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ



(c) ใ้ลลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



(d) ใ้ลลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4-4 (ต่อ)

3. ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compression test)

การทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวจะกระทำโดยการบดอัดตัวอย่างดินด้วยพลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน โดยตัวอย่างดินจะถูกเตรียมที่หน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันประมาณ 5 ตัวอย่าง นั่นคือ ที่ด้านเปียกของปริมาณความชื้นและด้านแห้งของปริมาณความชื้น โดยแปรผันสัดส่วนผสมของดินที่ถูกขุดลอกต่อใ้ลลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักรวมทั้งหมด และแปรผันระยะเวลาการบ่มที่ 0 7 และ 28 วัน บดอัดในกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร หลังจากนั้นคั่นตัวอย่างดินออกจากกระบอก และใ้แรงกด

ในแนวตั้งกับแท่งตัวอย่างดิน โดยปราศจากแรงดันด้านข้าง จนกระทั่งแท่งตัวอย่างดินวิบัติ แล้วนำค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด ซึ่งความเค้นที่ได้นี้จะเรียกว่า Unconfined compression strength (q_u) ตามมาตรฐาน ASTM D2166 ผลการทดสอบจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียวกับปริมาณความชื้น ดังตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-5

จากผลการทดสอบ ดังภาพที่ 4-5 แสดงผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0% และ 20% ที่ระยะเวลาการบ่ม 0 7 และ 28 วัน พบว่า เมื่อพลังงานการบดอัดสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในสัดส่วนผสมเถ้าลอย 20% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน แต่ระยะเวลาการบ่มกลับไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมเข้าไปอุดช่องว่างภายในอนุภาคของดินที่ถูกขุดลอกเมื่อทำการบดอัดจะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น การหดตัวและบวมตัวลดลง เป็นผลทำให้ดินมีความที่บวมมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินลดลง ทั้งนี้ที่พลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักแห้งรวม ทุกหน่วยน้ำหนักแห้งและทุกปริมาณความชื้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำกว่า 1×10^{-9} m/s ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นกันซึมดินบดอัดของ และผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pandian et al. (2002); Nalbantoglu (2004)

Daniel and Benson (1990); Daniel and Wu (1993) ได้กำหนดไว้ว่าสำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมนั้นจะต้องมีค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 200 kPa จากผลการทดสอบ พบว่าที่พลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน ที่ระยะเวลาการบ่ม 0 วันค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักแห้งรวมทั้งหมด เกือบทุกหน่วยน้ำหนักแห้งและเกือบทุกปริมาณความชื้นจะให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 200 kPa และมีเพียงบางส่วนทางด้านแห้งและด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มมากขึ้นเถ้าลอยยังพัฒนากำลังสูงขึ้นส่งผลทำให้ทุกหน่วยน้ำหนักแห้งและทุกปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่ามากขึ้นทั้ง 3 พลังงานการบดอัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สัดส่วนผสม 20% เถ้าลอย ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึม เพราะแม้กระทั่งที่พลังงานการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐานซึ่งถือว่าเป็นพลังงานน้อยที่สุดในสนามยังสามารถให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่เป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนดนั่นเอง

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่อุณหภูมิต่อสมถ์ล่อยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

พลังงาน การบดอัด	ถ้ำล่อย 0%		ถ้ำล่อย 20%					
	ปริมาณความชื้น w* (%)	ค่ากำลังอัด แกนเดี่ยว q _u (kPa)	ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
			ปริมาณความชื้น w* (%)	ค่ากำลังอัด แกนเดี่ยว q _u (kPa)	ปริมาณความชื้น w* (%)	ค่ากำลังอัด แกนเดี่ยว q _u (kPa)	ปริมาณความชื้น w* (%)	ค่ากำลังอัด แกนเดี่ยว 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

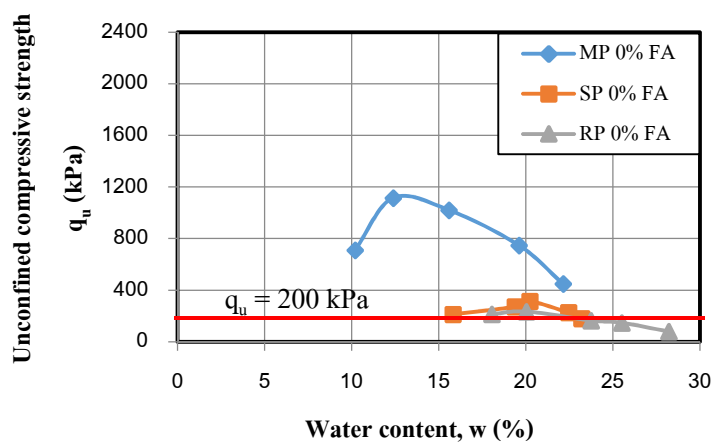
ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

พลังงาน การบดอัด	เถาลอย 0%		เถาลอย 20%					
			ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
	ปริมาณความชื้น	ค่ากำลังอัด	ปริมาณความชื้น	ค่ากำลังอัด	ปริมาณความชื้น	ค่ากำลังอัด	ปริมาณความชื้น	ค่ากำลังอัด
	w* (%)	แกนเดี่ยว q _u (kPa)	w* (%)	แกนเดี่ยว q _u (kPa)	w* (%)	แกนเดี่ยว q _u (kPa)	w* (%)	แกนเดี่ยว q _u (kPa)
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**

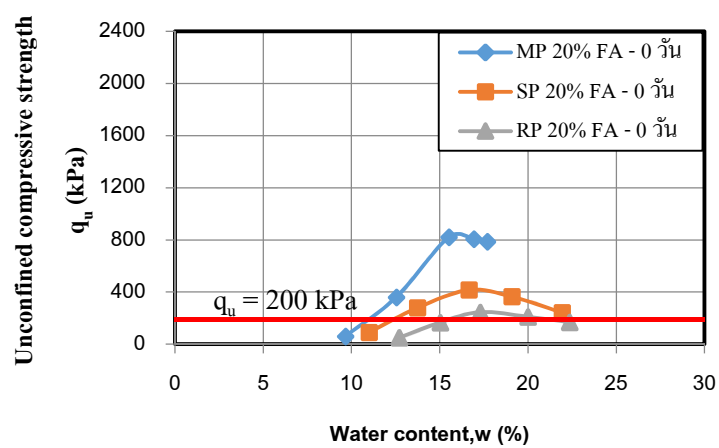
หมายเหตุ MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน, RP=การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

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

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

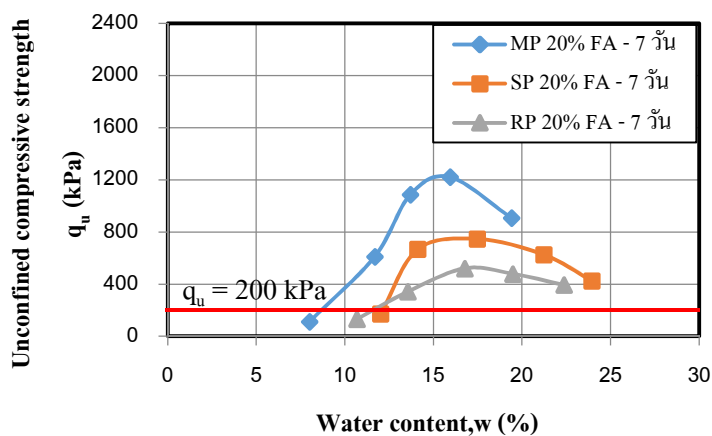


(a) เถ้าลอย 0% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน

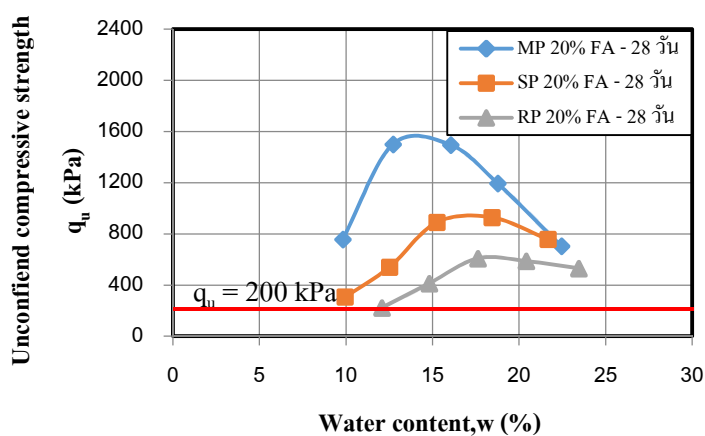


(b) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน

ภาพที่ 4-5 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดแกนเดียวของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ



(c) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



(d) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 4-5 (ต่อ)

4. ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage test)

การทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตร เป็นการหดตัวที่เกิดจากการสูญเสียความชื้น เนื่องจากอุณหภูมิ ส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าว การแบ่งแยก และเกิดความไม่ต่อเนื่องของวัสดุ ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างของมวลดิน หากมีน้ำชะขยะซึมผ่านระหว่างรอยแตกร้าวดังกล่าว จะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ การหดตัวจะเกิดขึ้นในดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกสูง และตัวอย่างดินที่ถูกบดอัดที่ปริมาณความชื้นสูง ๆ

ตามแนวทางการวิจัยของ Daniel and Wu (1993) จะกระทำการทดสอบโดยบดอัดตัวอย่างดินด้วยพลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงาน โดยตัวอย่างดินจะถูกเตรียมที่หน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันประมาณ 5 ตัวอย่าง นั่นคือ ที่ด้านเปียกและด้านแห้งของปริมาณความชื้นที่เหมาะสม โดยแปรผันสัดส่วนผสมของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่ 0% และ 20% โดยน้ำหนักรวมทั้งหมด จากนั้นดันตัวอย่างดินออกจากกระบอกอัดแล้ววางทิ้งไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกและควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่างดินทุก ๆ 12 ชั่วโมงจนกระทั่งตัวอย่างมีปริมาตรคงที่ ผลการทดสอบจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงปริมาตรกับปริมาณความชื้น ดังตารางที่ 4-6 และภาพที่ 4-6

จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรก็จะเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรไม่ขึ้นอยู่กับพลังงานการบดอัด โดยที่ปริมาณความชื้นสูงขึ้นค่าการหดตัวเชิงปริมาตรก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่สัดส่วนผสม 0% เถ้าลอย จะมีเพียงทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของชั้นกันซึม คือ ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่า 4% ส่วนการบดอัดแบบมาตรฐานและแบบต่ำกว่ามาตรฐาน ทุกปริมาณความชื้นจะมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมากกว่า 4% ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในส่วนผสมโดยไม่คำนึงถึงระยะเวลาการบ่มก็จะส่งผลทำให้ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรลดลง ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4-5(a) และ 4-5(b) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเข้าไปในสัดส่วนผสมที่ 20% เถ้าลอย ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะลดลงเป็น 5.26% ซึ่งจะลดลงเกือบครึ่งหนึ่งอย่างชัดเจนและผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมากขึ้น (ภาพที่ 4-6(c) และ 4-6(d)) เกือบทุกหน่วยน้ำหนักแห้งและเกือบทุกปริมาณความชื้นของพลังงานการบดอัดทั้ง 3 พลังงานจะให้ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมีค่าน้อยกว่า 4% แต่มีเพียงบางส่วนทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเท่านั้นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนด เนื่องจากอนุภาคของดินที่ถูกขุดลอกถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กของตะกอน (Silt) ที่มีลักษณะกลมและมีความไม่เป็นพลาสติก (Non-plastic) ส่งผลให้พฤติกรรมการบวมตัวลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีส่วนประกอบของออกไซด์ซิลิกาและอลูมินาแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งช่วยให้อนุภาคดินจัดเรียงตัวแบบระเกะระกะด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (Cokca, 2001) พื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง ทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคดินมีค่าน้อยลง และคุณสมบัติในการช่วยยึดประสานจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะช่วยในการยับยั้งการบวมตัวและหดตัว

