

คุณสมบัติการไหลซึมของของไหลที่มีสารปนเปื้อนผ่าน
วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด



นายโกวิทย์ ทศศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0956-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FLOW OF CONTAMINATED FLUID THROUGH
COMPACTED SAND-BENTONITE MIXTURE



Mr.Kowit Tossiri

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0956-9

โกวิท ทัศนศิริ : คุณสมบัติการไหลซึมของของไหลที่มีสารปนเปื้อนผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด.

(FLOW OF CONTAMINATED FLUID THROUGH COMPACTED SAND-BENTONITE MIXTURE) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 87 หน้า. ISBN 974-03-0956-9.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดซึ่งใช้เป็นชั้นวัสดุกันซึมรองรับหลุมฝังกลบขยะ

วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์จะถูกบดอัดในกระบอกผนังแข็งซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 ซม.และความสูงตัวอย่าง 2 ซม. และจะถูกทดลองภายใต้แรงดันกดทับ 150 kPa ของเหลวที่ใช้ในการทดลองได้แก่ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ กรดอะซิติก กรดไฮโดรคลอริก และเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ค่า โดยผลการทดลองจากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปาจะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิง

ผลการทดลองกับน้ำประปาพบว่า ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5% 10% และ 15% มีค่าเท่ากับ 3.0×10^{-6} 2.0×10^{-9} และ 5.0×10^{-10} ซม./วินาที ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5% สูงกว่า 1.0×10^{-7} ซม./วินาทีซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดของชั้นวัสดุกันซึม

ผลการทดลองเมื่อใช้สารเคมีไหลซึมผ่านตัวอย่างวัสดุผสมแสดงให้เห็นว่า สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M สามารถทำให้วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเพิ่มขึ้นได้ถึง 7 ถึง 156 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากน้ำประปา ในขณะที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านเมื่อทดลองกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้น 58 ถึง 589 เท่า สารละลายกรดอะซิติกและสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น 14 ถึง 350 เท่า และ 39 ถึง 394 เท่า ตามลำดับ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น 3 ถึง 2317 เท่า ในเชิงของค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นวัสดุกันซึมมากกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%

ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2544	

4270232021: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: LANDFILL / LINER / CONTAMINANT / SAND-BENTONITE MIXTURE / HYDRAULIC CONDUCTIVITY
KOWIT TOSSIRI: THESIS TITLE. FLOW OF CONTAMINATED FLUID THROUGH COMPACTED SAND-BENTONITE MIXTURE.
THESIS ADVISOR: ASST.PROF.DR.SUPOT TEACHAVORASINSKUN, 87 pp. ISBN 974-03-0956-9.

The objective of this research was to determine the changes in the hydraulic conductivity of compacted sand-bentonite mixture, which is generally used as a liner in the landfills.

The mixtures between sand and bentonite were compacted in the rigid wall cell having the dimension of 10 cm. in diameter (inside) and 2 cm in height. They were then subjected to the overburden stress of 150 kPa. The permeant liquids used in the testing program were solutions of sodium chloride, calcium chloride, acetic acid, hydrochloric acid and sodium hydroxide at 3 concentration values. The results from test using tap water as permeant were used as reference values.

Results of tap water tests revealed that the hydraulic conductivity of the mixtures were 3.0×10^{-6} , 2.0×10^{-9} , 5.0×10^{-10} cm/sec for the mixture with bentonite content 5%, 10% and 15%, respectively. The value for the mixture with bentonite content 5% did not meet the criteria of the liner ($k \leq 1.0 \times 10^{-7}$ cm/sec).

Test on chemical permeants showed that sodium chloride solution having concentration of 1.6 M, 3.1 M and 4.5 M could increase the hydraulic conductivity of the mixtures by 7 to 156 times comparing to that test with tap water. While solution of calcium chloride at the same concentrations resulted in 58 to 589 times increases in hydraulic conductivity. When acetic acid and sodium hydroxide solutions were used, the k value increased by 14 to 350 times and 39 to 394 times, respectively. Test on hydrochloric acid yielded 3 to 2317 increases in hydraulic conductivity. In term of the hydraulic conductivity, the mixture with bentonite content 15% is more appropriate for using as a liner than the mixture with bentonite content 10%.

Department	Civil Engineering	Student's signature.....
Field of study	Civil Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2001	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็น ต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนและให้กำลังใจแก่ ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

โกวิท ทัศนศิริ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีบทและผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต.....	4
2.1 หลุมฝังกลบขยะมูลฝอย.....	4
2.2 วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์.....	8
2.3 ทฤษฎีวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว.....	11
2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว.....	13
2.4.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุไฟฟ้า.....	14
2.4.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าประจุไฟฟ้าของไอออนบวก.....	14
2.4.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant.....	15
2.4.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	16
2.4.5 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของไอออน.....	16
2.4.6 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า pH.....	17
2.4.7 ผลกระทบจากการดูดซับไอออนลบ.....	18
2.5 การแทนที่ของไอออนบวกที่ผิวอนุภาคดินเหนียว.....	18
2.6 โครงสร้างของดิน.....	21
2.7 ทฤษฎีการบดอัด.....	23
2.8 กลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน.....	26
2.8.1 Advective transport.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2 Diffusive transport.....	27
2.8.3 Advective-diffusive transport.....	27
2.8.4 Dispersion.....	28
2.9 ทฤษฎีความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน.....	29
บทที่ 3 วัสดุ เครื่องมือ และขั้นตอนการทดลอง.....	39
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.1.1 เบนโทไนต์.....	39
3.1.2 ททราย.....	40
3.1.3 สารเคมี.....	41
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	48
3.3.1 ขั้นตอนการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่าน วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด.....	48
3.3.2 ขั้นตอนการทดลองหาพิคกิ้งซีดเหลวของเบนโทไนต์โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ.....	54
3.3.3 ขั้นตอนการทดลองหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี Unconfined Compression Test.....	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	56
4.1 ผลการทดลองหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุ ผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test.....	56
4.2 ผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่านวัสดุผสม ระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด.....	57
4.2.1 น้ำประปา.....	58
4.2.2 สารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	60
4.2.3 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	62
4.2.4 สารละลายกรดอะซิติก.....	64
4.2.5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก.....	67
4.2.6 สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.7	เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์กับ สารละลายเกลือแคลเซียมคลอไรด์.....	71
4.2.8	เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายกรดอินทรีย์ (กรดอะซิติก) กับสารละลายกรดอินทรีย์ (กรดไฮโดรคลอริก).....	72
4.2.9	เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายกรดแก่ (กรดไฮโดรคลอริก) กับสารละลายเบสแก่ (เบสโซเดียมไฮดรอกไซด์).....	72
4.3	ผลการทดลองหาพิคกิ้งซีดเหลวของเบนโทไนต์โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ.....	74
4.4	ผลการทดลองหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี Unconfined Compression Test.....	76
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	78
5.1.1	สรุปผลการทดลองหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสม ของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test.....	78
5.1.2	สรุปผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่าน วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด.....	78
5.1.3	สรุปผลการทดลองหาพิคกิ้งซีดเหลวของเบนโทไนต์โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ	80
5.1.4	สรุปผลการทดลองหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี Unconfined Compression Test.....	80
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	80
	รายการอ้างอิง.....	82
	ภาคผนวก.....	84
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงรายละเอียดของระบบ liner ของหลุมฝังกลบขยะประเภทที่มีการออกแบบทางวิศวกรรม 10 แห่งในประเทศไทย (Ashford et al., 2000)	7
2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant ตามอุณหภูมิของน้ำ	16
2.3 แสดงขนาดของไอออนบวกที่ดูดซับน้ำไว้บางชนิด	16
2.4 แสดงการจำแนกดินตามค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Terzaghi and Peck, 1967)	29
3.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้ในการทดลอง	40
3.2 แสดงคุณสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 แสดงเงื่อนไขการทดลองของแต่ละตัวอย่าง	53
4.1 แสดงผลการทดลองบดอัดวัสดุผสมด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test	56
4.2 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด	57

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย	6
2.2 แสดงผลสำรวจสถานที่เก็บขยะมูลฝอยภายในประเทศไทย 114 แห่ง (Ashford et al., 2000)	7
2.3 แสดงลักษณะตามธรรมชาติของอนุภาคดินเหนียว	12
2.4 แสดงการนิยามขนาดวงนํ้ารอบอนุภาคดินเหนียวให้มีค่าเท่ากับ $1/k$	13
2.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ทางไฟฟ้ากับระยะจากผิวอนุภาคดินเหนียว	15
2.6 แสดงผลการปรับปรุงทฤษฎี Gouy-Chapman Theory ด้วย Stern layer	17
2.7 แสดงกลไกการดึงดูดไอออนบวกบนผิวของ silicate เช่น montmorillonite (Sposito, 1989)	19
2.8 แสดงโครงสร้างของดิน	21
2.9 แสดงการศึกษาโครงสร้างของดินในหลอดทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบ (William Lambe, 1958)	23
2.10 แสดงกราฟการบดอัดที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของดิน	24
2.11 แสดงผลการทดลองวัดลักษณะของโครงสร้างดินโดย Mitchell's technique (Pacey, 1956)	25
2.12 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินเหนียวบดอัดในภายหลัง	26
2.13 แสดงกลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน	27
2.14 แสดงการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนด้วยกลไก advective และ dispersion	28
2.15 แสดงการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน	31
2.16 แสดงการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบผนังไม่ยืดหยุ่น (rigid wall, fixed wall)	32
2.17 แสดงการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบผนังยืดหยุ่น (flexible wall)	33
2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับฟังก์ชันของอัตราส่วน ช่องว่าง	36
2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับส่วนประกอบของ ดินเหนียว	37
3.1 แสดงการกระจายของขนาดคละของทรายที่ใช้ในการทดลอง	40

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 แสดงแผนภาพลักษณะของชุดทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	43
3.3 แสดงรูปประกอบตัวอย่าง.....	45
3.4 แสดงรูปแผ่นให้น้ำหนักกดทับพร้อมแกนส่งน้ำ	46
3.5 แสดงรูปแผ่นพรุน	46
3.6 แสดงรูปแผ่นปิดบน	47
3.7 แสดงรูปแผ่นปิดล่าง	47
3.8 แสดงแผนภาพระบบแรงดันอากาศ.....	48
3.9 แสดงรูปเครื่องปั้นวัสดุผสม	49
3.10 แสดงรูปชุดประกอบตัวอย่างสำหรับการบดอัด	50
3.11 แสดงรูปชุดประกอบตัวอย่างพร้อมทดลอง	51
3.12 แสดงการติดตั้งชุดทดลองกับระบบแรงดันอากาศ.....	51
3.13 แสดงแผนภาพลำดับขั้นตอนการทดลอง	52
3.14 แสดงรูปประกอบเก็บตัวอย่าง.....	55
4.1 แสดงผลการทดลองบดอัดวัสดุผสมด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test.....	56
4.2 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของน้ำประปาผ่านวัสดุผสม ระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด.....	59
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปากับปริมาณ เบนโทไนต์ในวัสดุผสม	59
4.4 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%	61
4.5 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%	61
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมคลอไรด์	62
4.7 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%	62
4.8 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%	63

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	64
4.10 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดอะซิติกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%	65
4.11 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดอะซิติกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%	65
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก	66
4.13 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%	67
4.14 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%	68
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	69
4.16 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%	70
4.17 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%	70
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์	71
4.19 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	72
4.20 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายกรดกรดอะซิติกกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.5 M	73
4.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์	73
4.22 แสดงผลการทดลองหาพิคกิ้งซีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์	74
4.23 แสดงผลการทดลองหาพิคกิ้งซีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายกรดอะซิติก.....	75
4.25 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	75
4.26 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	75
4.27 แสดงผลการทดลองหากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี Unconfined Compression Test.....	76
4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม	77
ก แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 4.5 M ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ของตัวอย่างที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับตัวอย่างในกลุ่ม.....	85
ข แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 M ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ของตัวอย่างที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับตัวอย่างในกลุ่ม.....	85
ค แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.5 M ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ของตัวอย่างที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับตัวอย่างในกลุ่ม.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

เบนโทไนต์ (Bentonite) เป็นวัสดุทางวิศวกรรมชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างกันอย่างแพร่หลาย อาทิ งานรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะเสาเข็มแบบเปียก งานก่อสร้างชั้นวัสดุกันซึม (Liner) ในหลุมฝังกลบขยะ (Landfill) เป็นต้น การนำวัสดุชนิดนี้มาใช้ เนื่องจากเบนโทไนต์เป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งซึ่งมีแร่ดินเหนียวจำพวก montmorillonite เป็นองค์ประกอบหลักจึงทำให้มีคุณสมบัติทางการที่บดน้ำดีในสภาพความชื้นที่เหมาะสม แต่มีคุณสมบัติด้านกำลังต่ำ ดังนั้นในงานก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะที่จะกล่าวถึงต่อไปจึงมีการนำเบนโทไนต์มาผสมกับทรายและน้ำในอัตราส่วนที่พอเหมาะพร้อมทั้งมีการบดอัดเพื่อให้ได้คุณสมบัติทั้งด้านความที่บดน้ำดีและกำลังที่เพิ่มขึ้นจากทรายเหมาะสมกับการนำไปใช้ทำเป็นชั้นวัสดุกันซึมรองหลุมฝังกลบขยะ

ในงานก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะ สิ่งสำคัญที่สุดที่ต้องพิจารณาคือ การหยุดหรือชะลอการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนจากภายในหลุมฝังกลบขยะออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งตัวกลางหลักในการนำพาสารปนเปื้อนเหล่านี้คือ "น้ำ" ดังนั้นโครงสร้างของหลุมฝังกลบขยะจึงต้องมีส่วนที่เป็นชั้นวัสดุกันซึมโดยมีข้อกำหนดว่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ของวัสดุที่ใช้ทำชั้นนี้จะต้องต่ำกว่า 1.0×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตามในสภาวะการใช้งานจริง ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านนี้อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำชะมูลฝอย (Leachate) ซึ่งถ้าการเปลี่ยนแปลงนั้นเป็นไปในทางที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้สารปนเปื้อนสามารถกระจายตัวออกสู่ภายนอกได้ง่ายขึ้น และอาจถึงปริมาณที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณใกล้เคียงหลุมฝังกลบขยะได้

ในระยะหลัง วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดเป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถนำมาใช้ทำเป็นชั้นวัสดุกันซึมได้เป็นอย่างดีเนื่องจากมีการทรุดตัวน้อยเมื่อเทียบกับดินเหนียวบดอัดและมีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านอยู่ในช่วง 10^{-8} - 10^{-11} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดการออกแบบ อีกทั้งในบางภูมิภาคที่ขาดแคลนดินเหนียวการใช้วัสดุผสมชนิดนี้อาจจะเป็นการประหยัดต้นทุนในการก่อสร้างอีกด้วย อย่างไรก็ตามวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดก็มีข้อเสียที่ว่ามันมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมอย่างมาก จึงคาดการณ์ได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุผสมชนิดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาและอาจจะก่อให้เกิดผลเสียในภายหลังได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติความที่บ้น้ำ (ความสามารถในการไหลซึมผ่าน) ของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากผลของการไหลซึมผ่านด้วยน้ำชะมูลฝอยซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาคุณสมบัติความที่บ้น้ำ (ความสามารถในการไหลซึมผ่าน) ของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด (Compacted Sand-Bentonite Mixture) อันเป็นผลมาจากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำชะมูลฝอย ซึ่งในการศึกษานี้จะนิยามของเหลวที่มีสารปนเปื้อนด้วยสารเคมีต่างๆ ที่อาจมีอยู่ได้ในน้ำชะมูลฝอยซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าเป็นการศึกษาผลกระทบจากองค์ประกอบแต่ละส่วนที่มีอยู่ในน้ำชะมูลฝอย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือทดลองหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์ซึ่งจะต้องสามารถเตรียมตัวอย่างด้วยการบดอัดตามมาตรฐานการบดอัดแบบ Standard Proctor Compaction Test ได้

2. ทดลองหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5%, 10%, 15% และที่ปริมาณความชื้นในการบดอัดมากกว่าความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัด (Optimum Moisture Content) 2% (เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพเริ่มต้นในสนาม) ตามมาตรฐานการบดอัดแบบ Standard Proctor Compaction Test โดยใช้ของเหลวในการไหลซึมผ่านดังนี้

- น้ำประปา (ค่าอ้างอิงตามสภาพเริ่มต้นในสนามโดยไม่มีผลกระทบจากน้ำชะมูลฝอย)
- สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
- สารละลายกรดอะซิติก (CH₃COOH) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
- สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ใช้ทำเป็นชั้นวัสดุกันซึมที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากการซึมผ่านด้วยน้ำชะมูลฝอยและใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะช่วยในการปรับปรุงกฎระเบียบข้อบังคับการออกแบบและก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม
2. เพื่อใช้เป็นข้อมูลร่วมกับงานวิจัยอื่นที่ศึกษาในทำนองเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีบทและผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

2.1 หลุมฝังกลบขยะมูลฝอย (Landfill)

การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีฝังกลบเป็นการนำขยะมูลฝอยมาเทกองในพื้นที่ที่จัดเตรียมไว้แล้วใช้เครื่องจักรกลเกลี่ยและบดอัดให้ยุบตัวลง หลังจากนั้นใช้ดินกลบทับและบดอัดให้แน่นอีกครั้งหนึ่งในลักษณะของเซลล์ (cell) และจะทำอย่างนี้เรื่อยไปเป็นชั้น ๆ จนเต็มพื้นที่ เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาทางด้านกลิ่น แอมโมเนีย น้ำฝนชะล้าง และอื่น ๆ อินทรีย์สารที่อยู่ในหลุมฝังกลบจะถูกย่อยสลายตามธรรมชาติด้วยจุลินทรีย์ในสภาพไร้อากาศ (Anaerobic Decomposition) จนเกิดของเสียในรูปของก๊าซและของเหลวขึ้นได้ ดังนั้นการดำเนินการฝังกลบขยะมูลฝอยจึงต้องมีมาตรการในการป้องกัน การระบาย หรือการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นด้วย พื้นที่ในการฝังกลบนี้จะต้องมีการสำรวจตรวจสอบแล้วว่าเหมาะสมทั้งทางด้านการใช้ที่ดินและความปลอดภัยต่อสภาพแวดล้อม โดยวิธีการฝังกลบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. แบบกลบบนพื้นที่ (Area Method) เป็นการฝังกลบที่เริ่มจากระดับดินเดิมโดยไม่มี การขุดหลุมลงไปก่อน การฝังกลบด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องทำคันดิน (Embankment or Berm) ตามแนวขอบพื้นที่ เพื่อใช้เป็นค้ำยันขยะมูลฝอยและยังช่วยป้องกันการซึมของน้ำเสียที่จะออกสู่ภายนอกอีกด้วย การฝังกลบด้วยวิธีนี้จะใช้กับพื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงคืออยู่ต่ำกว่าระดับผิวดินเพียงเล็กน้อย เพื่อเป็นการป้องกันการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน

2. แบบขุดร่อง (Trench Method) เป็นการฝังกลบที่ต้องมีการขุดดินลงไปก่อน โดยทั่วไปแล้วความลึกของหลุมจะถูกกำหนดด้วยระดับน้ำใต้ดิน คือ จะต้องอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินมากกว่า 1 เมตรโดยยึดระดับน้ำในฤดูฝนเป็นเกณฑ์ หรือไม่เช่นนั้นจะต้องมีการออกแบบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินเป็นกรณีพิเศษ

โดยทั่วไป หลุมฝังกลบขยะจะต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ โดยเรียงลำดับจากชั้นล่างสุด (รูปที่ 2.1) ดังนี้

1. ชั้นวัสดุกันซึม (Liner) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างสุด ทำหน้าที่ป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนที่มีลักษณะเป็นของเหลวออกสู่น้ำใต้ดินและสภาพแวดล้อมภายนอกขอบเขตของหลุมฝังกลบขยะ โดยอาจจะประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัดที่มีความหนาน้อยกว่า 60 ซม. เพียงอย่างเดียว (Clayey Liner) หรือชั้นดินเหนียวบดอัดร่วมกับแผ่นวัสดุสังเคราะห์ประเภท HDPE หนา 1.5 มม.ขึ้นไป (Composite Liner) ซึ่งตามมาตราฐานทั่วไป ชั้นดินเหนียวบดอัดนี้จะต้องมีค่า

ความสามารถในการไหลซึมผ่านน้อยกว่า 1.0×10^{-7} ซม./วินาทีและมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมต่ำเนื่องจากจะต้องสัมผัสกับน้ำชะมูลฝอยอยู่ตลอดเวลา

2. ชั้นระบบรวบรวมและสูบน้ำชะมูลฝอย (Leachate Collection System) เป็นชั้นบนถัดจากชั้นวัสดุกันซึมขึ้นมา โดยมีหน้าที่รวบรวมน้ำชะมูลฝอยเพื่อสูบออกจากหลุมฝังกลบขยะก่อนที่จะไหลซึมผ่านชั้นวัสดุกันซึมออกสู่ภายนอก ชั้นนี้จะประกอบด้วย ท่อ PVC หรือ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว เจาะรู หุ้มด้วยแผ่นกรองใยสังเคราะห์ และฝังอยู่ในชั้นกรวดทรายที่มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงกว่า 1.0×10^{-3} ซม./วินาที หนาอย่างน้อย 30 ซม. ซึ่งระยะห่างและความลาดเอียงของท่อจะถูกกำหนดโดยแรงดันน้ำชะมูลฝอยเหนือชั้นวัสดุกันซึม (Hydraulic Head) ค่าที่ยอมรับให้ในการออกแบบจะต้องไม่เกิน 30 ซม. นอกจากนี้การออกแบบยังจะต้องคำนึงถึงการอุดตันและวิธีการทำความสะอาดท่ออีกด้วย

3. ชั้นขยะมูลฝอย (Waste) เป็นชั้นบนถัดจากชั้นระบบรวบรวมและสูบน้ำชะมูลฝอย โดยชั้นนี้จะประกอบไปด้วยขยะมูลฝอยบดอัดในลักษณะของเซลล์ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งขยะมูลฝอยนี้สามารถแบ่งตามการออกแบบหลุมฝังกลบได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 ขยะมูลฝอยทั่วไป และประเภทที่ 2 ขยะมูลฝอยที่ย่อยสลายยากหรือไม่เกิดการเน่าเสียง่าย เช่น พลาสติก ยาง ท่อนไม้ แก้ว เศษวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น ขยะทั้งสองประเภทนี้จะมีผลต่อการออกแบบชั้นปิดทับสุดท้าย (Final Cover) ที่จะกล่าวถึงในข้อต่อไป

4. ชั้นปิดทับสุดท้าย (Final Cover) เป็นชั้นบนสุดซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำจากภายนอกเข้าสู่หลุมฝังกลบขยะไม่ว่าจะเป็นน้ำฝน หรือน้ำจากแหล่งอื่น โดยในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงประเภทของขยะมูลฝอยที่จะฝังกลบและสภาพน้ำท่วมที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นชั้นนี้จึงมีส่วนประกอบของวัสดุกันซึมและชั้นดินปกคลุมเพื่อปลูกพืชคลุมดินกันการพังทลายของดิน ซึ่งในกรณีที่มีการฝังกลบขยะประเภทที่ 1 จะต้องมีการออกแบบป้องกันการซึมที่มีคุณภาพสูงกว่าในกรณีฝังกลบขยะประเภทที่ 2

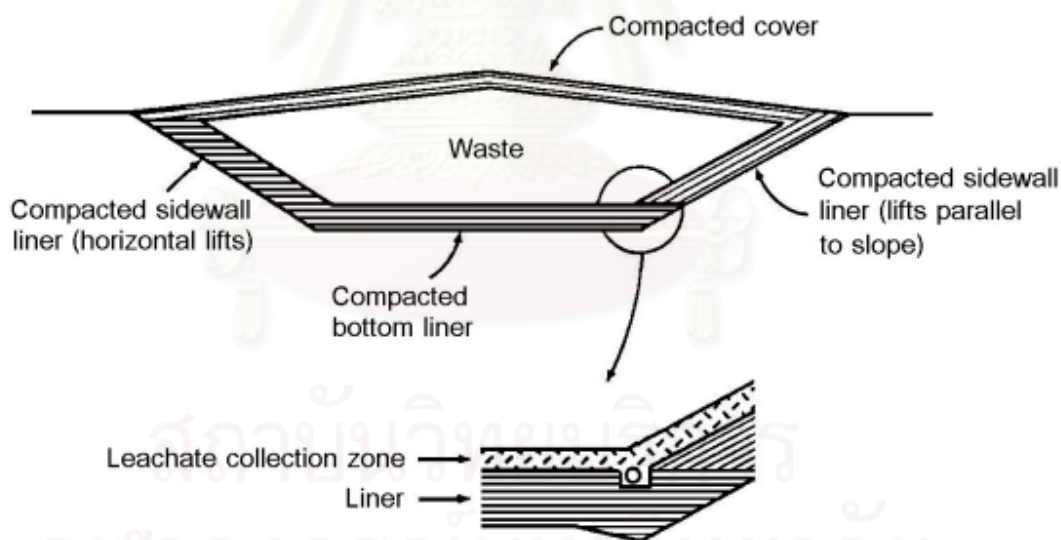
ในประเทศไทย หลุมฝังกลบขยะมูลฝอยยังถือว่าอยู่ในยุคเริ่มแรกกล่าวคือจากหลักฐานการสำรวจสถานที่เก็บขยะมูลฝอยจำนวน 114 แห่ง (78% ของทั้งหมด) ในปี พ.ศ.2543 โดย Scott A. Ashford และคณะพบว่า สามารถแบ่งลักษณะของสถานที่เก็บขยะมูลฝอยออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ประเภทเปิดโล่ง (Open Dumps) เป็นการเก็บขยะมูลฝอยที่ไม่ได้คำนึงถึงสภาพแวดล้อมใด ๆ ซึ่งอาจจะมีการเลือกสถานที่ที่มีเนื้อที่กว้างพอและไกลจากแหล่งชุมชนมากพอหรือไม่ก็

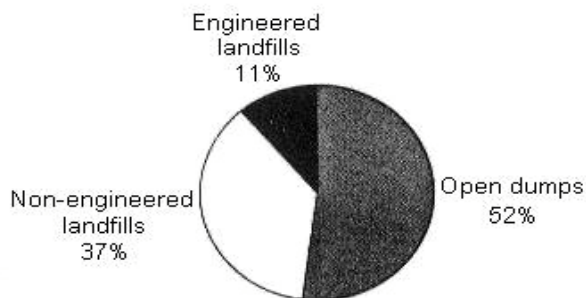
ได้ ลักษณะทั่วไปคือ ไม่มีการปรับพื้นที่ ไม่มีการปิดคลุมด้วยดิน สถานที่เก็บขยะมูลฝอยประเภทนี้มีอยู่เป็นจำนวนมากและจากผลสำรวจมีอยู่ถึง 52% ของ 114 แห่ง (ดูรูปที่ 2.2)

2. ประเภทไม่มีการออกแบบทางวิศวกรรม (Non-Engineered Landfills) เป็นการเก็บขยะมูลฝอยที่อิงกับกฎเกณฑ์การดำเนินการคือ มีการปกคลุมขยะรายวัน (Daily Cover) เพื่อเป็นการกำจัดปัญหาเรื่องกลิ่นและสัตว์อันตราย และมีการปกคลุมชั้นสุดท้ายเมื่อขยะเต็มพื้นที่ แต่ในบางแห่งก็ไม่มียงบประมาณในการปรับปรุงการดำเนินการใด ๆ เลย จากผลสำรวจพบว่าสถานที่เก็บขยะแบบนี้มีอยู่ถึง 37% ของ 114 แห่ง

3. ประเภทมีการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineered Landfills) เป็นการเก็บขยะมูลฝอยที่มีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ของหลุมกลบขยะดังกล่าวไว้แล้วอย่างครบถ้วน จากผลสำรวจพบว่าสถานที่เก็บขยะแบบนี้มีอยู่เพียง 11% ของ 114 แห่ง หรือเป็นจำนวน 12 แห่ง โดยที่ 10 แห่งในจำนวนนี้ถูกสร้างภายใน 4 ปีที่ผ่านมา รายละเอียดของระบบ Liner ของสถานที่เก็บขยะมูลฝอยทั้ง 10 แห่งนี้ถูกรวบรวมไว้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย



รูปที่ 2.2 แสดงผลสำรวจสถานที่เก็บขยะมูลฝอยภายในประเทศไทย 114 แห่ง (Ashford et al., 2000)
 ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของระบบ Liner ของหลุมฝังกลบขยะประเภทมีการออกแบบทางวิศวกรรม 10 แห่งในประเทศไทย (Ashford et al., 2000)

Province	Type of liner	Composition of liner system (from waste to foundation soil)	Foundation soil	
Chonburi	Composite	Coarse sand	300 mm	Medium to very dense fine sand (SW-SM and SM)
		Geotextile	NA*	
		HDPE	1.5 mm	
		Compacted clay	600 mm	
Rayong	Composite	Gravel	300 mm	Loose fine sand (SP)
		Geotextile	NA	
		HDPE	1.5 mm	
		Compacted clay	600 mm	
Chanthaburi	Composite	Coarse sand	300 mm	Sand
		Geotextile		
		HDPE	1.5 mm	
		Compacted clay	300 mm	
Nakhon Pathom	Composite	HDPE	1.0 mm	Medium to soft clay (CH)
Hua Hin	Composite	Coarse sand	300 mm	Fine to coarse cemented sand (SW)
		Geotextile	NA	
		HDPE	1.0 mm	
		Compacted clay	300 mm	
Nonthaburi	Composite	Coarse sand	300 mm	Very soft to soft clay and silty clay (CH and CL)
		Geotextile		
		HDPE	1.0 mm	
		Compacted clay	300 mm	
Krabi	Single	Coarse sand	300 mm	Clayey silt (ML)
		Compacted clay	1000 mm	

Nakhon Si Thammarat	Single	Coarse sand	300 mm	Very soft to soft silty clay (CL)
Nakhon Sawan	Single	Gravel	400 mm	Dense silty sand (SM)
		Geotextile	NA	
		HDPE	1.5 mm	
Pathum Thani	Composite	Compacted clay	300 mm	Very soft to soft clay and silty clay (CH and CL)
		HDPE	1.5 mm	

*NA = not applicable. +NS = not specified.