ของดินส่งผลให้ค่าการบวมตัวลดลง ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phani kumar and Sharma (2004); Nalbantoglu (2004); Bhuvaneshwari et al. (2005); Phani kumar and Sharma (2007); Mir and Sridharan (2013) เป็นต้น

สำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมได้นั้น Daniel and Benson (1990); Daniel and Wu (1993) ได้กำหนดไว้ว่าจะต้องมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรน้อยกว่า 4% จากผลการทดสอบ ที่ 0% etailoyจะมีเพียงทางด้านหนึ่งของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเท่านั้นที่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนด ขณะที่เพิ่มปริมาณetailoyเข้าไปในสัดส่วนผสมที่ 10% และ 20% etailoy โดยไม่คำนึงถึงระยะเวลาการบ่ม ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรจะลดลงเกือบครึ่งหนึ่งอย่างชัดเจนตามปริมาณetailoyที่เพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของทั้ง 3 พลังงานการบดอัดก็จะลดลงและผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมากขึ้นอย่างชัดเจน แต่จะมีเพียงบางส่วนทางด้านเปียกเท่านั้นที่ไม่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนด ดังนั้นที่สัดส่วนผสม 20% etailoy ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน จัดว่ามีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมมากที่สุด

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

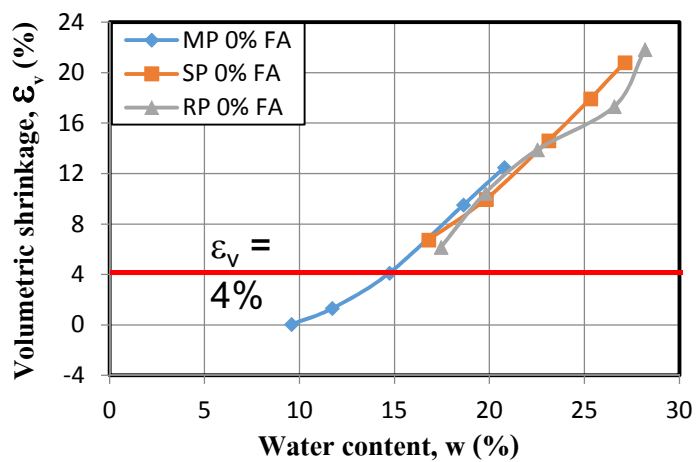
พลังงาน การบดอัด	เถ้าลอย 0%		เถ้าลอย 20%					
			ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)
MP	9.57 (OMC-6)	0.04	6.59 (OMC-6)	-2.41	7.87 (OMC-6)	-1.26	6.63 (OMC-6)	-1.29
	11.72 (OMC-3)	1.31	8.60 (OMC-3)	-0.60	11.53 (OMC-3)	1.76	9.66 (OMC-3)	0.96
	14.73 (OMC)	4.11	12.01 (OMC)	2.51	13.40 (OMC)	3.54	13.06 (OMC)	2.34
	18.62 (OMC+3)	9.51	14.51 (OMC+3)	4.30	16.58 (OMC+3)	5.83	16.00 (OMC+3)	2.89
	20.78 (OMC+6)	12.47	17.90 (OMC+6)	5.26	19.77 (OMC+6)	7.53	18.80 (OMC+6)	4.45
	16.79 (OMC-6)	6.74	9.34 (OMC-6)	-0.99	9.83 (OMC-6)	0.31	9.84 (OMC-6)	0.18
SP	19.82 (OMC-3)	9.98	11.74 (OMC-3)	0.07	13.63 (OMC-3)	2.95	12.36 (OMC-3)	2.26
	23.11 (OMC)	14.62	14.85 (OMC)	2.79	15.64 (OMC)	4.73	15.40 (OMC)	2.64
	25.32 (OMC+3)	17.95	17.77 (OMC+3)	5.22	18.86 (OMC+3)	6.51	18.11 (OMC+3)	3.40
	27.12 (OMC+6)	20.80	21.11 (OMC+6)	7.64	21.93 (OMC+6)	8.37	21.66 (OMC+6)	5.22

ตารางที่ 4-6 (ต่อ)

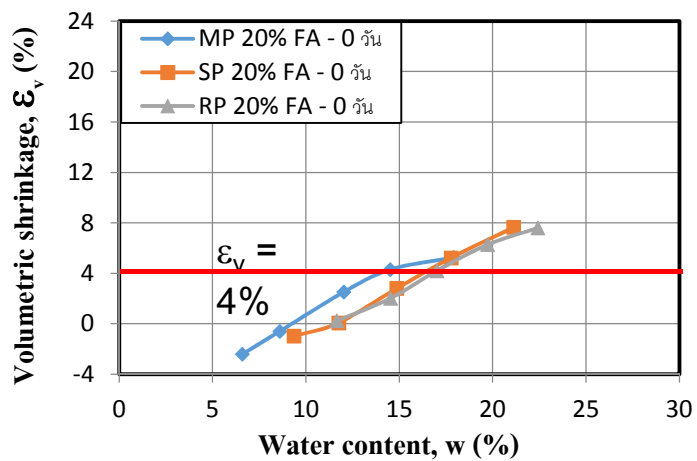
พลังงาน การบด อัด	เถาลอย 0%		เถาลอย 20%					
			ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน		ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	
	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหด ตัวเชิง ปริมาตร ϵ_v (%)	ปริมาณความชื้น w (%)	ค่าการหดตัว เชิงปริมาตร ϵ_v (%)
	17.45 (OMC-6)	6.17	11.65 (OMC-6)	0.23	12.04 (OMC-6)	2.02	11.17 (OMC-6)	1.97
	19.78 (OMC-3)	10.46	14.53 (OMC-3)	2.02	14.42 (OMC-3)	3.28	14.09 (OMC-3)	2.22
RP	22.53 (OMC)	13.90	17.02 (OMC)	4.21	17.25 (OMC)	5.20	17.39 (OMC)	3.55
	26.57 (OMC+3)	17.32	19.71 (OMC+3)	6.27	20.67 (OMC+3)	7.21	20.06 (OMC+3)	4.66
	28.19 (OMC+6)	21.86	22.41 (OMC+6)	7.60	23.51 (OMC+6)	9.37	22.39 (OMC+6)	6.00

หมายเหตุ MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน, RP=การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

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

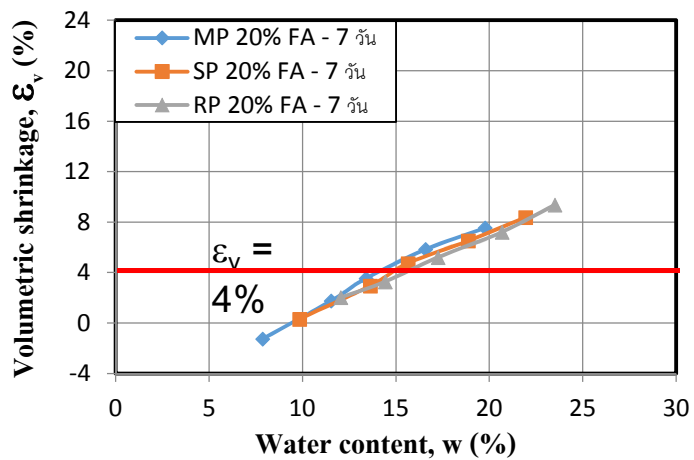


(a) เถ้าลอย 0% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน

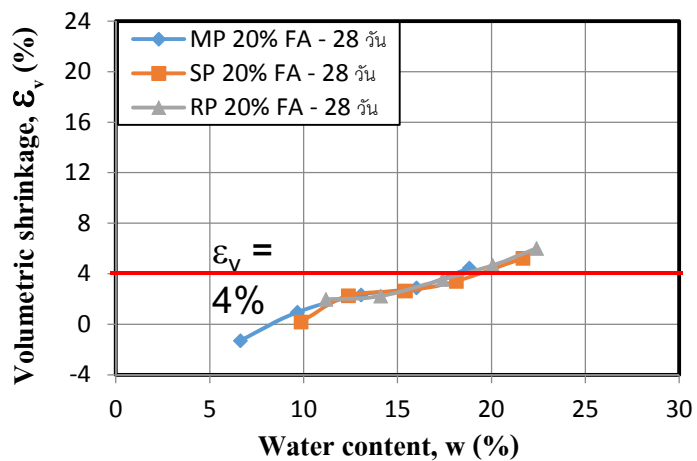


(b) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 0 วัน

ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ



(c) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน



(d) เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

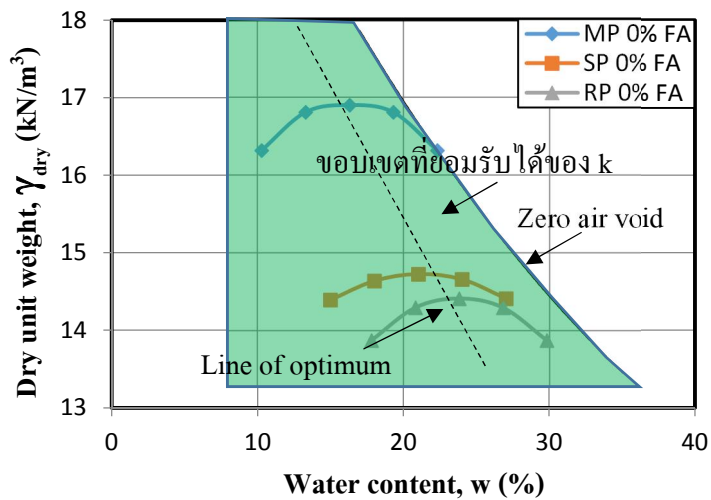
ภาพที่ 4-6 (ต่อ)

ผลการศึกษาการประเมินความเหมาะสมของขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึม บดอัด (Overall acceptable zone)

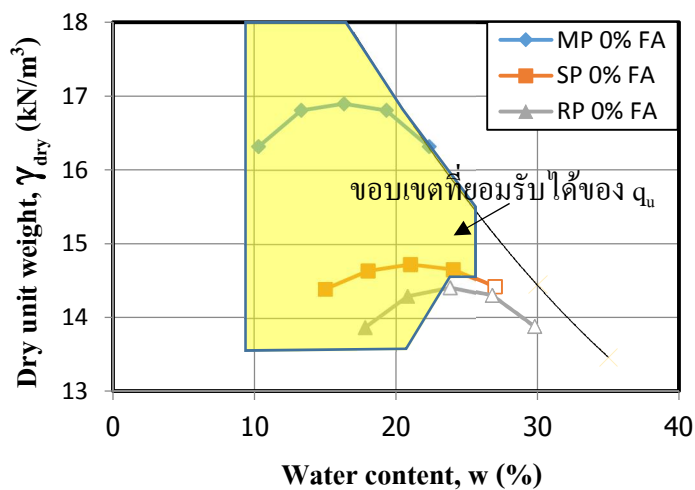
Daniel and Benson (1990); Daniel and Wu (1993) ได้กำหนดขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด ภายใต้ข้อกำหนดของ 3 คุณสมบัติที่สำคัญ คือ 1) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุดต้องน้อยกว่า 1×10^{-9} m/s 2) ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว ต้องไม่น้อยกว่า 200 kPa และ 3) ค่าการหดตัวเชิงปริมาตร ต้องมีค่าไม่เกิน 4% การประเมินความเหมาะสมสามารถทำได้โดยการนำพื้นที่ผลการทดสอบต่าง ๆ ที่ผ่านข้อกำหนดมาซ้อนทับกัน และพื้นที่ที่ยอมรับได้สามารถซ้อนทับกัน คือขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด ผลการประเมินความเหมาะสม มีดังนี้

1. ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย 0%

หลังจากทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอยที่ 0% เสร็จแล้ว การประเมินความเหมาะสมของขอบเขตที่ยอมรับได้สามารถทำได้โดยนำผลการทดสอบต่าง ๆ ดังกล่าวมาวาดกราฟการบดอัดใหม่ โดยใช้สัญลักษณ์แบบทึบสำหรับตัวอย่างที่มีผลการทดสอบผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีผลการทดสอบไม่ผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด พื้นที่ที่แรเงาในภาพที่ 4-7(a) 4-7(b) และ 4-7(c) แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร ตามลำดับ จากนั้นนำขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมาซ้อนทับกัน บริเวณที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งสามรูปซ้อนทับกัน คือขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอยที่ 0% ดังภาพที่ 4-7(d)

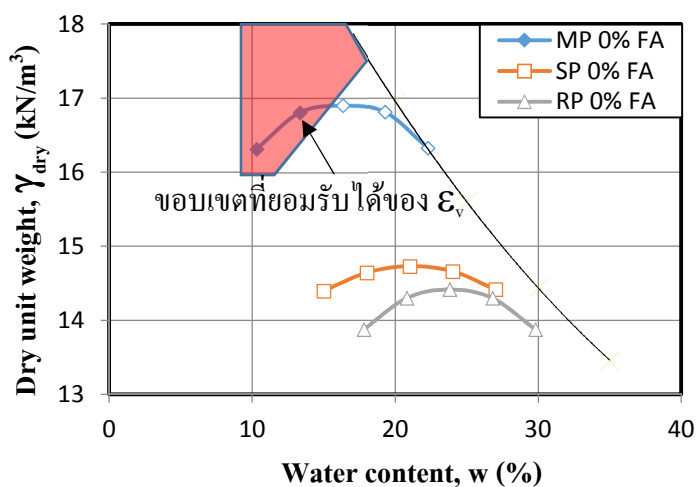


(a) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

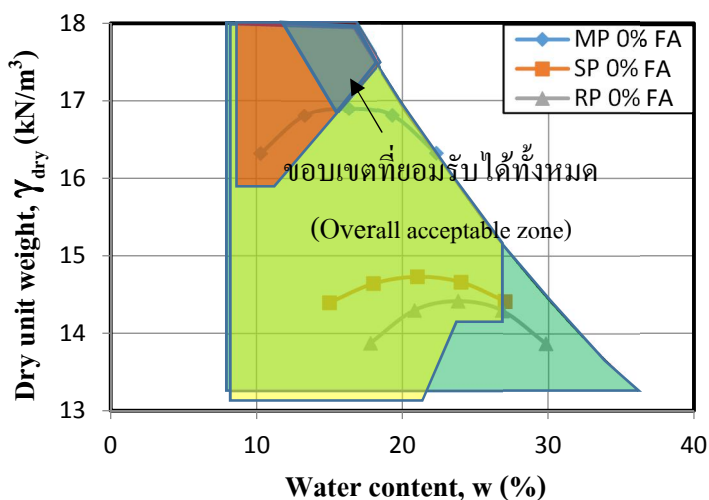


(b) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว

ภาพที่ 4-7 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของอัตราส่วนดินที่ถูกขูดลอกผสมแก้ลอย 0%



(c) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร



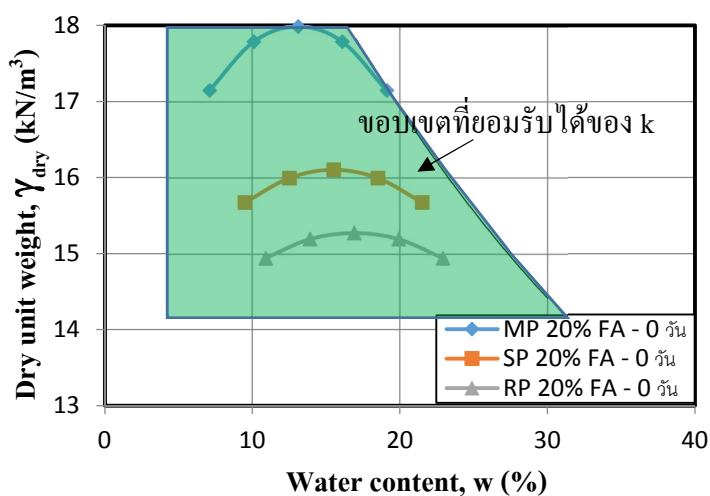
(d) ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด

ภาพที่ 4-7 (ต่อ)

2. ขอบเขตที่ยอมรับได้ของสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20%

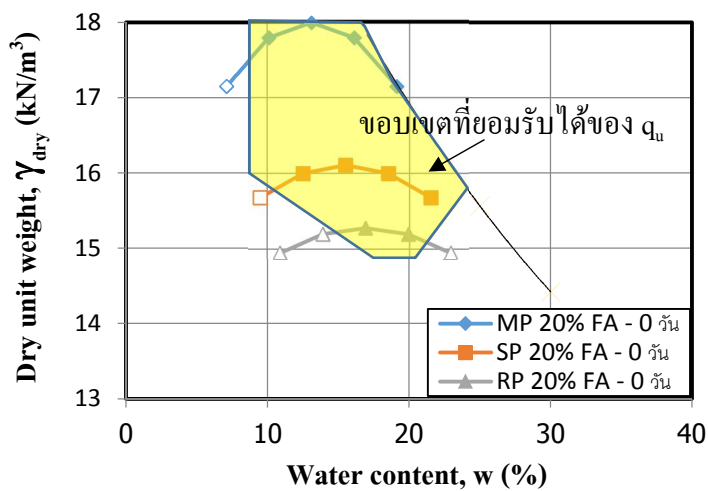
หลังจากทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 0 7 และ 28 วันเสร็จแล้ว นำผลการทดสอบต่าง ๆ ดังกล่าวมาวาดกราฟการบดอัดใหม่ โดยใช้สัญลักษณ์แบบที่บสำหรับตัวอย่างที่มีผลการทดสอบผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด และใช้สัญลักษณ์แบบโปร่งสำหรับตัวอย่างที่มีผลการทดสอบไม่ผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของ

ชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด พื้นที่ที่แรงภายในภาพที่ 4-8(a) 4-8(b) และ 4-8(c) แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน พื้นที่ที่แรงภายในภาพที่ 4-9(a) 4-9(b) และ 4-9(c) แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และพื้นที่ที่แรงภายในภาพที่ 4-10(a) 4-10(b) และ 4-10(c) แสดงขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันตามลำดับ จากนั้นนำขอบเขตที่ยอมรับได้ภายใต้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ค่ากำลังอัดแกนเดียว และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรมาซ้อนทับกัน บริเวณที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งสามรูปซ้อนทับกัน คือ ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยที่ 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 0 7 และ 28 วัน ดังภาพที่ 4-8(d) 4-9(d) และ 4-10(d) ตามลำดับ

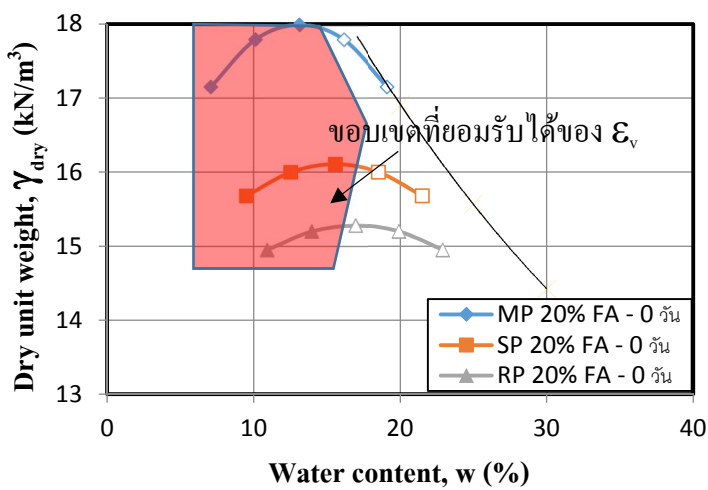


(a) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ภาพที่ 4-8 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 0 วัน

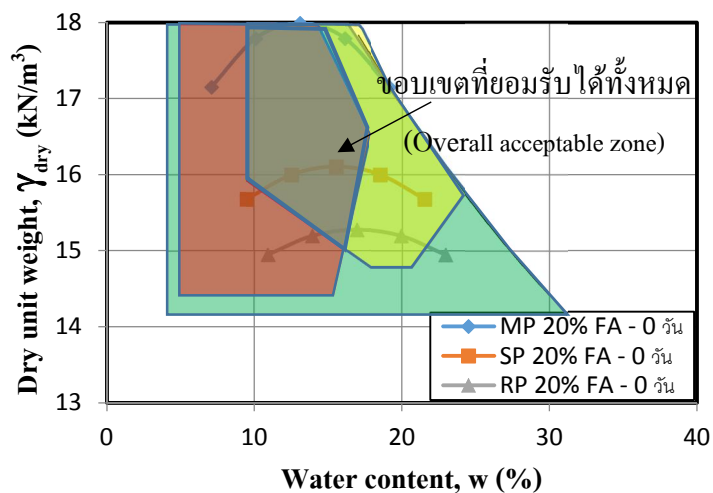


(b) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว



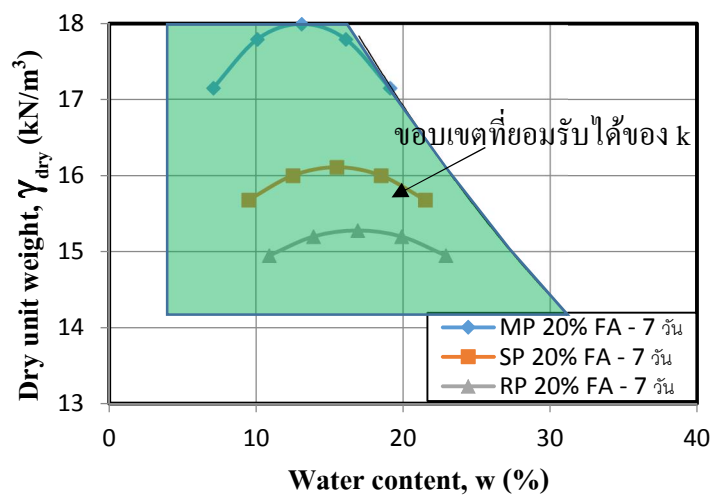
(c) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร

ภาพที่ 4-8 (ต่อ)



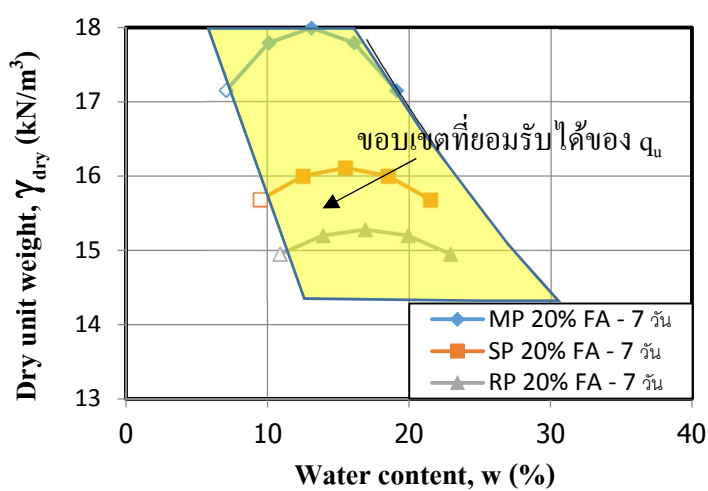
(d) ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด

ภาพที่ 4-8 (ต่อ)

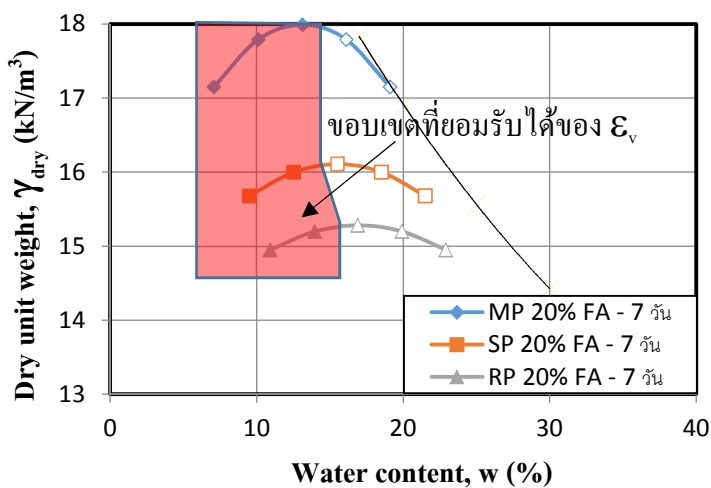


(a) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ภาพที่ 4-9 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

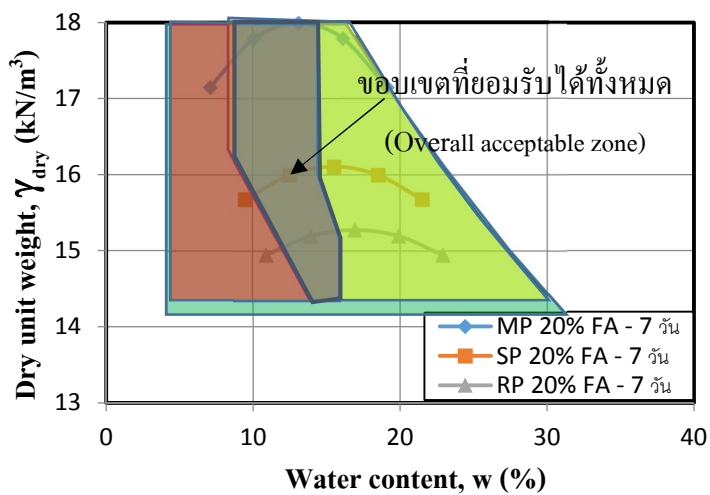


(b) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว



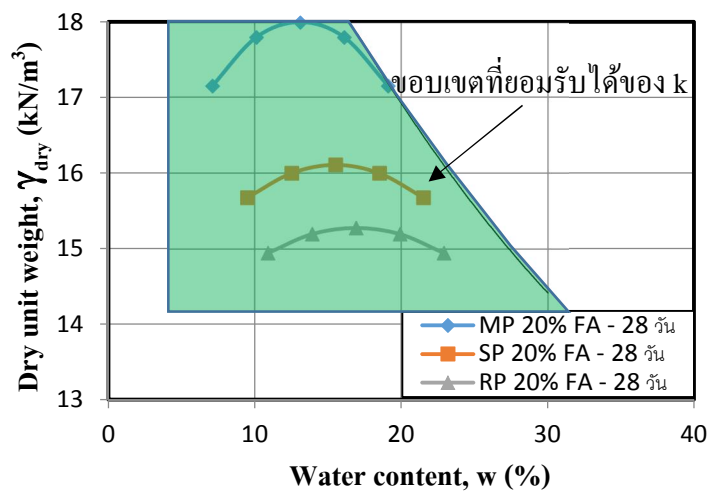
(c) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร

ภาพที่ 4-9 (ต่อ)



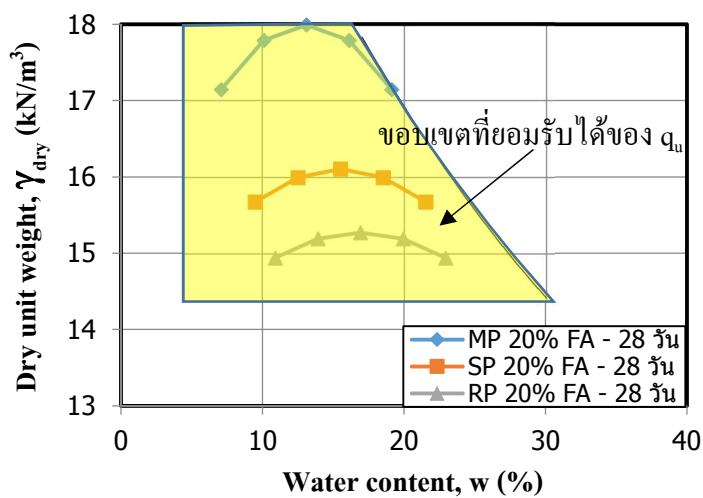
(d) ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด

ภาพที่ 4-9 (ต่อ)

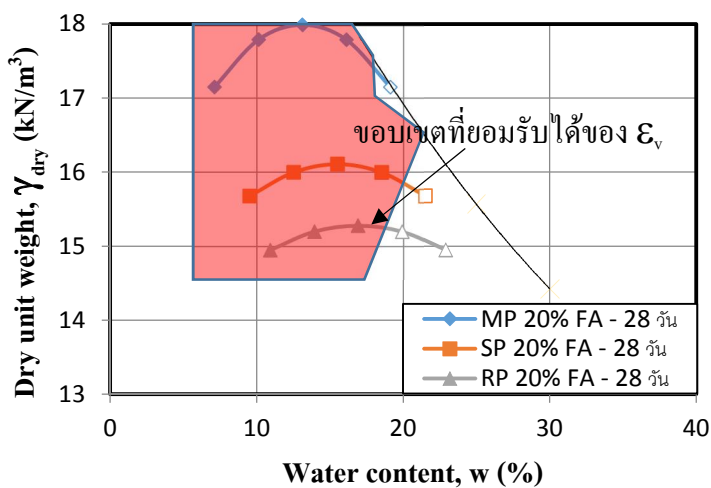


(a) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ภาพที่ 4-10 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

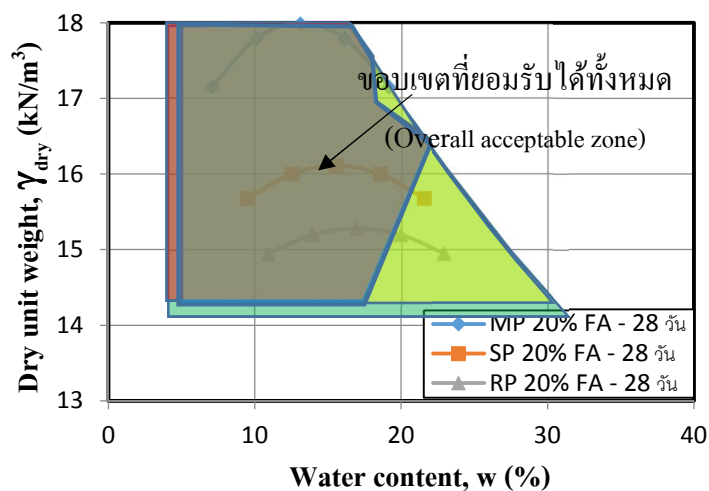


(b) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่ากำลังอัดแกนเดียว



(c) ขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าการหดตัวเชิงปริมาตร

ภาพที่ 4-10 (ต่อ)

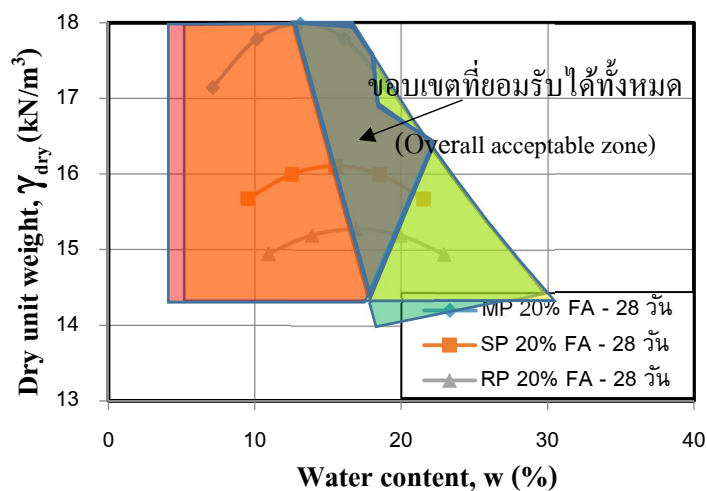


(d) ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมด

ภาพที่ 4-10 (ต่อ)

จากผลการประเมินความเหมาะสมขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัด ดังภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-10 พบว่า ขอบเขตที่ยอมรับได้ทั้งหมดของดินที่ถูกขุดลอก (ถ้ำลอย 0%) มีพื้นที่ค่อนข้างเล็ก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ้ำลอยเข้าไปในอัตราส่วนผสม กลับพบว่าพื้นที่ขยายใหญ่ขึ้นและมีแนวโน้มในการใช้งานมากขึ้น และเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน พบว่าพื้นที่ที่ยอมรับได้มีพื้นที่ขยายใหญ่ที่สุด นั่นแสดงให้เห็นว่าดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ โดยอัตราส่วนของดินที่ถูกขุดลอกต่อถ้ำลอยที่เหมาะสมที่สุด คือ 80 : 20 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