2.2 วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์ (Sand-Bentonite Mixture)

การใช้วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของชั้นวัสดุกันซึมในกรณีที่มีสภาพทางธรณีวิทยาไม่เหมาะแก่การใช้เป็นหลุมฝังกลบขยะเนื่องจากคุณสมบัติของดินที่มีความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงซึ่งอาจเป็นเพราะว่าดินมีลักษณะหยาบหรือเป็นดินทราย หรือดินที่มีรอยแตกจากการหดตัวด้วยความแห้งแล้ง หรือหินปูนร่อนกับที่ที่มีรอยแยกอยู่ภายใน เป็นต้น ยิ่งในกรณีที่เป็นดินทรายด้วยแล้วการปรับปรุงดินเดิมให้เหมาะสมกับมาตรฐานการก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะด้วยการนำทรายในที่ผสมกับเบนโทไนต์แล้วบดอัดจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย

คุณสมบัติความที่บ้น้ำของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม ดังนั้นคุณสมบัติความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมจึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความสามารถในการไหลซึมผ่านของเบนโทไนต์ (Kenney et al., 1992) โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของเบนโทไนต์ย้อมที่จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุผสมด้วย

เบนโทไนต์จัดว่าเป็นแร่ดินเหนียวที่เกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ มีต้นกำเนิดจากเถ้าถ่านภูเขาไฟ (volcanic ash) ซึ่งมีแร่ดินเหนียว montmorillonite เป็นองค์ประกอบหลัก และมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีความเป็นพลาสติก (plasticity) และความสามารถในการขยายตัว (swelling) สูงเมื่อดูดซับน้ำ จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นวัสดุถมกลับขณะที่ทำการก่อสร้าง slurry trench walls ใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในสิ่งก่อสร้างกันซึม ใช้เป็นวัสดุกันซึมสำหรับการติดตั้ง piezometer และอาจจะใช้ในงานพิเศษอื่น ๆ (Boyes, 1972; Odom, 1984) เบนโทไนต์ที่ใช้ในงานวิศวกรรมยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามชนิดของ exchangeable cation

ที่ผิวอนุภาคเบนโทไนต์เพื่อทำหน้าที่รักษาสมดุลงานประจุไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์ Isomorphous Substitution คือ (1) โซเดียม-เบนโทไนต์ (Na-bentonite) และ (2) แคลเซียม-เบนโทไนต์ (Ca-bentonite) ซึ่งเบนโทไนต์ทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติทั้งด้านดีและเสียที่แตกต่างกัน (Gleason Daniel and Eykholt, 1997)

ในสภาวะแห้งอนุภาคของ montmorillonite จะอยู่ในลักษณะเรียงชิดติดกันคล้ายหนังสือที่ปิดอยู่ซึ่งจะประกอบด้วยแผ่นผลึกบาง ๆ เป็นจำนวนมากเกาะยึดกันอย่างหลวม ๆ ด้วยพันธะ van der Waal และแรงจากไฮดรอนบวก เมื่อผสมเบนโทไนต์เข้ากับน้ำ น้ำจะถูกดูดเข้าไปที่ผิวของอนุภาค montmorillonite และที่ไฮดรอนบวกจนเกิดการรวมตัวขึ้นเป็นวงน้ำที่หนา และหนืดล้อมรอบแผ่นผลึก จึงเสมือนกับว่าอนุภาคเกิดการขยายตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ

ในสภาพที่เบนโทไนต์อยู่ร่วมกับทรายในวัสดุผสม อนุภาคของเบนโทไนต์จะถูกบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของทรายและเมื่อในสภาวะที่มีความชื้นอนุภาคของเบนโทไนต์จะขยายตัวเนื่องจากการดูดซับน้ำ ในกรณีที่อัตราส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน (void ratio) ของเบนโทไนต์มีค่าน้อยกว่าความสามารถในการขยายตัวอิสระ (free-swell capacity) อนุภาคของเบนโทไนต์จะถูกบีบอัดจนเต็มเนื้อที่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของทรายได้อย่างสมบูรณ์ในสภาพที่มีความชื้นที่เหมาะสม ในทางตรงกันข้าม ถ้าอนุภาคของเบนโทไนต์ไม่ถูกบรรจุจนเต็มเนื้อที่ของช่องว่างระหว่างอนุภาคทราย ก็จะเป็นผลให้เกิดช่องว่างที่เป็นน้ำอิสระ (free pore water) และเมื่อมีการเชื่อมต่อน้ำอิสระนี้จะทำให้เกิดช่องทางการไหลซึมซึ่งเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมของการไหลของวัสดุผสมโดยรวม ดังนั้นในทางทฤษฎี วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์ในอุดมคติ (idea mixtures) คือ วัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนต์เพียงพอที่จะบรรจุในช่องว่างระหว่างอนุภาคทรายจนเต็ม มีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ เป็นผลให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสม (k_m) ถูกควบคุมด้วยความสามารถในการไหลซึมผ่านของเบนโทไนต์ (k_b) และทรายเป็นเพียงแค่ส่วนที่บีบน้ำที่แทรกอยู่ในเนื้อของเบนโทไนต์เท่านั้น (Kenney, 1992)

Kenney กล่าวว่าถ้าการประมาณค่าต่ำสุดของความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดในอุดมคตินั้นสามารถทำได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายซึ่งมีสมมติฐานว่า

- - น้ำทั้งหมดจะจับตัวกับเบนโทไนต์ ในขณะที่ทรายจะมีลักษณะแห้งและไม่มีอนุภาคน้ำที่เป็นอิสระจากการยึดเกาะกับอนุภาคของเบนโทไนต์
- วัสดุผสมประกอบไปด้วยอนุภาคเบนโทไนต์ที่อิมมิดด้วยน้ำซึ่งมีความต่อเนื่องกันและทรายเป็นส่วนที่บีบน้ำแทรกอยู่ในกลุ่มอนุภาคเบนโทไนต์

- โครงสร้างของเบนโทไนต์ไม่ถูกรบกวนจากการมีอยู่ของอนุภาคทราย
- ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมในอุดมคติสามารถประมาณโดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับความสามารถในการไหลซึมผ่านของเบนโทไนต์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 k_m &= k_b \left[\frac{\text{cross - sectional area through bentonite}}{\text{total cross - sectional area of mixture}} \right] \\
 &= k_b \left[1 - \frac{\text{sand volume}}{\text{total volume}} \right] \quad \dots [1] \\
 &= \left[1 - \frac{\rho_{dm}}{(1+r)G_s \rho_w} \right] \\
 &\approx \frac{1}{2} k_b \quad \text{for many mixtures}
 \end{aligned}$$

เมื่อ	ρ_{dm}	=	ความหนาแน่นแห้งของวัสดุผสม
	ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำ
	G_s	=	ความถ่วงจำเพาะของทราย
	r	=	อัตราส่วนโดยมวลแห้งของเบนโทไนต์ต่อทราย

ความสามารถในการไหลซึมผ่านของเบนโทไนต์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินของเบนโทไนต์ (e_b) และ โครงสร้างของเบนโทไนต์ (fabric) โดยที่อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดินของเบนโทไนต์ในวัสดุผสมในอุดมคติขึ้นอยู่กับปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสมและปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคทรายที่เบนโทไนต์บรรจุอยู่อีกด้วย ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$e_b = G_s \left[\left(1 + \frac{1}{r} \right) \frac{\rho_w}{\rho_{dm}} - \frac{1}{r G_s} \right] - 1 \quad \dots [2]$$

เมื่อ G_s = ความถ่วงจำเพาะของเบนโทไนต์

ค่า e_b มีขอบเขตสูงสุดอยู่ที่สภาวะอิสระโดยไม่มีการบีบอัดจากปริมาตรที่จำกัด และเพื่อตรวจสอบว่าวัสดุผสมมีความสอดคล้องกับวัสดุผสมในอุดมคติหรือไม่ก็สามารถตรวจสอบได้จากการคำนวณ e_b จากสมการ [2] แล้วเปรียบเทียบกับอัตราส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคเบนโทไนต์ในสภาวะอิสระ ซึ่งถ้า e_b ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าก็แสดงว่าในวัสดุผสมยังมีส่วนที่เป็นน้ำอิสระอยู่และไม่สอดคล้องตามนิยามของวัสดุผสมในอุดมคติ

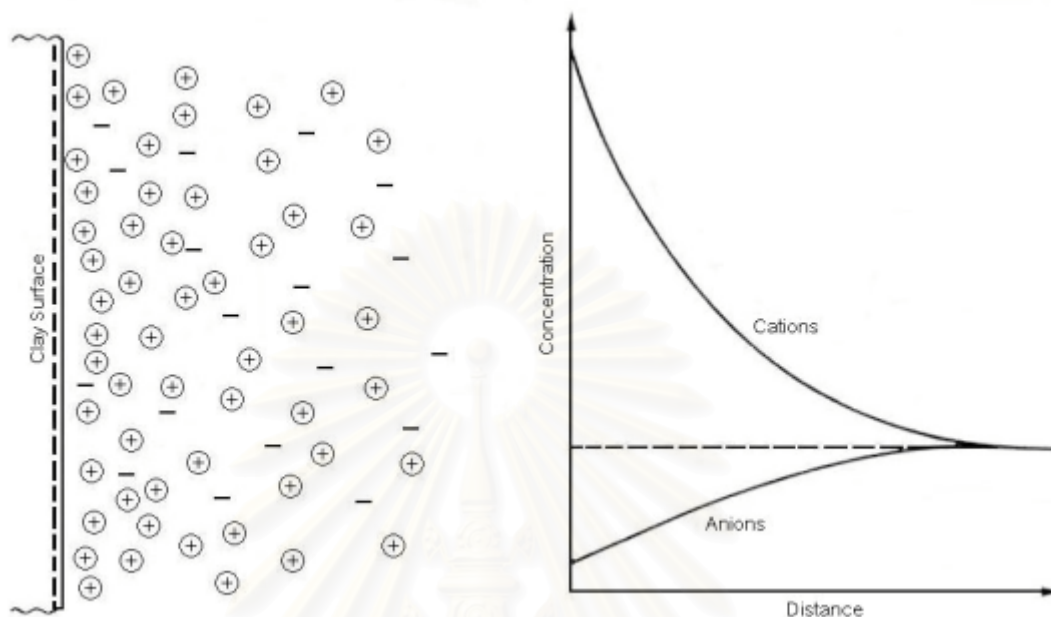
ผลงานที่ผ่านมาเกี่ยวกับวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดมีทั้งการศึกษาคุณสมบัติโดยรวม (Mollin et al., 1995) และการแยกศึกษาตามคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ กันไม่ว่าจะเป็นด้านความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำและน้ำเกลือ (Olson and Daniel, 1981; Zimmie et al., 1981; Daniel et al., 1985; Kenney et al., 1992; Stern et al., 1998) ด้านการประมาณค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Chapuis, 1990) ด้านการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินเมื่ออยู่ร่วมกับ aniline (Gnanapragasam et al., 1995) ด้านกำลัง (Mollin et al., 1999) ด้านการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Dineen et al., 1999) เป็นต้น

2.3 ทฤษฎีวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว (Diffuse Double Layer Theory)

ตามธรรมชาติ อนุภาคของดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่น โดยที่ผิวของอนุภาคจะมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นลบ (negative charge) ในขณะที่ที่ขอบของอนุภาคจะมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวก (positive charge) การที่ผิวโดยรอบของอนุภาคดินเหนียวมีค่าประจุไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ Isomorphous Substitution จึงเป็นเหตุให้ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวเกิดความไม่สมดุลย์ทางประจุไฟฟ้าและยังมีความจำเป็นที่จะดึงดูดเอาอนุภาคที่มีค่าประจุไฟฟ้าที่อยู่โดยรอบมา รักษาสมดุลย์ดังกล่าว ดังนั้นการมีอยู่ของอนุภาคดินเหนียวจึงประกอบด้วยอนุภาคดินเหนียวซึ่งถูกล้อมรอบด้วยไอออนบวกที่มีการดูดซับน้ำ (hydrated cations) ที่ผิวของอนุภาคและที่ขอบของอนุภาคจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนลบที่มีการดูดซับน้ำ (hydrated anions) เช่นกัน แต่พื้นที่ผิวบริเวณขอบนี้เป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้น ไอออนที่มีการดูดซับน้ำและอยู่โดยรอบอนุภาคดินเหนียวนี้เองที่ถูกเรียกว่า “วงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว (diffuse double layer)” และขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวจะมีผลต่อแรงกระทำระหว่างกันของอนุภาคในทฤษฎี Colloid Theory โดยไม่พิจารณาแรงจากน้ำหนักของอนุภาค เนื่องจากดินเหนียวมีขนาดอนุภาคเล็กมาก Rowe Quigley และ Booker (1995) กล่าวว่า ถึงแม้ว่าส่วนใหญ่ขนาดของอนุภาคดินเหนียวจะใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร ถึง 1 นาโนเมตรมาก แต่อนุภาคดินเหนียวยังคงมีพฤติกรรมแบบสาร colloids เพราะว่าอนุภาคดินเหนียวมีค่าประจุไฟฟ้าที่เป็นลบซึ่งเป็นผลให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินเหนียวมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพมากกว่าปัจจัยที่มาจากแรงโน้มถ่วงของโลก