แต่อย่างไรก็ตาม Benson et al. (1999) แนะนำว่าในทางปฏิบัติการบดอัดดินทางด้านข้างของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมส่วนใหญ่สามารถทำได้ยากและมักให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมากกว่า 1×10^{-9} m/s ดังนั้นหากนำไปใช้งานจริงในสนามควรบดอัดดินที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมหรือทางด้านเปียกของปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจึงจะเหมาะสมที่สุด ดังนั้นขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดก็จะถูกปรับแก้ใหม่ ดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-11 ขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินกันซึมบดอัดที่ถูกปรับแก้ตามคำแนะนำของ Benson et al. (1999) (เถ้าลอย 20% ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน)

ผลการศึกษาผลกระทบของสารเคมีในน้ำชะขยะต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ สัดส่วนผสมต่าง ๆ

จากผลการประเมินความเหมาะสมของขอบเขตที่ยอมรับได้ของชั้นดินเหนียวกันซึม บดอัดดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จะทำการพิจารณาเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมเป็นชั้นวัสดุกันซึม 3 อันดับ ได้แก่ อัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 0% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน อัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่า มาตรฐานและอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัด แบบมาตรฐาน ตามลำดับ โดยแต่ละอัตราส่วนที่เลือกนั้นจะทำการซึมผ่านด้วยสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อศึกษาผลกระทบของสารเคมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ดังนี้

1. ผลกระทบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่ สัดส่วนผสมต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมได้แล้ว คือ อัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสม เถ้าลอย 0% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน อัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสม เถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน จะทำการศึกษาผลกระทบ

ของสารเคมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ โดยการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนี้ จะใช้เครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D 2434-68 โดยบดอัดดินลงใน โมล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.14 เซนติเมตร สูง 6.05 เซนติเมตร และใช้วิธีการทดสอบแบบความดัน น้ำคงที่ ที่ 300 kPa สำหรับสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอย 0% 20 kPa สำหรับสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอย 20% ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และ 10 kPa สำหรับสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอย 20% ด้วยพลังงานการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน โดยกำหนดทิศทางการไหลของน้ำและสารละลายผ่านตัวอย่างจากด้านล่างขึ้นด้านบนเพื่อกำจัด ฟองอากาศออกจากตัวอย่างดิน หลังจากนั้นทำการซึมผ่านด้วยน้ำ พร้อมทั้งวัดปริมาณน้ำออกทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งปริมาณน้ำออกได้น้อยประมาณ 2-3 pore volume และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำคงที่ติดต่อกันประมาณ 4-5 ค่า แล้วจึงเปลี่ยนจากการซึมผ่านด้วยน้ำเป็นการซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ทำการวัดปริมาณสารละลายที่ ออกจากตัวอย่างดินทุก ๆ 25 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายต่อไป ทำการซึมผ่านจนกระทั่งสารละลายซึมผ่านตัวอย่างดินได้น้อย 3 pore volume และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายคงที่ติดต่อกัน 4-5 ค่า จึงหยุดการทดสอบ นำผลการทดสอบที่ได้มาจากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับเวลาดังตารางที่ 4-7 และภาพที่ 4-12

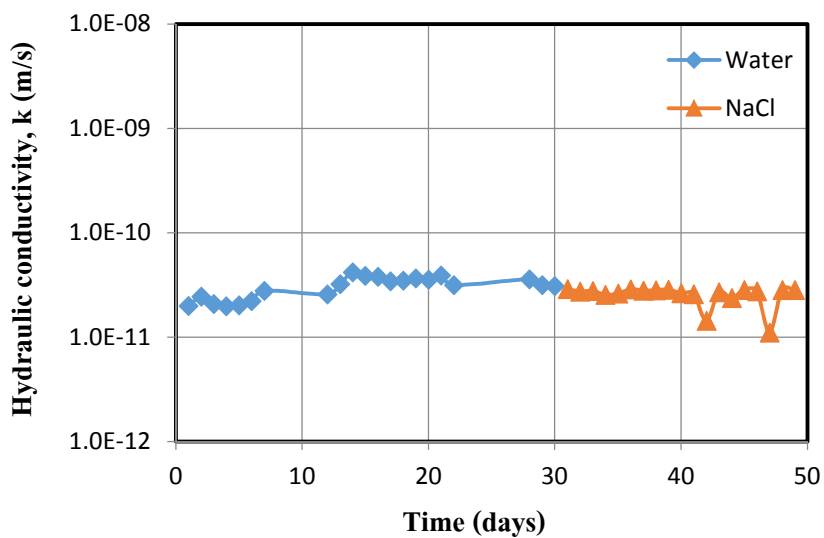
ตารางที่ 4-7 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

พลังงานการบดอัด	แฉะลอย 0% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน		แฉะลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน	
	k_w (m/ s)	k_{NaCl} (m/ s)	k_w (m/ s)	k_{NaCl} (m/ s)
MP	3.06×10^{-11}	2.59×10^{-11}	1.67×10^{-9}	1.86×10^{-9}
SP	-	-	3.26×10^{-8}	2.66×10^{-8}

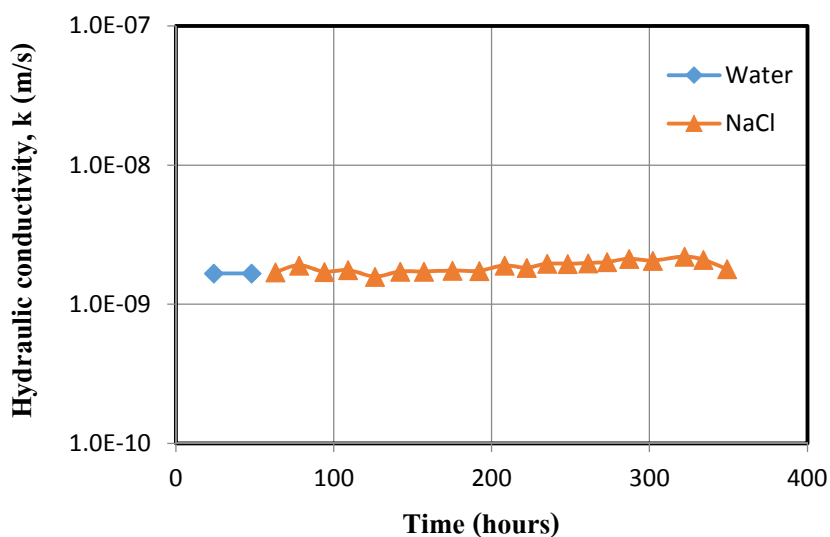
หมายเหตุ MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน

k_w = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยเฉลี่ย

k_{NaCl} = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์โดยเฉลี่ย

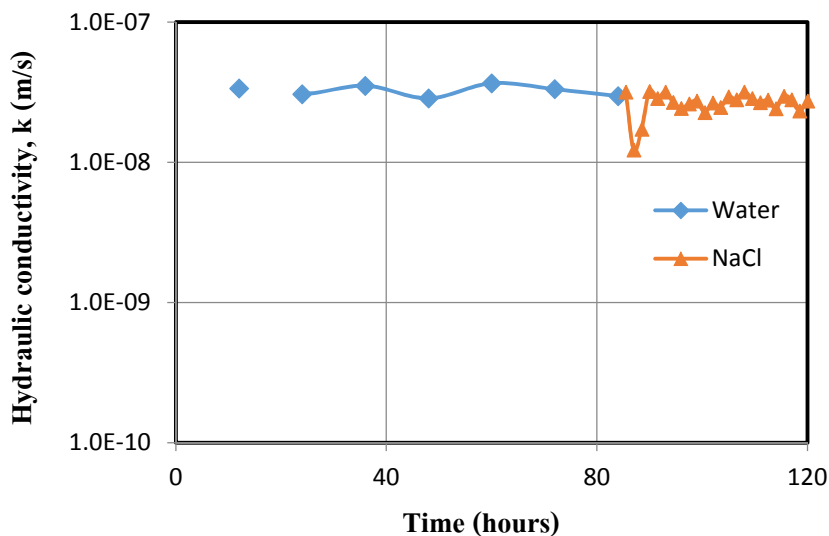


(a) ใถ้ลอย 0% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



(b) ใถ้ลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ภาพที่ 4-12 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมใถ้ลอยที่สัดส่วนต่างๆ ที่
 ซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์



(c) etailoy 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

ภาพที่ 4-12 (ต่อ)

จากผลการทดสอบ ดังภาพที่ 4-12 เมื่อพิจารณาผลกระทบของพลังงานการบดอัดและปริมาณetailoyต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานการบดอัดสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อปริมาณetailoyเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานการบดอัดสูงขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ตัวอย่างดินมีความทึบน้ำมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจึงลดต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณetailoyเข้าไปในสัดส่วนผสมกลับทำให้ตัวอย่างดินมีความพรุนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจึงเพิ่มขึ้น

โดยผลการทดสอบที่สัดส่วนผสมของดินที่ถูกขุดลอกผสมetailoy 0% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อซึมผ่านด้วยน้ำค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.06×10^{-11} m/s และเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 โมลาร์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.59×10^{-11} m/s ที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมetailoy 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อซึมผ่านด้วยน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.67×10^{-9} m/s และเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.86×10^{-9} m/s และที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมetailoy 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบ

ต่ำกว่ามาตรฐาน เมื่อซึมผ่านด้วยน้ำค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.26×10^{-8} m/s และเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.66×10^{-8} m/s นั่นคือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยทุกสัดส่วนผสม สามารถต้านทานต่อการซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ได้

2. ผลกระทบของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ

เพื่อศึกษาผลกระทบของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลาย จึงได้พิจารณาเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 0% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน อัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน มาทดสอบ โดยการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านนี้จะใช้เครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D 2434-68 โดยบดอัดดินลงใน โมลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.14 เซนติเมตร สูง 4.54 เซนติเมตร และใช้วิธีการทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ ที่ 400 kPa สำหรับสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 0% 20 kPa สำหรับสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ด้วยพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และ 10 kPa สำหรับสัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ด้วยพลังงานการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน โดยกำหนดทิศทางการไหลของน้ำและสารละลายผ่านตัวอย่างจากด้านล่างขึ้นด้านบนเพื่อกำจัดฟองอากาศออกจากตัวอย่างดิน หลังจากนั้นทำการซึมผ่านด้วยน้ำ พร้อมทั้งวัดปริมาณน้ำออกทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งปริมาณน้ำออกได้น้อยประมาณ 2-3 pore volume และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำคงที่ติดต่อกันประมาณ 4-5 ค่า แล้วจึงเปลี่ยนจากการซึมผ่านด้วยน้ำเป็นการซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ทำการวัดปริมาณสารละลายที่ออกจากตัวอย่างดินทุก ๆ 25 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายต่อไป ทำการซึมผ่านจนกระทั่งสารละลายซึมผ่านตัวอย่างดินได้อย่างน้อย 3 pore volume และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายคงที่ติดต่อกัน 4-5 ค่า จึงหยุดการทดสอบ นำผลการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับเวลา ดังตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-13