รูปร่างแบบแผ่นของอนุภาคดินเหนียวดังกล่าว เป็นผลให้ในทางการศึกษาจึงเน้นที่พื้นผิวอนุภาคทางด้านที่มีค่าประจุไฟฟ้าเป็นลบและดึงดูดเอาไอออนบวกที่มาพร้อมกับน้ำเป็นหลัก ซึ่งจากการที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวมีค่าประจุไฟฟ้าลบย่อมจะทำให้เกิดศักย์ทางไฟฟ้า (potential, ψ) หรือแรงดึงดูดประจุไฟฟ้าตรงข้ามให้วิ่งเข้าหาผิวอนุภาคดินเหนียว ในกรณีที่ไม่มีการขวางกั้นของอนุภาคอื่น ๆ และแรงผลักประจุไฟฟ้าแบบเดียวกันให้วิ่งออกจากผิวอนุภาค ศักย์

ทางไฟฟ้าที่ว่านี้จะมีค่าลดลงตามระยะห่างจากผิวอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้นและเป็นผลให้เกิดการกระจายตัวของไอออนและความเข้มข้นของไอออนของทั้งไอออนบวกและลบตามระยะห่างจากผิวอนุภาคดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะตามธรรมชาติของอนุภาคดินเหนียว

ทฤษฎีที่อธิบายถึงลักษณะของวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวมีอยู่หลายทฤษฎี ซึ่งทฤษฎีของ Gouy และ Chapman (Gouy-Chapman Theory) เป็นที่ยอมรับกันมากที่สุด (Gouy, 1910; Chapman, 1913) ทฤษฎีของ Gouy และ Chapman มีสมมติฐานที่ว่า

- ไอออนที่กระจายตัวอยู่ในวงน้ำมีลักษณะเป็นจุด ไม่มีขนาด และไม่มีแรงกระทำซึ่งกันและกัน

- ค่าประจุไฟฟ้าบนผิวอนุภาคดินเหนียวมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

- ผิวของอนุภาคดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นกว้างมากเมื่อเทียบกับขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว

- ความสามารถในการจัดเรียงตัวในสนามไฟฟ้าของตัวกลางไม่ขึ้นกับตำแหน่ง

Gouy-Chapman Theory อธิบายศักย์ทางไฟฟ้าตามระยะห่างจากผิวอนุภาคดินเหนียวไว้ว่า

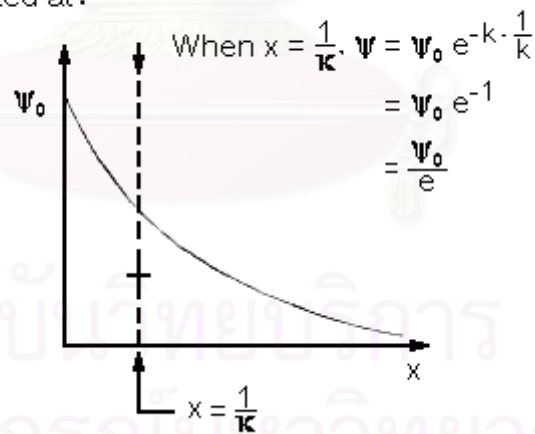
$$\psi = \psi_0 e^{-\kappa x}$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{4\pi\theta^2 \sum n_{i0} z_i^2}{\epsilon k T}} \quad \dots [3]$$

เมื่อ	n_{i0}	=	conc. of ions (i) in bulk suspension
	z_i	=	valence of ions
	k	=	Boltzmann's constant (1.38×10^{-16} erg/ $^{\circ}$ K)
	T	=	Absolute temperature ($^{\circ}$ K)
	kT	=	0.4×10^{-13} erg at room temperature
	ϵ	=	dielectric constant of pore fluid
	e	=	elementary charge = 4.77×10^{-10} esu
		=	16.0×10^{-20} Coulomb
		=	2.71828

จากสมการอธิบายค่าศักย์ทางไฟฟ้าดังกล่าว เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของพื้นที่ได้กราฟระหว่างค่าศักย์ทางไฟฟ้ากับระยะทางจะอยู่ที่ $x = 1/\kappa$ และการอธิบายต่าง ๆ ในปัจจุบันได้นิยามค่าขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวให้เท่ากับ $1/\kappa$ ดังรูปที่ 2.4 (Mitchell, 1993)

Center of prsvity of double layer
located at:



รูปที่ 2.4 แสดงการนิยามขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวให้มีค่าเท่ากับ $1/\kappa$

2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว

จากการนิยามให้ขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวมีค่าเท่ากับ $1/\kappa$ พบว่าในสมการมีปัจจัยอยู่หลายประการที่มีผลต่อขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวซึ่งจะแยกออกมาอธิบายดังนี้

2.4.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าของของเหลวภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวดังนี้

$$\frac{1}{x} \propto \frac{1}{\sqrt{z_0}}$$

นั่นก็หมายความว่าถ้าความเข้มข้นของประจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้ขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวลดลงเนื่องมาจากการลดศักย์ทางไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและการลดลงของศักย์ทางไฟฟ้าตามระยะทางที่เร็วขึ้น แต่ในทางกลับกันความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าตามระยะทางจากผิวของอนุภาคดินเหนียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเพราะว่าไอออนพยายามที่จะกระจายตัวเพื่อรักษาค่าประจุไฟฟ้าโดยรวมของระบบเป็นผลให้เกิดการผลักไอออนให้เข้าใกล้ผิวของอนุภาคดินเหนียวมากขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ทางไฟฟ้าตามระยะทางจากผิวอนุภาคดินเหนียวแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 (a)

2.4.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าประจุไฟฟ้าของไอออนบวก

เมื่อพิจารณาในระบบที่มีความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าโดยรวมเท่ากัน และผิวอนุภาคดินเหนียวมีค่าประจุไฟฟ้าลบเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงค่าประจุของไอออนบวกจะมีผลกระทบต่อศักย์ทางไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียว รูปที่ 2.5 (b) แสดงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าประจุไฟฟ้าของไอออนบวกดังกล่าว

จากรูปจะพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าประจุไฟฟ้าของไอออนบวกจาก $+Z$ (Na^+) เป็น $+2Z$ (Ca^{2+}) มีผลทำให้ความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าตามระยะทางจากผิวอนุภาคดินเหนียวมีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีความต้องการจำนวนไอออนบวกของ Ca^{2+} น้อยกว่าในระบบที่เป็นไอออนบวก Na^+ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าไอออน Ca^{2+} 1 ตัวสามารถเทียบได้กับไอออน Na^+ 2 ตัวที่เข้ารักษาภาพสมดุลย์ทางประจุไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคดินเหนียว และการแปรผันของขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวตามค่าประจุไฟฟ้าของไอออนบวกยังสามารถแสดงได้จาก Gouy-Chapman Theory ดังนี้

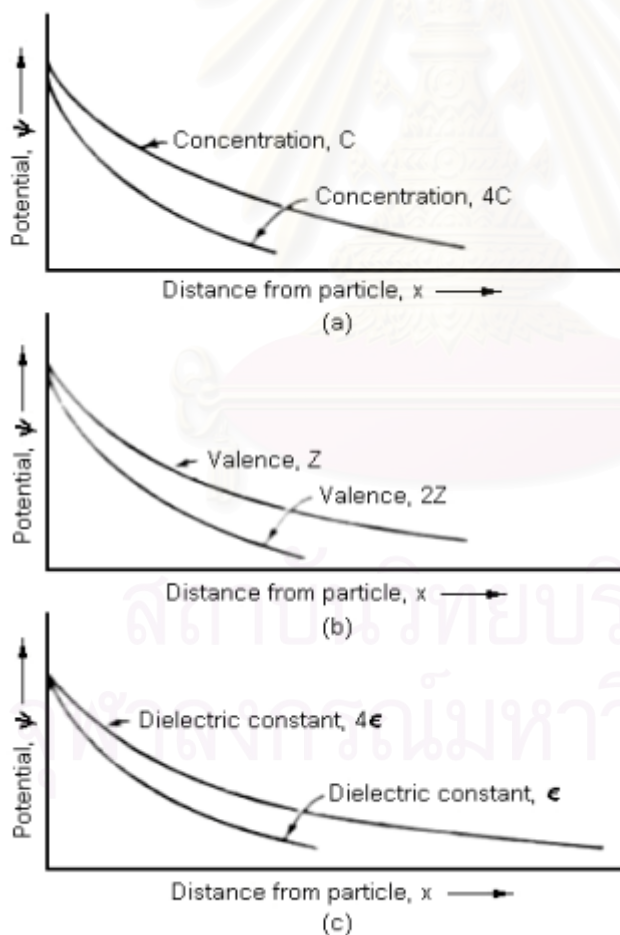
$$\frac{1}{x} \propto \frac{1}{z}$$

2.4.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant

การเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant มีอิทธิพลต่อทั้งศักย์ทางไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและขนาดวงนํ้ารอบอนุภาคดินเหนียว เมื่อค่าประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวคงที่ การลดลงของค่า dielectric constant จะมีผลทำให้กราฟศักย์ทางไฟฟ้าและขนาดวงนํ้ารอบอนุภาคดินเหนียวลดลงตามไปด้วยหรืออาจแสดงการเปลี่ยนแปลงตามกันได้ว่า

$$\frac{1}{\kappa} \propto \sqrt{\epsilon}$$

รูปที่ 2.5 (c) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ทางไฟฟ้ากับระยะทางจากผิวของอนุภาคดินเหนียวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant โดยปกติ การเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant ย่อมหมายความว่าถึงถึงการเปลี่ยนแปลงชนิดของของเหลวในระบบจากนํ้าไปเป็นสารเคมีอื่น ๆ เช่น นํ้ามัน หรือ สารอินทรีย์ที่เป็นของเหลว เป็นต้น ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนในกรณีของชั้นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะที่ต้องสัมผัสกับนํ้าชะมูลฝอยอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ทางไฟฟ้ากับระยะจากผิวของอนุภาคดินเหนียว (a) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของประจุไฟฟ้า (b) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าประจุไฟฟ้า (c) ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant

2.4.4 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากสมการ [3] การเพิ่มอุณหภูมิของระบบในขณะที่ยังคงที่ปัจจัยอื่นคงที่จะส่งผลให้วงนํ้ารอบอนุภาคดินเหนียวมีขนาดใหญ่ขึ้นและศักย์ทางไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคดินเหนียวลดลง แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่า dielectric constant ลดลง เป็นผลให้ขนาดของวงนํ้ารอบอนุภาคดินเหนียวลดลง การเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant ตามอุณหภูมิของนํ้าแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 ดังนั้นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงควรพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่า ϵT ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵT เพียงเล็กน้อยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่ได้มีอิทธิพลต่อขนาดของวงนํ้ารอบอนุภาคดินเหนียวมากนัก ตารางที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า dielectric constant ตามอุณหภูมิของนํ้า

T (°C)	T (°K)	Dielectric Constant (ϵ)	ϵT
0	273	88	2.40×10^4
20	293	80	2.34×10^4
25	298	78.5	2.34×10^4
60	333	66	2.20×10^4

2.4.5 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของไอออน

Gouy-Chapman Theory อาจจะเป็นการประมาณความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวที่เป็นไปไม่ได้ เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าไอออนไม่มีขนาด แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้น ดังนั้นความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าที่ผิวอนุภาคดินเหนียวที่แท้จริงควรมีค่าน้อยกว่าที่ประมาณไว้ ขนาดของไอออนบวกที่ดูดซับนํ้าไว้แล้ว (hydrated cations) สามารถนำมาประมาณค่ามากที่สุดที่เป็นไปได้ของความเข้มข้นของประจุไฟฟ้านี้ ขนาดของไอออนบวกที่ดูดซับนํ้าไว้แล้วบางชนิดแสดงไว้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดของไอออนบวกที่ดูดซับนํ้าไว้บางชนิด

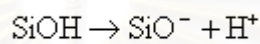
Ion	Hydrated Radius (Å)	Ion	Hydrated Radius (Å)
Li ⁺	7.3-10.0	Cs ⁺	3.6-5.0
Na ⁺	5.6-7.9	Mg ⁺	10.8
K ⁺	3.8-5.3	Ca ²⁺	9.6
NH ⁺	5.4	Sr ²⁺	9.6
Rb ⁺	3.6-5.1	Ba ²⁺	8.8

Gouy-Chapman Theory จึงถูกปรับปรุงโดยนำเอาขนาดของไอออนมาพิจารณาไว้ด้วย (Stern, 1924; Carnie and Torrie, 1984) ทฤษฎีที่ได้รับการปรับปรุงที่เรียกว่า "Stern's

theory“ จึงถูกเสนอโดย Van Olphen (1977) Stern's theory กล่าวไว้ว่า ผนังรอบอนุภาคดินเหนียวประกอบด้วยไอออนที่เรียงชิดติดกันที่บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียว (Stern layer) และถัดออกไปเป็นไอออนที่กระจายตัวอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ผลจากการปรับปรุงโดย Stern layer ในเชิงของศักย์ทางไฟฟ้าและความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าตามระยะทางจากผิวของอนุภาคดินเหนียวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และจาก Stern's theory นี้พบว่า การเพิ่มขนาดของไอออนจะทำให้ขนาดผนังรอบอนุภาคดินเหนียวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