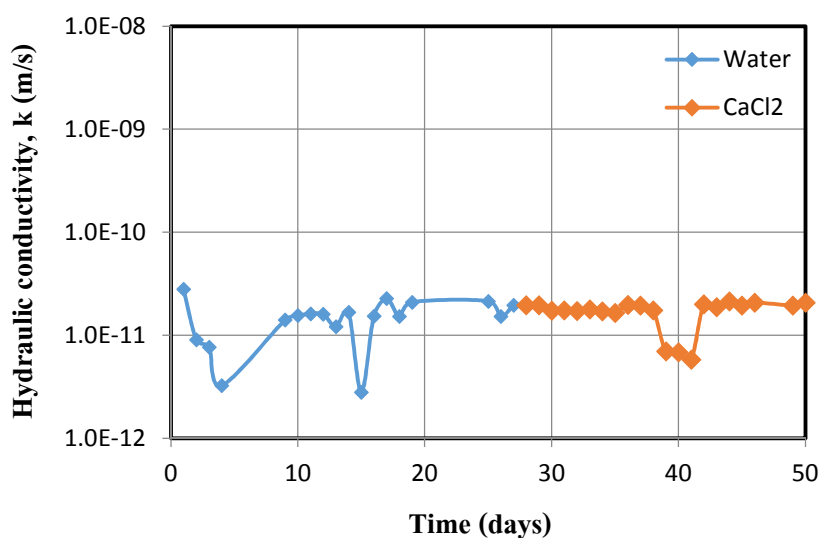
ตารางที่ 4-8 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ของดินที่ถูกขุดลอกผสม
 ใ้ล่อยที่อัตราส่วนต่าง ๆ

พลังงานการบดอัด	ใ้ล่อย 0% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน		ใ้ล่อย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน	
	k_w (m/s)	k_{CaCl_2} (m/s)	k_w (m/s)	k_{CaCl_2} (m/s)
MP	1.51×10^{-11}	1.72×10^{-11}	2.32×10^{-9}	1.40×10^{-9}
SP	-	-	4.58×10^{-8}	3.88×10^{-8}

หมายเหตุ MP=การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน, SP=การบดอัดแบบมาตรฐาน

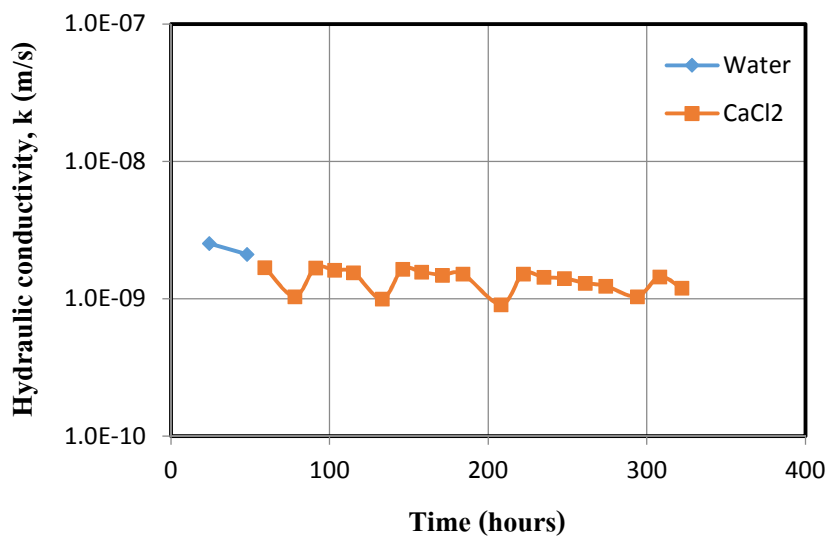
k_w = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำโดยเฉลี่ย

k_{CaCl_2} = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์โดยเฉลี่ย

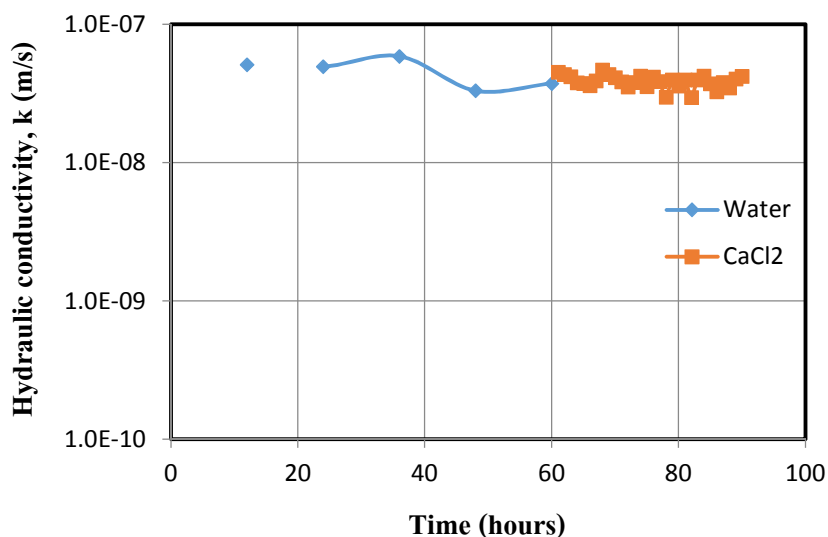


(a) ใ้ล่อย 0% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ภาพที่ 4-13 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินที่ถูกขุดลอกผสมใ้ล่อยที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่
 ซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



(b) etailoy 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



(c) etailoy 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน

ภาพที่ 4-13 (ต่อ)

จากผลการทดสอบ ดังภาพที่ 4-13 เมื่อพิจารณาผลกระทบของพลังงานการบดอัดและปริมาณetailoyต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานการบดอัดสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อปริมาณetailoyเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานการบดอัดสูงขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ตัวอย่างดินมีความทึบน้ำมากขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจึงลดต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือละลายเข้าไปในสัดส่วนผสมกลับทำให้ตัวอย่างดินมีความพรุนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจึงเพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบที่สัดส่วนผสมของดินที่ถูกขุดลอกผสมเกลือ 0% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อซึมผ่านด้วยน้ำค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.51×10^{-11} m/s และเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.72×10^{-11} m/s ที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเกลือ 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เมื่อซึมผ่านด้วยน้ำค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.32×10^{-9} m/s และเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.40×10^{-9} m/s และที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเกลือ 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน เมื่อซึมผ่านด้วยน้ำค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.58×10^{-8} m/s และเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลายจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.88×10^{-8} m/s นั่นคือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นดินที่ถูกขุดลอกผสมเกลือทุกสัดส่วนผสม สามารถต้านทานต่อการซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ได้

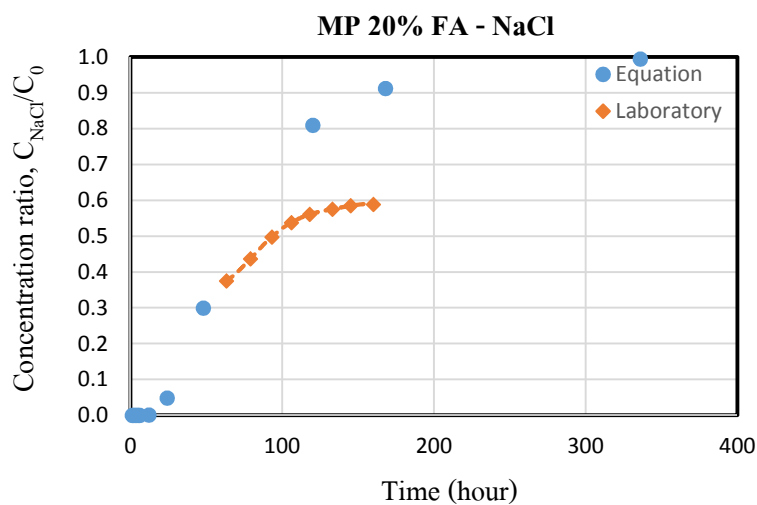
ผลการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและการคำนวณเวลาการไหลทะลุผ่านของสารเคมีต่าง ๆ ภายใต้ปรากฏการณ์การพาและการแพร่

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การการแพร่ประสิทธิผล (Effective diffusion coefficient, D) และการคำนวณเวลาการไหลทะลุผ่าน (Breakthrough time, T_B) จะทำโดยพิจารณาเลือกสัดส่วนผสม ได้แก่ อัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเกลือ 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และอัตราส่วนดินที่ถูกขุดลอกผสมเกลือ 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน มาทดสอบ ซึ่งภายหลังจากการศึกษาผลกระทบของสารเคมีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลาย โดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบผนังแข็งและให้ความดันแบบคงที่แล้ว หลังจากนั้นทำการซึมผ่านตัวอย่างดินด้วยน้ำ พร้อมทั้งวัดปริมาณน้ำออกทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งปริมาณน้ำออกได้น้อยประมาณ 2-3 pore volume และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำคงที่ติดต่อกันประมาณ 4-5 ค่า แล้วจึงเปลี่ยนจากการซึมผ่านด้วยน้ำเป็นการซึมผ่านด้วยสารละลายดังกล่าว ทำการวัดปริมาณสารละลายที่ออกจากตัวอย่างดิน

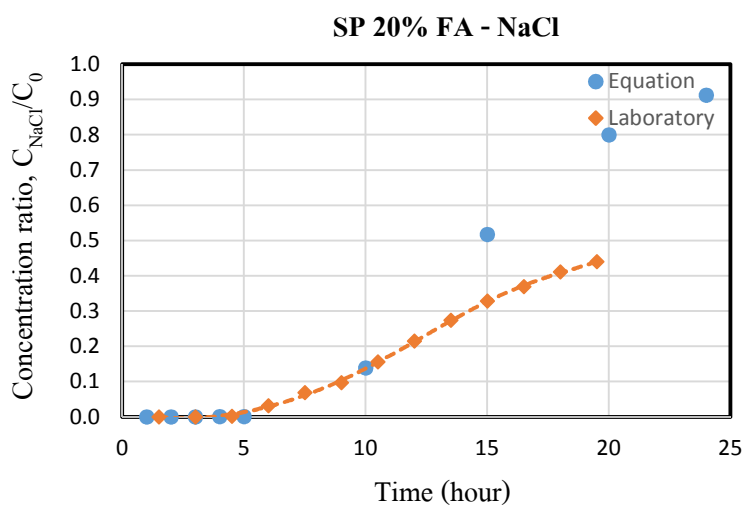
ทุก ๆ 25 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายต่อไป การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายสามารถทำได้โดยวิธีการไตเตรต ตามมาตรฐาน IS: 3025 (Part 32)–Reaffirmed 2003 จากนั้นนำผลการหาความเข้มข้นของสารละลายที่ได้หารด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้น จะได้ค่าอัตราส่วน C/C_0 จากการทดลองแล้วนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับเวลา และคำนวณหาค่าอัตราส่วน C/C_0 จากสมการที่ 2.13 จากนั้นนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับเวลาอีกครั้ง โดยการลองผิดลองถูกค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล จนกว่าค่าอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณใกล้เคียงหรือซ้อนทับกัน ดังภาพที่ 4-14 และภาพที่ 4-15 จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลที่ได้มาคำนวณหาอัตราส่วน C/C_0 อีกครั้งโดยใช้เงื่อนไขการใช้งานจริงในสนามซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมควบคุมมลพิษ คือ ความหนาของชั้นดินกันซึมบดอัดจะประมาณ 60-90 เซนติเมตร และความสูงของน้ำชะขยะบนชั้นกันซึมเท่ากับ 30 เซนติเมตร นำค่าอัตราส่วน C/C_0 ที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความลึกของชั้นกันซึมบดอัดก็จะได้เวลาการไหลทะลุผ่าน ดังภาพที่ 4-16 และภาพที่ 4-17 ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและเวลาการไหลทะลุผ่าน ดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลและเวลาการไหลทะลุผ่านของสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอย 20% ที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ

พลังงานการบดอัด	เถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ซึมผ่านด้วย NaCl		เถ้าลอย 20% ระยะเวลาบ่ม 0 วัน ซึมผ่านด้วย CaCl ₂	
	Effective diffusion coefficient, D (cm ² / sec)	Breakthrough time, T _B (year)	Effective diffusion coefficient, D (cm ² / sec)	Breakthrough time, T _B (year)
	MP	3.0×10^{-5}	30	1.0×10^{-5}
SP	4.5×10^{-5}	2	5.0×10^{-5}	1

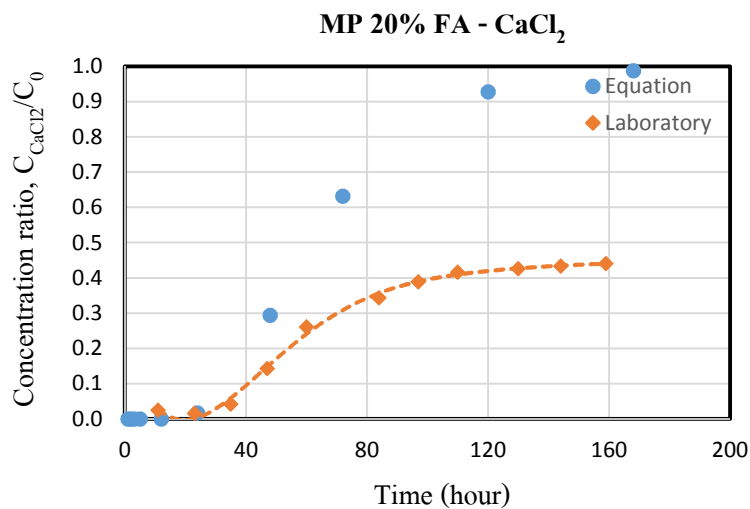


(a) ถ้ำลอย 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

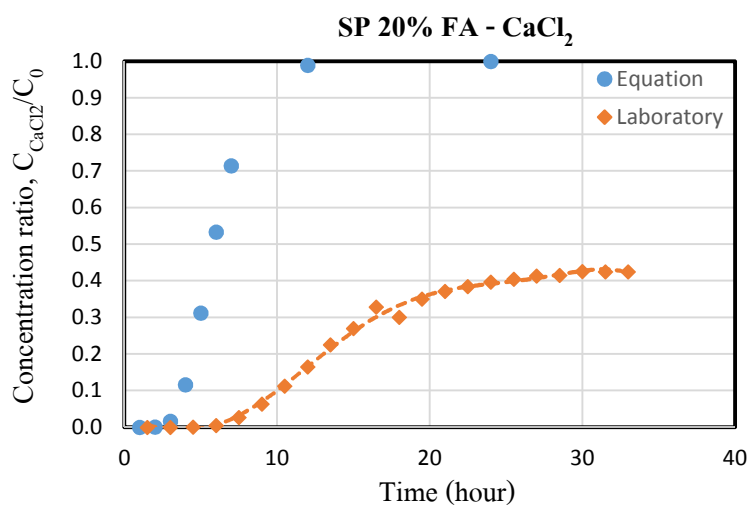


(b) ถ้ำลอย 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

ภาพที่ 4-14 ค่าอัตราส่วน C/C_0 กับเวลาที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำลอย 20% ที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ ซึ่งถูกซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์



(a) ถ้ำล่อย 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



(b) ถ้ำล่อย 20% ที่พลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

ภาพที่ 4-15 ค่าอัตราส่วน C/C_0 กับเวลาที่สกัดส่วนผสมดินที่ถูกขุดลอกผสมถ้ำล่อย 20% ที่พลังงานการบดอัดต่าง ๆ ซึ่งถูกซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเท่ากับ $3.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ $4.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเท่ากับ $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ ทั้งนี้ตามข้อกำหนดของกรมควบคุมมลพิษ ความหนาของชั้นดินกันซึมบดอัดจะประมาณ 60-90 เซนติเมตร และความสูงของน้ำชะขยะบนชั้นกันซึมเท่ากับ 30 เซนติเมตร ดังนั้นที่สัดส่วนผสมดินที่ถูกลอกผสมแล้วลอย 20% ซึ่งซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะใช้เวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 30 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 2 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ และเมื่อซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะใช้เวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 20 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 1 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของดินที่ถูกขุดลอก จากท่าเรือแหลมฉบังเพื่อใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมในบ่อฝังกลบขยะที่ถูกหลักสุขาภิบาล สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้

1. ดินที่ถูกขุดลอกจากชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี มีคุณสมบัติพื้นฐานด้านค่าพิกัดเหลว (Liquid limit) เป็น 54% และค่าพิกัดพลาสติก (Plastic limit) และค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity index) เป็น 25% และ 29% ตามลำดับ มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.64 สามารถจำแนกชนิดของดินตามมาตรฐาน Unified soil classification system (USCS) ได้เป็นดินเหนียวที่มีค่าความเป็นพลาสติกสูง (high plasticity clay, CH) และเถ้าลอย มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 มีองค์ประกอบทางเคมีของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 75.03% และ CaO เท่ากับ 13.72% สามารถจำแนกเป็นวัสดุปอซโซลานประเภท Class F

2. การเพิ่มขึ้นของพลังงานในการบดอัดดินส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ลดลง ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรลดลง

3. การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำลดลง ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น และค่าการหดตัวเชิงปริมาตรลดลง

4. การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่มไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีแนวโน้มทำให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวเพิ่มขึ้น และค่าการหดตัวเชิงปริมาตร ลดลง

5. ดินที่ถูกขุดลอกสามารถใช้เป็นชั้นดินกันซึมในบ่อฝังกลบขยะได้ โดยอัตราส่วน ของดินที่ถูกขุดลอกต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุด คือ 80 : 20 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

6. การเพิ่มขึ้นของพลังงานในการบดอัดดินส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของสารละลายมีแนวโน้มลดลง และการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของสารละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

7. สารละลายโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านของน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นดินที่ถูกขุดลอกผสมเถ้าลอยทุกสัดส่วนผสม สามารถ ด้านทานต่อการซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ได้

8. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอย 20% ซึ่งถูกซึมผ่านด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์มีค่าเท่ากับ $3.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ $4.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานตามลำดับ และเวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 30 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 2 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

9. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของดินที่ถูกขุดลอกผสมแฉะลอย 20% เมื่อถูกซึมผ่านด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จะมีค่าเท่ากับ $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และมีค่าเท่ากับ $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานตามลำดับ และเวลาการไหลทะลุผ่านประมาณ 20 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และประมาณ 1 ปี สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐาน

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารเคมีใช้เพียงสารละลายคลอไรด์เท่านั้น ดังนั้นควรใช้น้ำชะขยะมูลฝอยจากบ่อฝังกลบมาศึกษาประกอบด้วย
2. ควรเปรียบเทียบวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลเทียบกับวิธีอื่น ๆ
3. ควรวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติม
4. ควรทำแปลงทดสอบในสนาม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้จากการทดสอบในสนามกับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

- การบดอัดดิน. (2561). เข้าถึงได้จาก: <http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/7.pdf>.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2554). *เกณฑ์ มาตรฐาน และแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน*. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2556*. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- ชัยเจริญ มัจฉาสาระ และชนิด เฉลิมยานนท์. (2552). การประเมินความเหมาะสมของชั้นกันซึมดินบดอัดสำหรับสถานที่ฝังกลบ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14* (หน้า 103-108). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ดินตะกอนทะเล. (2561). เข้าถึงได้จาก: <http://wqm.pcd.go.th/water/index.php/2010-04-12-07-13-20/831-2012-07-24-02-32-19>.
- ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล และนท แสงเทียน. (2554). คำสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินทรายแป้งผสมเบนโทไนต์. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16*. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ชนิด เฉลิมยานนท์, สุรพล อารีรักษ์ และนันทนิตย์ เจริญไธสง. (2550). การห้วงโลหะหนักของชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12* (หน้า 159-164). พิษณุโลก: โรงแรมอมรินทร์ลาดหญ้า.
- ปิยชาติ ศิลปสุวรรณ. (2557). *ขยะมูลฝอยชุมชน ปัญหาใหญ่ที่ประเทศกำลังเผชิญ*. สถาบันทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 4(7).
- วรรณวรางค์ รัตนาภิรมย์, ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ และพัศดา บัดชุมมี. (2558). การพัฒนาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินตะกอนที่ถูกขุดลอกเพื่อใช้เป็นวัสดุในงานทาง. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20* (หน้า 1-6). ชลบุรี: โรงแรมเดอะซายน์.
- ศุภโชค สันติวัฒนาพร, ชนิด เฉลิมยานนท์ และสุเมธ ไชยประพัทธ์. (2555). การใช้ตะกอนประปาในงานชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17* (หน้า GTE029 1-8). อุตรธานี: โรงแรมเซ็นทารา แอนคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์.
- ASTM C618-17. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. www.astm.org

- ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³(2,700 kN-m/m³)). In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, vol 04.08. www.astm.org
- ASTM D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, vol 04.08. www.astm.org
- ASTM D2435-96. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils. In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, vol 04.08. www.astm.org
- ASTM D2487-06. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). In *Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, vol. 04.08. www.astm.org
- ASTM D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic limit and Plasticity Index of Soils. In *Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, vol. 04.08. www.astm.org
- ASTM D422-63. Standard test method for particle size analysis of soils. In *Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, sec. 4, vol 04-08, pp. 10-16. www.astm.org
- ASTM D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). In Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, vol 04.08. www.astm.org
- ASTM D854-00. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids By Water Pycnometer. In *Annual book of ASTM standards, American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, vol 04.08. www.astm.org
- Bagchi, A. (1994). *Design, construction, and monitoring of sanitary landfill*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY 10158-0012: 605 Third Avenue.
- Benson, C. H., Daniel, D. E., & Boutwell, P. G. (1999). Field performance of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 125, 390-403.

- Bhuvaneshwari, S., Robinson, R. G., & Gandhi, S. R. (2005). Stabilization of expansive soils using fly ash. *Fly Ash India. New Delhi*, VIII 5.1-VII 5.10.
- Brandl, H. (1992). Mineral liners for Hazardous waste containment. *Geotechnique*, 42, 57-65.
- Bonaparte, R. (1995). Long-term performance of landfills. *Proceedings of GeoEnvironment 2000, Geotechnical Special Publication*, ASCE, New Orleans, LA, February 24-26, 46, 514-553.
- Boutwell, G. P., & Hedges, C. (1989). Evaluation of waste-retention liners by multivariate statistics. *Proceeding of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio De Janerio, Brazil, 2, 815-818.
- Boynton, S. S., & Daniel, D. E. (1985). Hydraulic conductivity test on compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(4), 465-478.
- Cokca, E. (2001). Use of class C fly ash for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 568-573.
- Cokca, E., & Yilmaz, Z. (2004). Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material. *Waste Management Journal*, 24, 153-164.
- Crank, J. (1956). *The mathematics of diffusion*. Oxford England: Oxford University Press.
- Crooks, V. E., & Quigley, R. M. (1984). Saline leachate migration through clay: a comparative laboratory and field investigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 21, 349-361.
- Czurda, K. (2006). Clay liners and waste disposal. In F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.). *Handbook of Clay Science* (pp. 693-702). Elsevier: Amsterdam.
- Daniel, D. E. (1984). Predicting hydraulic conductivity of clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110(4), 285-300.
- Daniel, D. E. (1987). Earth liners for waste disposal facilities. In *Geotechnical Practice for Waste Disposal* (pp. 21-39), 87, R. D. Woods, ed., ASCE, Michigan: Ann Arbor.
- Daniel, D. E. (1990). Summary review of construction quality control for compacted soil liners. *Waste Containment System: Construction, Regulation, and Performance*, ASCE, R. Bonaparte. ed., New York, NY, 175-189.
- Daniel, D. E. (1993). *Geotechnical practice for waste disposal*. Chapman and Hall: London.
- Daniel, D. E., & Benson, C. H. (1990). Water content-density criteria for compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 116(12), 1811-1830.

- Daniel, D. E., & Shackelford, C. D. (1989). Chapter 5.3, Sanitary landfilling: Process, Technology and Environmental Impact. In *Containment of landfill leachate with clay liners* (pp. 323-341), T. H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegmann, Eds., London, UK: Academic Press.
- Daniel, D. E., & Wu, Y. K. (1993). Compacted clay liners and covers for sites. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119*(2), 223-237.
- Day, S. R., & Daniel, D. E. (1995). Hydraulic conductivity of two prototype clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111*(8), 957-970.
- Dubois, V., Abriak N. E., Zentar, R., & Ballivy, G. (2009). The used of marine sediments as a pavement base material. *Waste Management, 29*, 774-782.
- Dutta, J., & Mishara, A. K. (2015). A study on the influence of inorganic salts on the behavior of compacted bentonites. *Applied Clay Science, 116-117*, 85-92.
- Ehrig, H. J. (1989). *Leachate quality, Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact* (pp.213-229). Edited by T. H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegmann, London, UK: Academic Press Limited.
- Elsbury, B. R., Daniel, D. E., & Sragers, G. A. (1990). Lesson learned from compacted clay liner. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 116*(11), 1641-1660.
- Environmental Protection Agency (2000). *Landfill manual-Landfill site design* (pp. 154). Ireland: Wexford.
- European Commission (1999). Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste. *Official Journal of the European Union 182*, 0001-0019; Brussels.
- Francisca, F. M., & Glatstein, D. A. (2010). Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate. *Applied Clay Science, 49*, 187-193.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall Inc.
- Gillham, R. W., Robin, M. J., & Dytynshyn, D. J. (1984). Diffusion of non-reactive and reactive solutes through fine grained barrier materials. *Canadian Geotechnical Journal, 21*, 541-550.
- Gray, D. H. (1995). Strategies for effective containment of landfilled waste. Proceeding of Geoenvironment 2000, ASCE, *Geotechnical Special Publication, 46*, New Orleans, LA, U.S.A., February 24 to 26, 384-498.

- Herrmann, J. G., & Elsbury, B. R. (1987). Influence factors in soil liners construction for waste disposal facilities. *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, ASCE, Ann Arbor, MI, 522-536.
- Holtz, W. G., & Lowitz, C. W. (1957). Compaction characteristics of Gravelly soils. *Special Technical Publication*, 232, ASTM, Philadelphia, PA, 70-83.
- International Solid Waste Association (ISWA). (2010). *Landfill operational guidelines – 2nd edition* (pp. 106). International Solid Waste Association: Vienna.
- Jo, H. Y., Benson, C. H., Shackelford, C. D., Lee, J. M., & Edil, T. B. (2005). Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 405-417.
- Johnson, R. L., Cherry, J. A., & Pankow, J. F. (1989). Diffusive containment transport in nature clay: a field example and implications for clay lined waste disposal sites. *Environmental Science Technology*, 23(3), 340-349.
- Kalkan, E. (2006). Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners. *Engineering Geology*, 87, 220-229.
- Kayabali, K. (1997). Engineering aspects of a novel landfill liner material: bentonite-amended natural zeolite. *Engineering Geology Journal*, 46, 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, 638-640.
- Koerner, R. M., & Daniel, D. E. (1997). *Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps*. London, UK: ASCE Press, Reston, VA, and Thomas Telford.
- Lambe, T. W. (1958). The permeability of compacted fine-grained soils. *Special Technical Publication*, 163, ASTM. Philadelphia, PA, 55-67.
- Lu, J. C. S., Morrison, R. D., & Stearns, R. J. (1984). *Production and management of leachate from municipal landfills: Summary and assessments*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/2-84-092, May, Cincinnati, OH.
- Maritsa, L., Tsakiridia, P. E., Katsiotis, N. S., Tsiavos, H., Velissariou, D., Xenidis, A., &

- Beazi-Katsioti, M. (2016). Utilization of spilitic mining wastes in the construction of landfill bottom liners. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4, 1818-1825.
- McBean, E. A., Rovers, F. A., & Farquhar, G. J. (1995). *Solid waste landfill engineering and design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall PTR.
- McGinley, P. M., & Kmet, P. (1984). *Formation, characteristics, treatment and disposal of leachate from municipal solid waste landfills*. Wisconsin Department of Natural Resources, Special Report, August, Madison, WI.
- Mir, B. A., & Sridharan, A. (2013). Physical and Compaction Behaviour of Clay Soil-Fly ash Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 31, 1059-1072.
- Mitchell, J. K., Hopper, D. R., & Campanella, R. G. (1965). Permeability of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, 91(4), 41-65.
- Mohamedzein, Y. E. A., Al-Rawas, A. A., Al-Aghbari, M. Y., Qatan, A., & Al-Rawas, A. H. (2005). Assessment of crushed shales for use as compacted landfill liners. *Engineering Geology*, 80, 271-281.
- Morandini, T. L. C., & Leite, A. L. (2015). Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. *Engineering Geology Journal*, 196, 251-267.
- Mollamahmutoglu, M., Yilmaz, Y., & Gungor, A. G. (2009). Effect of a Class C fly ash on the geotechnical properties of an expansive soil. 1-6.
- Musso, T.B., Roehl, K.E., Pettinari, G., & Valles, J.M. (2010). Assessment of smectite-rich claystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills. *Applied Clay Science*, 48, 438-445.
- Ogata, A., & Banks, R. B. (1961). A solution to the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. *U.S. Geol. Survey Professional Paper*, 411A, D. C.
- Olsen, H. W. (1962). Hydraulic flow through saturated clays. *Clays and Clay Minerals*, 9(2), 131-161.
- Pandian, N. S., Krishna, K. C., & Leelavathamma, B. (2002), Effect of Fly Ash on the CBR Behaviour of Soils , *Indian Geotechnical Conference, Allahabad*, 1, 183-186.
- Peirce, J. J., Salfors, G., Peel, TH. A., & Witter, K. A. (1987). Effect of selected inorganic leachates on clay permeability. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8), 915-919.

- Phani kumar, B. R., & Sharma, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 130(7), 764-767.
- Phani kumar, B. R., & Sharma, R. S. (2007). Volume change behavior of fly ash-stabilized clays. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 19(1), 67-74.
- Puri, N., & Soni, D. (2013). Utilization of bentonite-silt mixtures as seepage barriers in liner systems of engineered landfills. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 4(2), 346-352.
- Qasim, S. R., & Burchinal, J. C. (1970). Leaching from simulated landfills. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 42, 371-379.
- Qian, X., Koerner, R.M., & Gray, D.H. (2002). *Geotechnical aspects of landfill design and construction*. New Jersey: Prentice Hall.
- Rahman, F., Kodikara, J. K., & Bouazza, A. (2001). Compatibility of some compacted Victorian soils with organic chemicals and waste leachates. *Australian Geomechanics*. 43-57.
- Reinhart, D. R., & Townsend, T. G. (1998). *Landfill bioreactor design and operation*. CRC Press LLC, 2000 Corporate Blvd., N. W., Boca Raton, FL, 33431.
- Roberts, A. A., & Shimaoka, T. (2008). Analytical study on the suitability of using bentonite coated gravel as a landfill liner material. *Waste Management Journal*, 28, 2635-2644.
- Roww, R. K., Quigley, R. M., & Booker, J. R. (1995). *Clayey barrier systems for waste disposal facilities*. London: Chapman & Hall.
- Ruhl, J. L., & Daniel, D. E. (1997). Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 369-381.
- Shackelford, C. D. (1988). Diffusion as a transport process in fine grained materials. *Geotechnical News*, 6(2), 24-27.
- Shackelford, C. D., & Redmond, P. L. (1995). Solute breakthrough curves for processed Kaolin at low flow rates. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 121(1), 17-32.
- Shakoor, A., & Cook, B. D. (1990). The effect of stone content, size and shape on the engineering properties of a compacted silty clay. *Bulletin of Association of Engineering, Geologists*, 27(2), 245-253.

- Shelley, T. L., & Daniel, D. E. (1993). Effect of gravel on hydraulic conductivity of compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119*(1), 54-68.
- Straub, N. A., & Lynch, D. R. (1982). Models of landfill leaching: organic strength. *Journal of Environmental Engineering, ASCE, 108*(2), 251-268.
- Tsakiridis, P. E., Maritsa, L., Katsiatis, N. S., Tsiavos, H., Velissariou, D., & Xenidis, A. (2016). Utilization of spilitic mining waste in the construction of landfill bottom liners. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 4*, 1818-1825.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1988). *Summary of data on municipal solid waste landfill characteristics-Criteria for municipal solid waste landfills (40CFR Part 258)*. OSWER, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/530-SW-88-038, Washington, DC.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1989). Requirements for hazardous waste landfill design, construction, and closure. In *Seminar Publication* (pp. 14-16). Cincinnati, OH, August.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1998). Solid waste disposal facility criteria technical manual. In *United States Environmental Protection Agency* (p. 349). Springfield.
- Van Ree, C. C. D. F., Weststrate, F. A., Meskers, C. G., & Bremmer, C. N. (1992). Design aspects and permeability testing of natural clay and sand-bentonite liners. *Geotechnique, 1*(42), 49-56.
- Yahia, E.-A. Mohamedzein, Amer, A., Al-Rawas, Mohammed Y., Al-Aghbari, Ahmed, Q., & Abdul-Hamid Al-Rawas. (2005). Assessment of crushed shales for use as compacted landfill liners. *Engineering Geology, 80*, 271-281.
- Zalihe, N. (2004). Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials, 18*, 377-381.
- Zentgraf, R., Dubois, V., & Abriak, N. E. (2008). Mechanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments. *Resources Conservation and Recycling, 52*, 947-954.