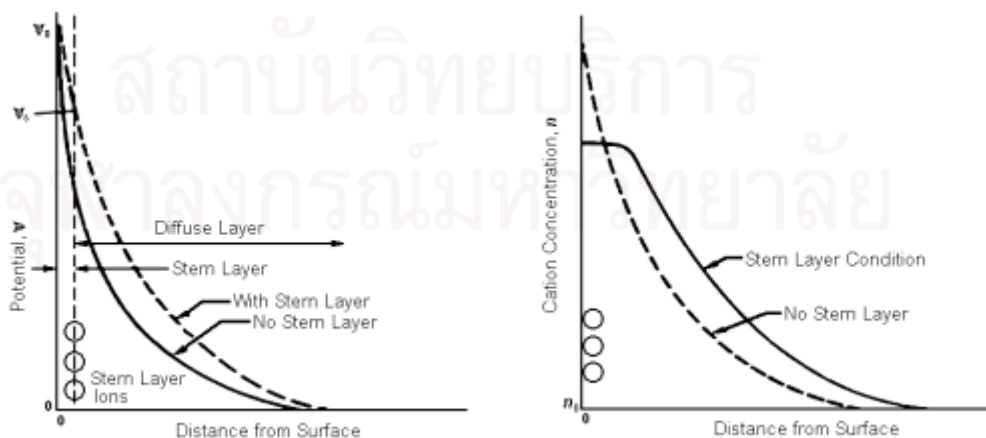
2.4.6 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า pH

อนุภาคดินเหนียวมีส่วนประกอบที่เป็น hydroxyl (OH^-) ที่ผิวและขอบของอนุภาคซึ่งจะมีแนวโน้มการแตกตัวในน้ำดังสมการทางเคมีนี้



การแตกตัวจะมีการแปรเปลี่ยนได้อย่างมากขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH การเพิ่มค่า pH จะส่งผลให้ไอออนของไฮโดรเจน (H^+) มีแนวโน้มที่จะออกไปอยู่ในรูปของสารละลายได้มากขึ้น และทำให้ค่าประจุไฟฟ้าลบที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวมีกำลังมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น alumina ที่ขอบของอนุภาคดินเหนียวจะมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวกในสภาพ pH ต่ำ และจะเป็นลบในสภาพ pH สูง เป็นผลให้ในสภาพที่เป็นกรด (pH ต่ำ) ขอบของอนุภาคดินเหนียวสามารถดึงดูดไอออนลบที่มาพร้อมกับน้ำได้อีกด้วย

ดังนั้นในสภาพเป็นกรดค่าประจุไฟฟ้าบวกที่ขอบของอนุภาคดินเหนียวจะพยายามดึงดูดผิวอนุภาคดินเหนียวที่มีค่าประจุไฟฟ้าลบให้เข้าหากันทำให้เกิดโครงสร้างแบบระเกะระกะ (flocculation) ในขณะที่โครงสร้างที่มีความเสถียรมากกว่าที่เป็นแบบเป็นระเบียบ (dispersion) จะเกิดในสภาพที่เป็นเบส



รูปที่ 2.6 แสดงผลการปรับปรุงทฤษฎี Gouy-Chapman Theory ด้วย Stern layer

2.4.7 ผลกระทบจากการดูดซับไอออนลบ

ไอออนลบบางพวกอาจจะยึดติดและกลายเป็นส่วนหนึ่งของผิวหรือขอบของอนุภาคดินเหนียวซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มของค่าประจุไฟฟ้าในทางลบ ไอออนลบที่สามารถทำให้เกิดค่าประจุไฟฟ้าลบที่ขอบของอนุภาคดินเหนียวจึงสามารถลดการเกิดโครงสร้างที่เป็นแบบขอบชนผิว (edge to face) ของอนุภาคดินเหนียวได้ ด้วยเหตุนี้ไอออนลบดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้เป็นสารลดการเกิดโครงสร้างแบบระเกะระกะ (deflocculating agent) ของดินเหนียวที่อยู่ในสถานะสารแขวนลอย เช่น ฟอสเฟต แแทนเนต เป็นต้น

ยังมีการศึกษาที่ไม่แน่ชัดว่าดินเหนียวอาจจะมีการแทนที่ไอออนลบบนผิวของอนุภาคแม้ว่าการแทนที่ (OH)⁻ ด้วยไอออนลบอื่นอาจจะเป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้

จากผลกระทบที่กล่าวมาทั้งหมด ไม่เพียงแต่จะมีผลกระทบต่อขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดินเหนียวเท่านั้น หากจะยังมีผลกระทบต่อแรงผลักระหว่างอนุภาคดินเหนียวซึ่งขึ้นอยู่กับ การซ้อนทับกันของวงน้ำที่มีประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันอีกด้วย ในขณะเดียวกัน อนุภาคของดินเหนียว ก็มีแรงดึงดูดที่เกิดจากพันธะ van der Waals แต่จะไม่มีเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมของระบบมากนัก แรงลัพท์ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคดินเหนียวจะเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างของดิน (soil structure) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.5 การแทนที่ของไอออนบวกที่ผิวอนุภาคดินเหนียว (Cation Exchange)

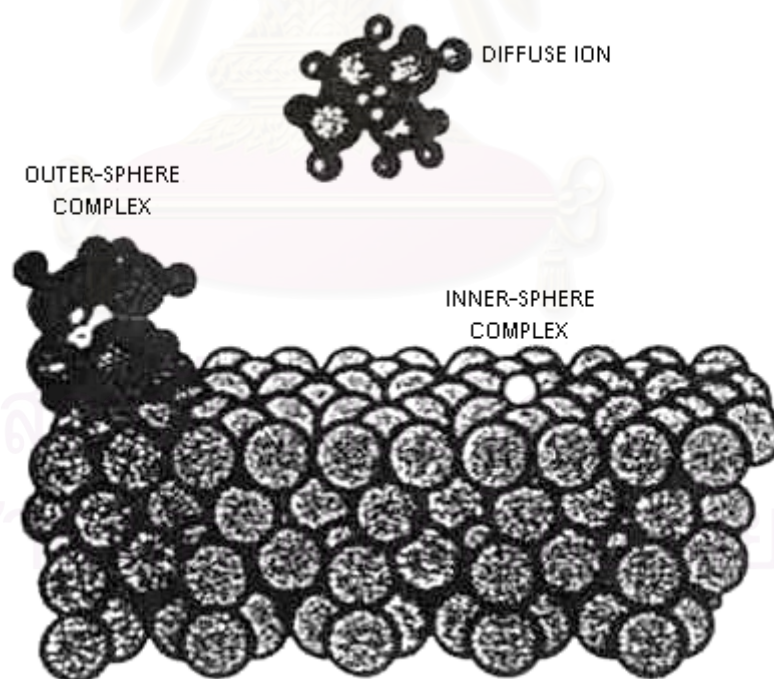
ภายใต้สภาพแวดล้อมหนึ่ง ดินเหนียวจะดึงดูดเอาไอออนบวกชนิดและจำนวนหนึ่งเข้าไปกับอนุภาค การดึงดูดไอออนบวกเข้าไปเพื่อต้องการรักษาสมดุลย์ทางประจุไฟฟ้าที่เกิดจากค่าประจุไฟฟ้าเป็นลบที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของไอออนบวกตามการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมย่อมทำให้เกิดการเข้าไปแทนที่ของไอออนบวกที่มีอยู่แล้วด้วยไอออนบวกของสภาพแวดล้อมใหม่ขึ้นได้ แม้ว่าการเข้าไปแทนที่นี้ โดยปกติจะไม่มีผลต่อโครงสร้างของดินเอง แต่ก็อาจจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของดินได้ สาเหตุของการแทนที่ไอออนบวกแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ปรากฎการณ์ isomorphous substitution โดยปกติในอนุภาคดินเหนียว Si^{4+} ในแผ่น silica จะถูกแทนที่ด้วย Al^{3+} และ Al^{3+} ในแผ่น octahedral จะถูกแทนที่ด้วย Mg^{2+} ไอออนบวกจะถูกดึงดูดเข้าไปติดกับผิว cleavage เพื่อรักษาสมดุลย์ทางประจุไฟฟ้า ซึ่งกลไกนี้เป็นสาเหตุหลักที่มีผลต่อปริมาณการแทนที่ไอออนบวก ยกเว้นในแร่ดินเหนียวพวก Kaolin

2. การพังทลายของพันธะ (Broken bonds) การแทนที่ของไอออนบวกอาจเกิดที่ขอบหรือส่วนที่ไม่ใช่ cleavage ได้ การพังทลายของพันธะอาจจะเป็นสาเหตุสำคัญของปริมาณการแทนที่ของไอออนบวกในแร่ดินเหนียว kaolinite แต่จะเป็นเพียง 20% ของทั้งหมดในแร่ดินเหนียว smectite สำหรับแร่ดินเหนียวชนิดหนึ่ง ความสำคัญของการแตกของพันธะจะมีอิทธิพลมากขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคดินเหนียวเล็กลง

3. การแทนที่ (Replacement) ไฮโดรเจนของ hydroxyl จะถูกแทนที่ด้วยไอออนบวกอื่น ๆ

เนื่องจากปริมาณการเข้าไปแทนที่ของไอออนบวกของแต่ละสาเหตุขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมหลาย ๆ อย่างและปัจจัยทางองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว ดังนั้นความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของแร่ดินเหนียว (exchange capacity) จึงมีค่าแปรปรวนได้ในช่วง 1 ถึง 150 meq/100 gm (ซึ่งเป็นหน่วยการวัดปริมาณไอออนที่สามารถถูกแทนที่ได้ต่อน้ำหนักดินเหนียวแห้ง 100 กรัม) โดยที่ค่า exchange capacity หมายถึงจำนวนของไอออนบวกในอนุภาคดินเหนียวที่สามารถถูกแทนที่ได้โดยง่ายด้วยการถูกชะด้วยสารละลายที่มีไอออนบวกจำพวกอื่นที่มีความสามารถในการแทนที่ (replacing power) สูงกว่า กลไกการดึงดูดไอออนบวกไว้กับผิวของ silicate ถูกอธิบายไว้โดย Sposito (1989) ดังรูปประกอบที่ 2.7



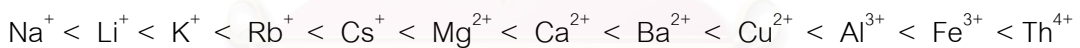
รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการดึงดูดไอออนบวกบนผิวของ silicate เช่น montmorillonite (Sposito, 1989)

Sposito แบ่งไอออนบวกที่ถูกดึงดูดเข้าไว้กับผิวของ silicate ออกเป็น 3 พวก

- พวกแรกคือ Inner sphere cations เป็นไอออนที่ยึดติดในโพรง hexagonal บนผิวของ silicate ซึ่งจะไม่มีการเข้ากันระหว่างไอออนกับพื้นผิวของ silicate ไอออนจะถูกพันธะไอออนิก (Ionic Bonding) หรือโควาเลนต์ (Covalent Bonding) ตรึงไว้กับพื้นผิวจึงไม่สามารถถูกแทนที่ได้
- พวกสองคือ Outer sphere cations เป็นไอออนบวกที่มาพร้อมกับน้ำซึ่งถูกดึงดูดเข้ามาติดกับพื้นผิวด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า
- พวกสามคือ Diffuse cations เป็นไอออนบวกที่มาพร้อมกับน้ำซึ่งอยู่ห่างออกไปจากพื้นผิวและอยู่กันเป็นกลุ่มก้อนภายใต้ศักย์ทางไฟฟ้า

ไอออนบวกที่สามารถถูกแทนที่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมคือพวกสองและสามซึ่งมีแรงดึงดูดกับพื้นผิวด้วยแรงทางประจุไฟฟ้าเท่านั้น

เมื่อพิจารณาความสามารถในการแทนที่ของไอออนแต่ละชนิดพบว่า ในขณะที่ปัจจัยอื่นคงที่ ไอออนบวกที่มีค่าประจุไฟฟ้าเป็น +3 จะถูกดึงดูดไว้กับผิวของอนุภาคดินเหนียวได้ดีกว่า ไอออนบวกที่มีค่าประจุไฟฟ้าเป็น +2 และในทำนองเดียวกันไอออนบวกที่มีค่าประจุไฟฟ้าเป็น +2 จะถูกดึงดูดไว้ได้ดีกว่าไอออนบวกที่มีค่าประจุไฟฟ้าเป็น +1 ลำดับของความสามารถในการแทนที่ของไอออนบวกบางชนิดมีดังนี้



อย่างไรก็ตามไอออนบวกที่มีความสามารถในการแทนที่น้อยกว่าสามารถเข้าแทนที่ไอออนบวกที่มีความสามารถในการแทนที่สูงกว่าได้ในกรณีที่สภาพแวดล้อมมีปริมาณของไอออนบวกที่มีความสามารถในการแทนที่น้อยกว่าอยู่เป็นจำนวนมาก (ความเข้มข้นสูง) เมื่อเทียบกับไอออนที่มีความสามารถในการแทนที่สูงกว่า

อัตราการเข้าไปแทนที่ของไอออนบวกของอนุภาคดินเหนียวแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่สามารถถูกแทนที่ได้ของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแร่ดินเหนียวพวก kaolite ปฏิกริยาการแทนที่ไอออนบวกจะเกิดขึ้นในทันที แร่ดินเหนียวพวก illite อาจจะต้องใช้เวลาประมาณ 2 ถึง 3 ชั่วโมง เพราะตำแหน่งที่มีการแทนที่ไอออนบวกส่วนหนึ่งอาจจะอยู่ระหว่างแผ่นพื้นฐาน (unit layer) และในแร่ดินเหนียวพวก smectite ยิ่งจะต้องใช้เวลานานกว่าเนื่องจากตำแหน่งในการแทนที่ไอออนบวกส่วนใหญ่อยู่ภายในแผ่นพื้นฐาน

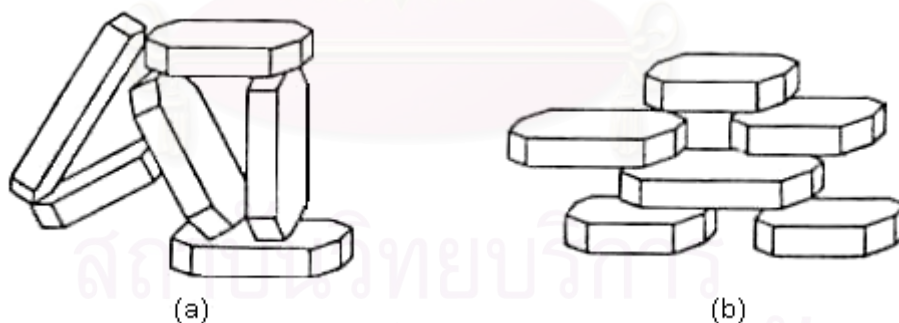
2.6 โครงสร้างของดิน (Soil Structure)

โครงสร้างของดินจะถูกอ้างอิงกับการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของอนุภาคดินในก้อนดินรวมและจะรวมไปถึงแรงกระทำระหว่างอนุภาคใกล้เคียงกันด้วย การอธิบายที่จะกล่าวถึงจะใช้กับดินที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีรูปร่างเป็นแผ่น ซึ่งเป็นลักษณะของอนุภาคดินเหนียว โดยโครงสร้างของดินจะขึ้นกับแรงลัทธิทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคใกล้เคียง ส่วนดินที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะไม่เป็นไปตามทฤษฎีนี้

โครงสร้างของดินแบ่งได้ออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ด้วยกันคือ

1. โครงสร้างแบบระเกะระกะ (flocculated structure) เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อแรงลัทธิระหว่างอนุภาคดินเป็นแรงดูด (attractive force) แต่ละอนุภาคจะวางตัวกันแบบขอบต่อผิว ดังรูปที่ 2.8 (a) ดินที่มีโครงสร้างในลักษณะนี้จะมีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการไหลซึมผ่านสูง แต่มีความสามารถในการยุบตัวต่ำ

2. โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (dispersed structure) เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อแรงลัทธิระหว่างอนุภาคดินเป็นแรงผลักร (repulsive force) แต่ละอนุภาคจะวางตัวในแนวขนานกันและพยายามที่จะผลักรตัวออกจากกันดังรูปที่ 2.8 (b) ดินที่มีโครงสร้างในลักษณะนี้จะมีกำลังต้านทานแรงเฉือนและความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำ แต่มีความสามารถในการยุบตัวสูง



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของดิน (a) แบบระเกะระกะ (b) แบบเป็นระเบียบ

อย่างไรก็ตามโครงสร้างของดินทั้งสองแบบไม่สามารถถูกแบ่งได้อย่างชัดเจน ดังนั้นคำว่า “ระเกะระกะ” และ “เป็นระเบียบ” จึงเป็นเพียงการบอกในเชิงของแนวโน้มของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินว่าเป็นไปในลักษณะใดมากกว่ากัน

แรงลัพท์ทางไฟฟ้าเคมีระหว่างอนุภาคดินประกอบด้วยแรงดูดและแรงผลัก โดยที่แรงผลักจะได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมรอบ ๆ อนุภาคดินที่ส่งผลต่อขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดิน ในขณะที่แรงดูดจะค่อนข้างคงที่และไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมของระบบ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของดินที่เป็นผลจากแรงลัพท์ระหว่างอนุภาคดินขึ้นอยู่กับแรงผลักที่มีความสัมพันธ์กับขนาดวงน้ำรอบอนุภาคดินที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อมของระบบ

โดยปกติ โครงสร้างของดินมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบระเกะระกะเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งตัวจากปัจจัยดังนี้

ความเข้มข้นของไอออน

ประจุไฟฟ้าของไอออน

อุณหภูมิ

หรือเมื่อมีการลดลงของปัจจัยเหล่านี้

ค่า dielectric constant

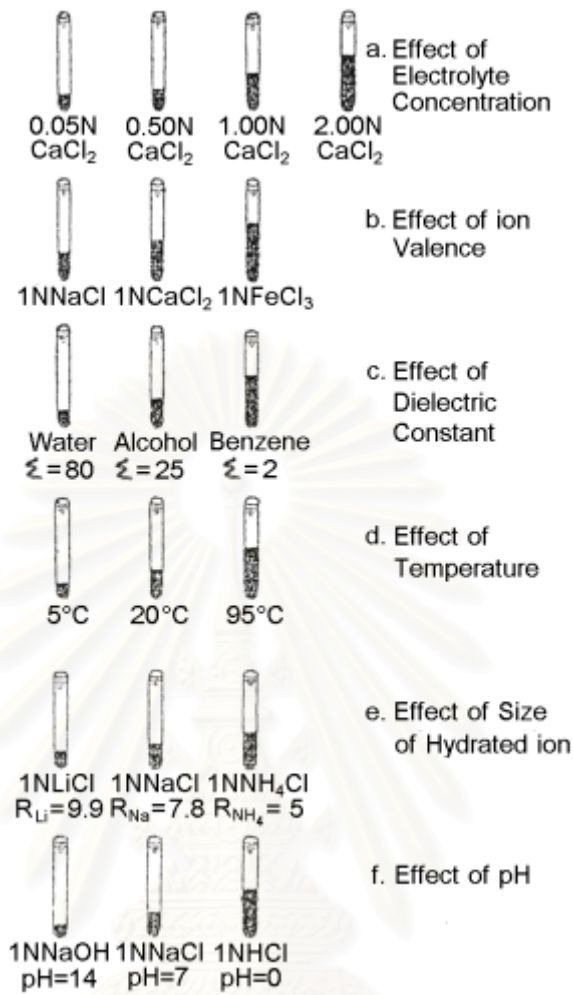
ขนาดของไอออนที่ดูดซับน้ำ

ค่า pH

การดูดซับไอออนลบ

จากการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปัจจัยดังกล่าวนี้เป็นผลให้วงน้ำรอบอนุภาคดินมีขนาดเล็กลง แรงลัพท์ระหว่างอนุภาคดินลดลง แรงลัพท์เป็นไปในทางดูดมากขึ้น อนุภาคมีการเกาะติดกันแบบขบขนิมมากขึ้น จนสุดท้ายเกิดโครงสร้างที่เป็นแบบระเกะระกะมากขึ้นนั่นเอง โครงสร้างของดินที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของระบบสามารถศึกษาได้จากการตกตะกอนของดินในระบบดินและน้ำในสถานะสารแขวนลอย (soil-water suspension) ในหลอดทดลอง โดยแต่ละหลอดจะใช้น้ำหนักของดินเท่ากัน ผลการศึกษาแสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 (William Lambe, 1958)

ลำดับหลอดทดลองจากซ้ายไปขวามีลักษณะโครงสร้างจากแบบเป็นระเบียบไปเป็นแบบระเกะระกะ โดยในหลอดทดลองที่มีปริมาตรสูงเกิดจากการตกตะกอนที่มีการจัดเรียงตัวกันแบบหลวม ๆ มีช่องว่างระหว่างอนุภาคดินสูง ในขณะที่หลอดที่มีปริมาตรต่ำจะตกตะกอนโดยมีการจัดเรียงตัวกันเป็นแบบขนาน ทำให้เกิดช่องว่างในดินน้อยกว่า

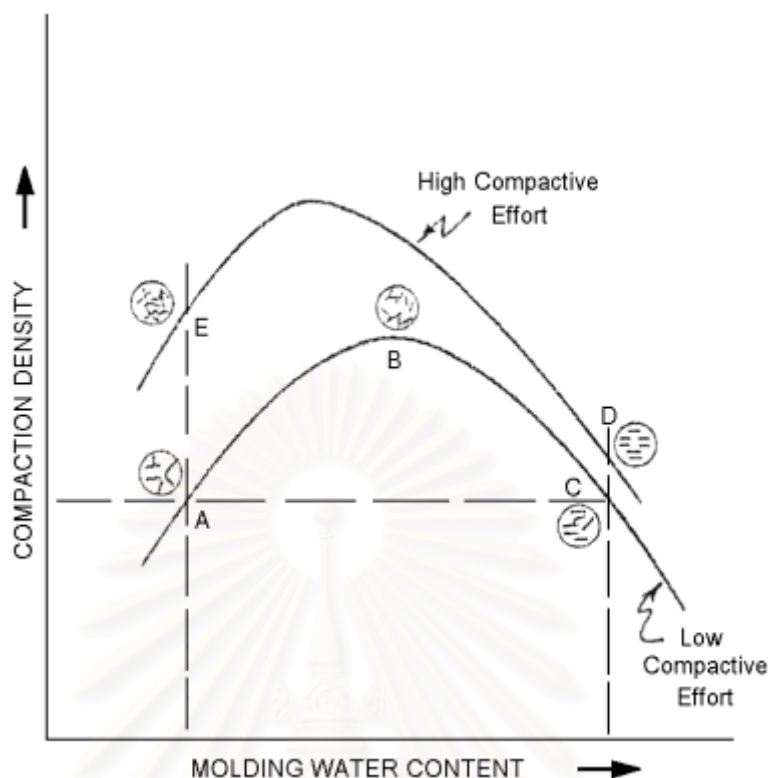


รูปที่ 2.9 แสดงการศึกษาโครงสร้างของดินในหลอดทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบ (William Lambe, 1958)

2.7 ทฤษฎีการบดอัด (Theory of Compaction)

ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงจะเจาะจงเฉพาะกับการบดอัดดินเหนียวเท่านั้น โดยจะอธิบายถึงพฤติกรรมของดินเหนียวบดอัดซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้ง (dry density) กับปริมาณความชื้นในการบดอัด (molding water content) ดังรูปที่ 2.10

หลักการสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของดินเหนียวตามกราฟการบดอัดมีอยู่ว่า “อนุภาคของดินเหนียวภายใต้สภาวะของหน่วยแรงเค้นค่าหนึ่งจะมีความต้องการน้ำในปริมาณหนึ่งที่จะเข้ามาพัฒนาวงน้ำรอบอนุภาคดินให้สมบูรณ์ ผลต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ต้องการกับปริมาณน้ำที่มีอยู่คือปริมาณน้ำที่ขาดแคลนซึ่งอนุภาคดินพยายามที่จะดูดซับเข้ามา” (William Lambe, 1958)



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟการบดอัดที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของดิน

ที่จุด A ในรูปที่ 2.10 ปริมาณน้ำในการบดอัดไม่เพียงพอต่อการนำไปพัฒนาวงน้ำรอบอนุภาคดินได้อย่างสมบูรณ์ ปริมาณน้ำน้อยจะส่งผลให้ความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าสูงซึ่งจะบีบให้วงน้ำเล็กลง การลดลงของวงน้ำทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคดินลดลงตามไปด้วยและเป็นผลให้เกิดโครงสร้างที่มีแนวโน้มเป็นแบบระเกะระกะซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ

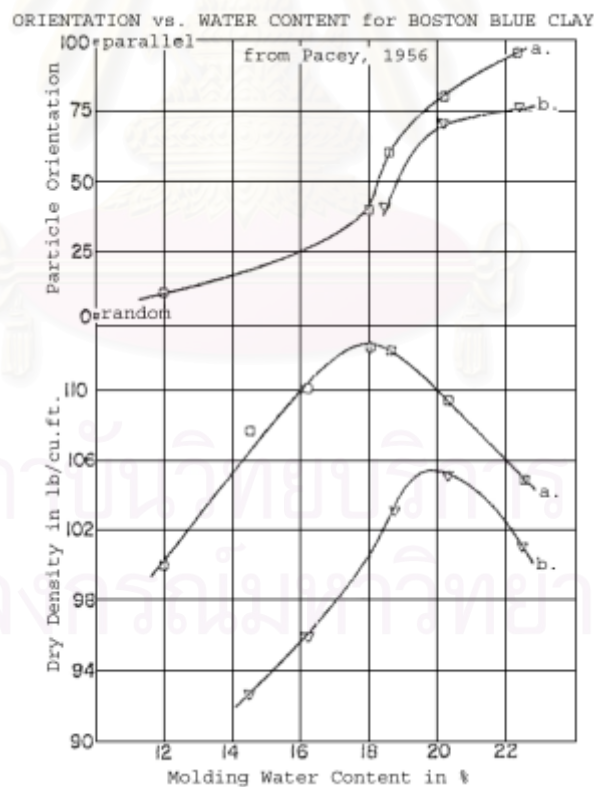
การเพิ่มขึ้นของความชื้นในการบดอัดจาก w_A เป็น w_B จะช่วยขยายวงน้ำรอบอนุภาคดินและลดความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าซึ่งการขยายตัวของวงน้ำนี้จะช่วยลดปริมาตรส่วนที่เป็นอากาศลง เกิดแนวโน้มของโครงสร้างแบบระเกะระกะลดลงโดยที่อนุภาคจัดเรียงตัวเป็นแบบระเบียบมากขึ้นจึงเป็นผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้น

เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในการบดอัดมากขึ้นจาก w_B เป็น w_C เป็นผลให้วงน้ำรอบอนุภาคดินขยายตัวมากขึ้น แรงผลักระหว่างอนุภาคดินมากขึ้น เกิดโครงสร้างแบบเป็นระเบียบมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน การเพิ่มปริมาณน้ำก็เป็นการเพิ่มสัดส่วนของน้ำในระบบรวมของดินและน้ำด้วย (ไม่มีการแทนที่ในส่วนที่เป็นอากาศเหมือนการเพิ่มความชื้นจาก w_A เป็น w_B)

การเพิ่มขึ้นของพลังงานในการบดอัดจากกราฟล่างเป็นกราฟบนที่ปริมาณความชื้นเดียวกันดังรูปที่ 2.10 จะทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นและโครงสร้างมีลักษณะแบบเป็นระเบียบมากขึ้น

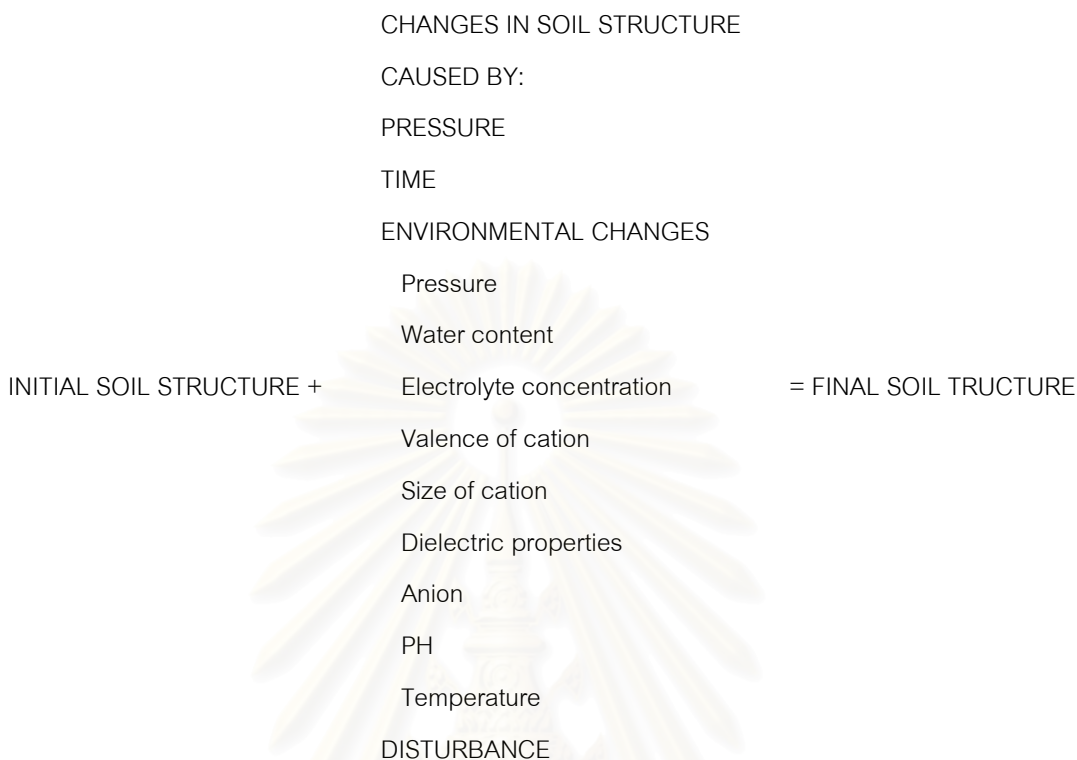
ในกราฟการบดอัดนี้มีสิ่งที่สำคัญอยู่ 2 ประการคือ 1) ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) และ 2) ความชื้นที่เหมาะสมซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นแห้งสูงสุด (OMC) ตัวอย่างบดอัดที่ปริมาณความชื้นน้อยกว่า OMC จึงถูกเรียกว่า “dry side” และในทำนองเดียวกันตัวอย่างบดอัดที่ปริมาณความชื้นมากกว่า OMC จึงถูกเรียกว่า “wet side”

ผลการทดลองของ Pacey (1956) ซึ่งเป็นการวัดลักษณะของโครงสร้างดินโดย Mitchell's technique ดังรูปที่ 2.11 เป็นข้อมูลที่สนับสนุนการอธิบายข้างต้นได้เป็นอย่างดี และต่อมา Tiles (1956) ได้ทำการวัดลักษณะของโครงสร้างดินทางอ้อมจากความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะโครงสร้างของดินกับพฤติกรรมการหดตัว (shrinkage) กล่าวคือ การจัดเรียงตัวของอนุภาคดินในแบบขนานกัน (แบบเป็นระเบียบ) ย่อมทำให้เกิดการหดตัวเนื่องจากความแห้งได้มากกว่าดินชนิดเดียวกันที่มีโครงสร้างแบบกระจัดกระจาย โดยผลการทดลองก็เป็นไปในทางสนับสนุนการอธิบายข้างต้นเช่นกัน



รูปที่ 2.11 แสดงผลการทดลองวัดลักษณะของโครงสร้างดินโดย Mitchell's technique (Pacey, 1956)

อย่างไรก็ตามโครงสร้างของดินเหนียวบดอัดอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในภายหลังได้จากปัจจัยหลายอย่างซึ่งสรุปไว้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินเหนียวบดอัดในภายหลัง

2.8 กลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน

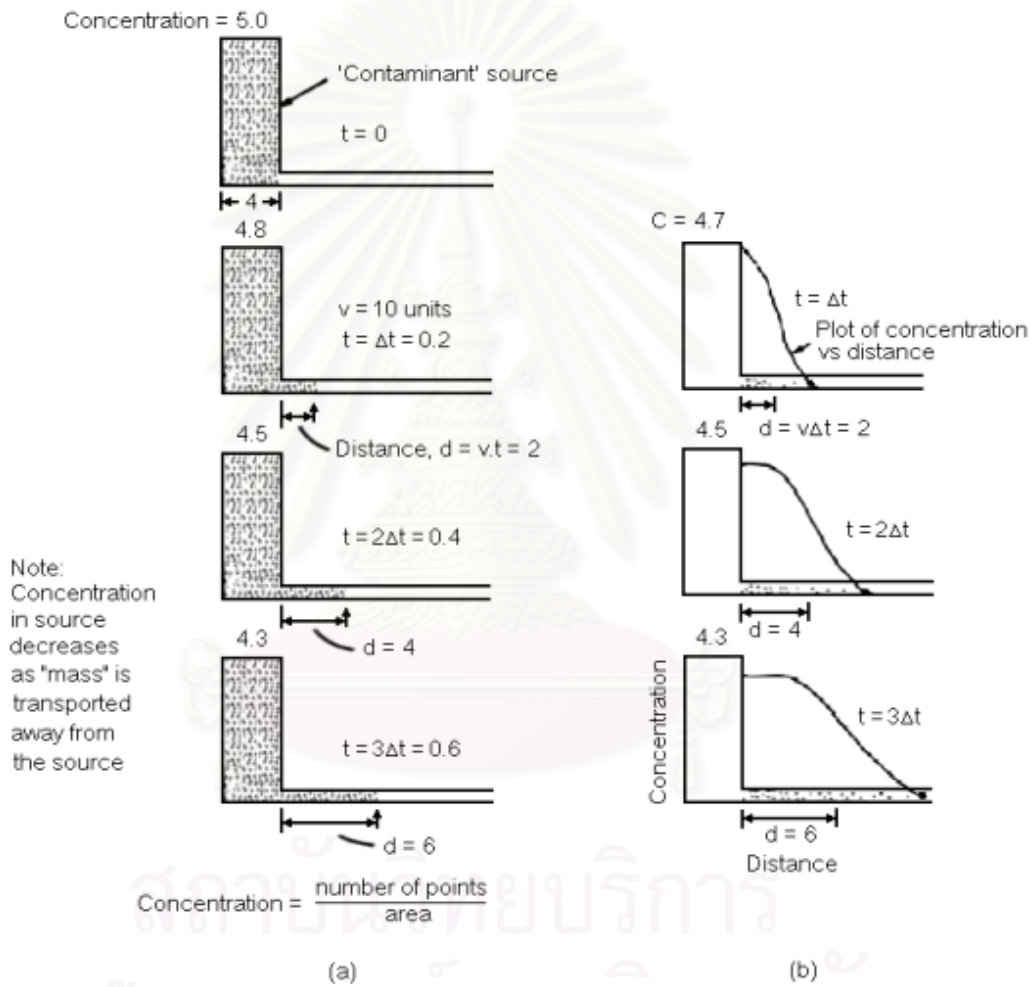
สารปนเปื้อนสามารถกระจายตัวได้ด้วยกลไกหลายประการซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสภาพแวดล้อมของระบบ กลไกที่สำคัญมีดังนี้

2.8.1 Advective transport

เป็นกลไกการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนไปพร้อมกับการไหลของของเหลวผ่านดิน ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านการไหลซึมผ่านของดิน (Hydraulic Conductivity) ในดินทรายที่มีความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงย่อมทำให้เกิดการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนได้เร็ว เมื่อเทียบกับดินเหนียวซึ่งมีความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำกว่ามาก รูปที่ 2.13 (a) แสดงลักษณะการแพร่กระจายด้วยกลไกนี้พร้อมกับการลดลงของความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ณ แหล่งกำเนิด และความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตามระยะทางคงที่ เพราะฉะนั้นในกรณีที่ไม่มีการไหลของของเหลวหรือมีอัตราการไหลซึมผ่านอย่างช้ามากย่อมทำให้การกระจายตัวของสารปนเปื้อนเป็นไปได้ช้าเช่นกันและเป็นเหตุผลให้มีข้อกำหนดของชั้นวัสดุกันซึมความสามารถในการไหลซึมผ่านต้องมีค่าต่ำกว่า 1.0×10^{-7} ซม./วินาที

2.8.2 Diffusive transport

เป็นกลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนเนื่องจากความต่างศักย์ทางความเข้มข้นทางเคมีของสารเคมี (สารปนเปื้อน) การกระจายตัวจะเกิดขึ้นในทิศทางจากที่ที่มีความเข้มข้นของสารเคมีที่สูงกว่าไปหาที่ที่มีความเข้มข้นของสารเคมีที่ต่ำกว่า โดยที่ความเข้มข้นของสารเคมีตามระยะทางจะมีค่ามากขึ้นใกล้กับที่ที่มีความเข้มข้นมากและจะมีค่าน้อยทางด้านที่ที่มีความเข้มข้นต่ำ กลไกนี้จะเป็นกลไกหลักของการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนในดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำมาก ๆ อย่างดินเหนียวบดอัดซึ่งจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้ากว่ากลไก advective



รูปที่ 2.13 แสดงกลไกการแพร่กระจายของสารปนเปื้อน (a) advective (b) advective-diffusive

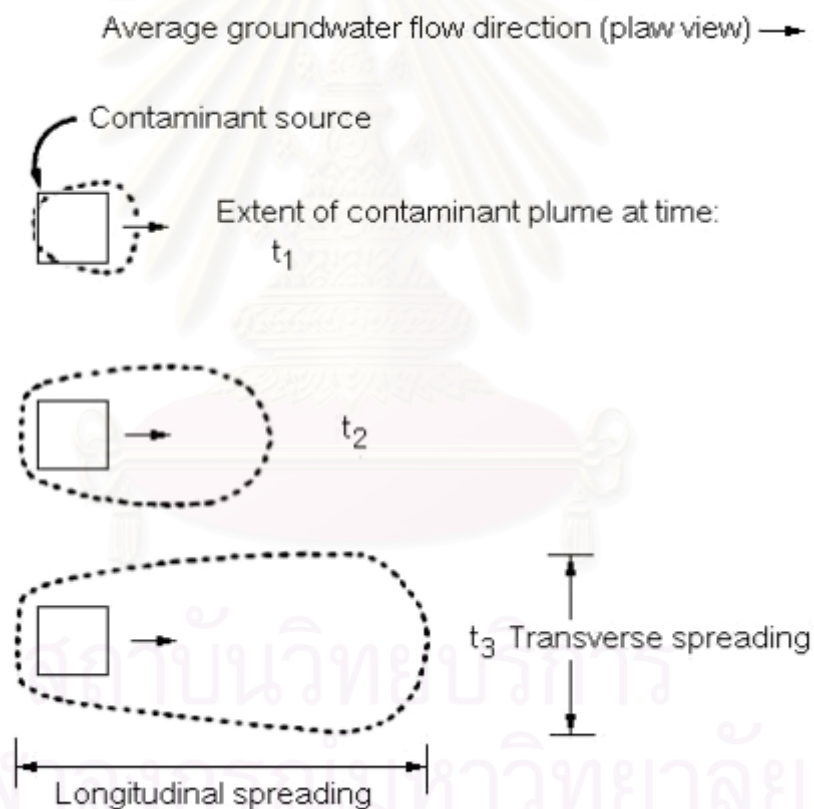
2.8.3 Advective-diffusive transport

เป็นกลไกที่เกิดร่วมกันระหว่างกลไก advective และ diffusive ดังนั้นการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนในลักษณะนี้จะมีรูปแบบที่ผสมผสานกันของกลไกทั้งสองดังกล่าว รูปที่ 2.13 (b) แสดงการแพร่กระจายตัวของสารปนเปื้อนด้วยกลไก advective-diffusive ซึ่งจะมีการลดลง

ของความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ณ จุดกำเนิดตามเวลา และความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตามระยะทางจะไม่คงที่ กลไกนี้เป็นกลไกที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามธรรมชาติมากที่สุด

2.8.4 Dispersion

เมื่อการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเกิดขึ้นในขณะที่มีการไหลของของเหลวในดินอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดกลไกที่เรียกว่า “mechanical dispersion” กลไกนี้จึงเกี่ยวกับการผสมผสานของสารปนเปื้อนกับน้ำที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนของความเร็วของการไหลตามตำแหน่ง หรืออาจจะกล่าวได้ว่ากลไก dispersion เป็นกลไกที่เกี่ยวกับการผสมผสานและการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนในดินที่ไม่มีความสม่ำเสมอ (nonhomogeneity) (Freeze and Cherry, 1979) รูปที่ 2.14 แสดงการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนด้วยกลไก advective ในทิศทางตามยาว และกลไก dispersion ในทั้งทิศทางตามยาวและตามขวางเมื่อเทียบกับทิศทางการไหลของน้ำ



รูปที่ 2.14 แสดงการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนด้วยกลไก advective และ dispersion

2.9 ทฤษฎีความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน

การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านดินในเชิงมหภาคเป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Darcy (Darcy's law) ดังนี้

$$Q = kiA \quad \dots[4]$$

เมื่อ	Q	=	อัตราการไหล
	k	=	ความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Hydraulic conductivity)
	i	=	ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient)
		=	$\frac{\Delta H}{L}$
	ΔH	=	ความแตกต่างของแรงดันน้ำที่เทียบเป็นความสูง
	L	=	ระยะทางการไหลในเชิงมหภาค
	A	=	หน้าตัดการไหล

Darcy's law ถูกจำกัดไว้กับการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หรือเป็นการไหลที่ค่อนข้างช้า ดังนั้นการนำไปใช้จึงถูกจำกัดไว้กับดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กซึ่งมีอัตราการไหลซึมผ่านที่ต่ำ

ดินแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการไหลซึมผ่านที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลซึมผ่าน ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการยอมให้น้ำหรือของเหลวไหลซึมผ่านและบอกได้ถึงอัตราการระบายน้ำออกจากมวลดินในขณะที่ถูกหน่วยแรงภายนอกกระทำ Terzaghi และ Peck (1967) ได้จำแนกดินโดยใช้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงการจำแนกดินตามค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Terzaghi and Peck, 1967)

Degree of Permeability	Value of k (cm/sec)
High	Over 10^{-1}
Medium	10^{-1} - 10^{-3}
Low	10^{-3} - 10^{-5}
Very low	10^{-5} - 10^{-7}
Practically impermeable	Less than 10^{-7}

การทดลองหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง และสามารถทำได้ทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ แต่เนื่องจากในภาคสนามมีความยุ่งยากจากสภาพภูมิประเทศและค่าใช้จ่ายในการทดลองที่สูงจึงเป็นเหตุให้การทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นที่นิยมมากกว่า อย่างไรก็ตามการทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องคำนึงถึงปัจจัยอีกหลายอย่างที่เป็นผลให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านที่ได้มีค่าใกล้เคียงความจริงอีกด้วย

การทดลองในห้องปฏิบัติการได้นำเอา Darcy's law มาประยุกต์ใช้ และสามารถแบ่งประเภทของการทดลองได้ตามสภาพของแรงดันน้ำที่เหนี่ยวนำให้เกิดความชันทางชลศาสตร์ดังนี้

1. แบบแรงดันคงที่ (constant head) เป็นการทดลองที่ควบคุมแรงดันน้ำที่เหนี่ยวนำให้เกิดการไหลคงที่ (ความชันทางชลศาสตร์คงที่) ดังรูปที่ 2.15 (a) ซึ่งเหมาะกับการทดลองในดินทรายซึ่งมีความสามารถในการไหลซึมผ่านสูง ข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินภายในเวลาที่กำหนด (Q) ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า i และ A ในสมการของ Darcy สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

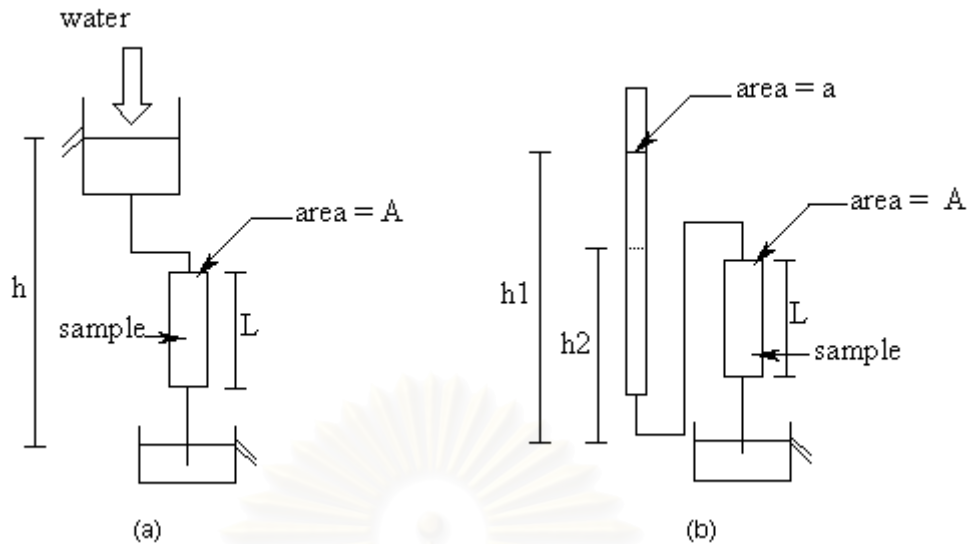
$$k = \frac{QL}{thA} \quad \dots[5]$$

เมื่อ Q = ปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินในเวลา t
 h = ความต่างของระดับด้านต้นน้ำกับด้านปลายน้ำ

แบบแรงดันเปลี่ยนแปลง (variable head, falling head) เป็นการทดลองที่มีการลดลงของแรงดันน้ำที่เหนี่ยวนำให้เกิดการไหล (ความชันชลศาสตร์ไม่คงที่) ดังรูปที่ 2.15 (b) ซึ่งเหมาะกับการทดลองในดินเหนียวหรือดินที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือค่าระดับน้ำทางด้านต้นน้ำขณะที่เริ่มทดลองและที่เวลาที่กำหนด (h_1, h_2) ในเวลาที่สอดคล้องกัน (t) สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$k = 2.3 \frac{aL}{At} \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \dots[6]$$

เมื่อ a = พื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดน้ำเข้าตัวอย่าง
 h_1 = ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดเริ่มการทดลอง
 h_2 = ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดสิ้นสุดการทดลอง



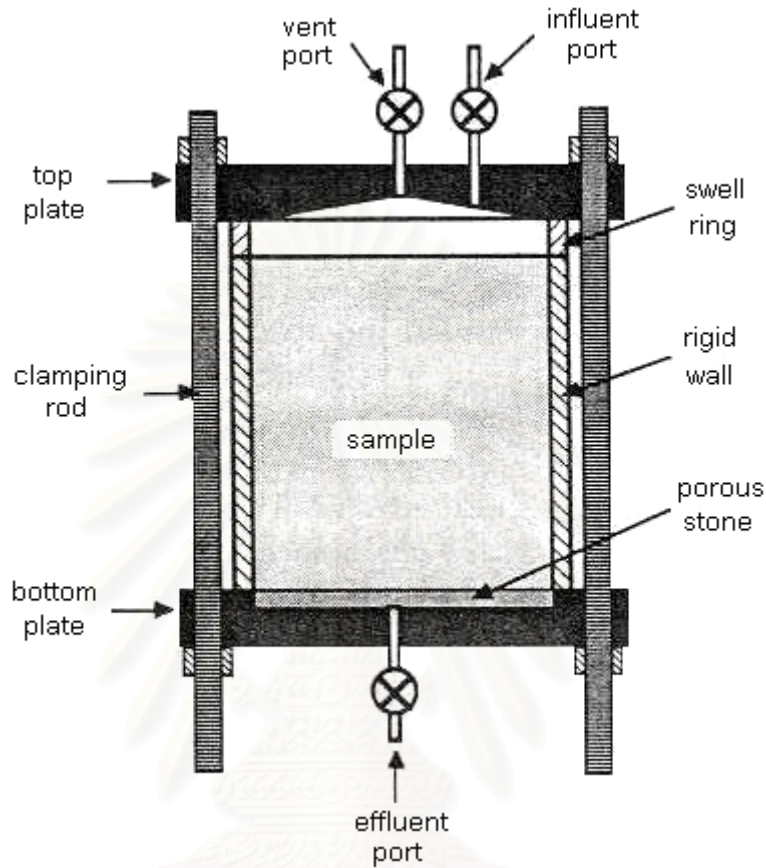
รูปที่ 2.15 แสดงการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน (a) แบบแรงดันคงที่ (b) แบบแรงดันเปลี่ยน

ยิ่งไปกว่านั้น การทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเหนียวดัดอัดยังสามารถจำแนกการทดลองออกไปได้อีกตามลักษณะของผนังตัวอย่างดังนี้

1. แบบผนังไม่ยืดหยุ่น (fixed wall, rigid wall) เป็นการทดลองในกระบอกดัดอัด (compacting mold) ดังรูปที่ 2.16 และสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งแบบแรงดันคงที่และแบบแรงดันเปลี่ยน สิ่งที่สำคัญในการทดลองคือการป้องกันการไหลข้างที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับผนังที่ไม่มี ความยืดหยุ่น โดยที่การให้แรงดันกดทับกับตัวอย่างเป็นหนทางหนึ่งของการลดปัญหานี้ ดังนั้นการทดลองวิธีนี้ที่แรงดันกดทับที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับกันว่าให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับความจริง และน่าเชื่อถือกว่าวิธีผนังยืดหยุ่น อย่างไรก็ตามการทดลองด้วยวิธีนี้อาจเกิดปัญหาต่าง ๆ ขึ้นได้ เช่น

- การทดลองที่ไม่มีแรงดันกดทับบนตัวอย่างจะทำให้ผลการทดลองล้มเหลวเนื่องจากการไหลข้างที่มากเกินไปกว่าการไหลผ่านตัวอย่างและเป็นตัวควบคุมการไหลโดยรวม
- ดินแข็งที่มีรอยร้าวภายในอาจจะต้องให้แรงดันกดทับบนตัวอย่างสูง
- เพราะว่าการทดลองนี้โดยส่วนใหญ่แล้วไม่มีการให้แรงดันน้ำทางด้านท้ายน้ำ (back pressure) กับตัวอย่าง ตัวอย่างจึงอยู่ในสภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งอาจจะเป็นผลดีหรือไม่ก็ได้เนื่องจากดินในสนามอยู่ในสภาพนี้เช่นกัน ดังนั้นทางออกคือการบดอัดที่ปริมาณความชื้นมากกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ประมาณ 2% ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างดินอยู่ในระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำ (degree of saturation) มากกว่า 95%

- การทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอยผ่านตัวอย่างดินอาจทำให้ผลของการไหลข้างมีมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคดินเกิดการหดตัว ดังนั้นจึงควรที่จะทดลองที่ปริมาณแรงดันกดทับหลาย ๆ ค่า

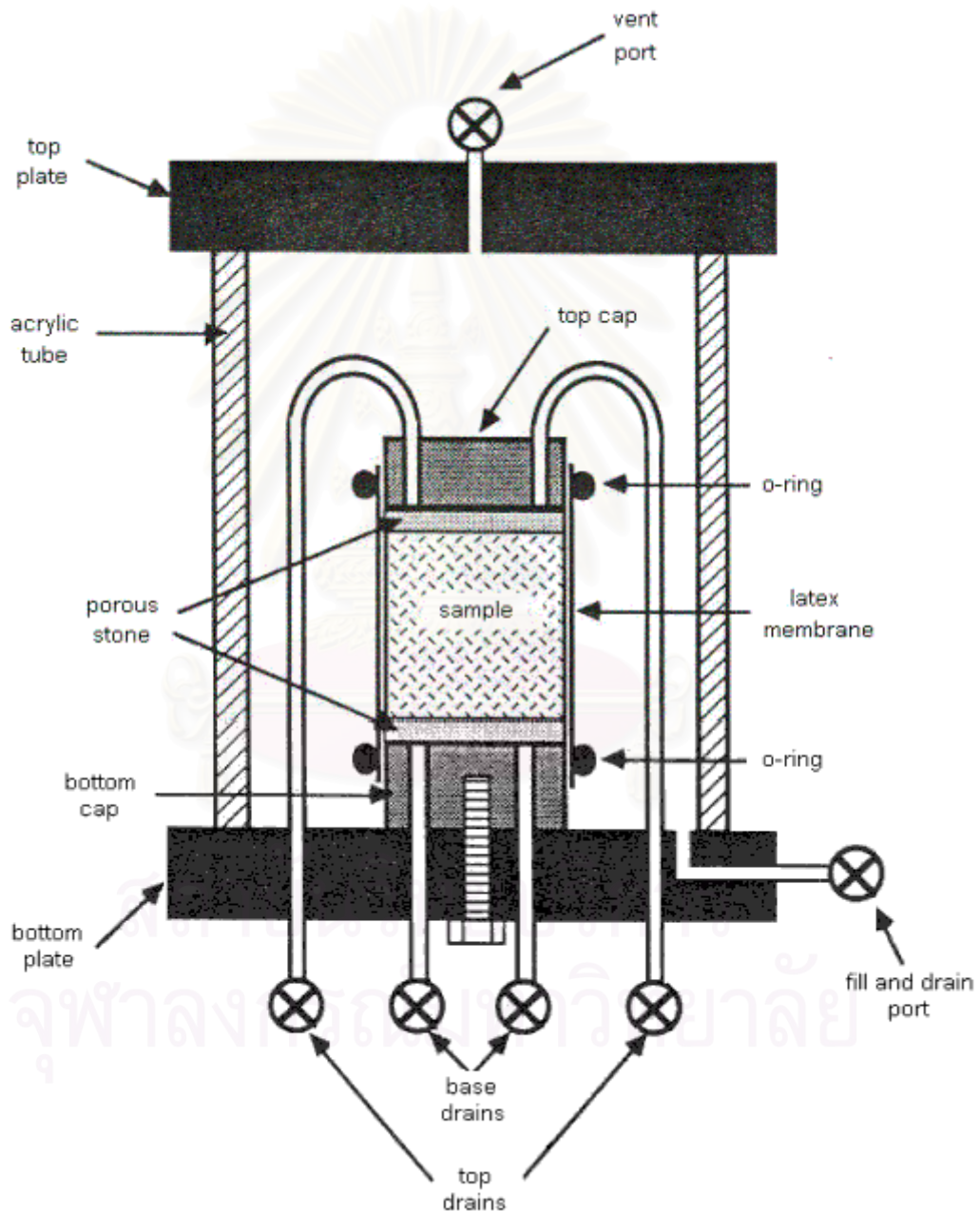


รูปที่ 2.16 แสดงการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบผนังไม่ยืดหยุ่น (rigid wall, fixed wall)

2. แบบผนังยืดหยุ่น (flexible wall) เป็นการทดลองใน triaxial cell โดยจะมีการห่อหุ้มตัวอย่างไว้ด้วยถุงยาง (membrane) ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะมีข้อดีที่ว่าสามารถทำให้ตัวอย่างดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มขึ้นได้ด้วยการให้แรงดันด้านท้ายน้ำเพื่อละลายอากาศที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยปกติแล้วดินที่สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างเต็มที่จะให้ค่าที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ของความสามารถในการไหลซึมผ่าน การทดลองวิธีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียคือ

- ข้อจำกัดของ cell pressure ทำให้ไม่สามารถใช้ความชันชลศาสตร์ที่สูงได้ซึ่งเป็นผลให้การทดลองอาจจะต้องใช้เวลานานมาก

- ผลการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการไหลซึมผ่านเนื่องจากการหดตัวของอนุภาคดินเมื่อทดลองกับน้ำชะมูลฝอยอาจไม่สังเกตเห็นเนื่องจากการบีบรัดตัวของถุ่ยงตามการหดตัวของตัวอย่างซึ่งเป็นผลจากการใช้ cell pressure
- สามารถทดลองได้ในสภาพหน่วยแรงเค้นที่ต่ำมาก ๆ
- การทดลองนี้อาจจะเหมาะสมกับตัวอย่างดินพวกหินหรือดินเหนียวแข็งที่มีรอยแตกร้าวภายในเท่านั้น



รูปที่ 2.17 แสดงการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบผนังยืดหยุ่น (flexible wall)

ดินชนิดเดียวกันยังอาจจะมีคุณสมบัติด้านความสามารถในการไหลซึมผ่านได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. ของเหลวที่ไหลซึมผ่าน (permeant) ของเหลวแต่ละชนิดย่อมมีคุณสมบัติที่ต่างกักัน หรือแม้กระทั่งของเหลวชนิดเดียวกันยังมีคุณสมบัติที่ต่างกันได้ตามปัจจัยภายนอก เช่น น้ำมีหน่วยน้ำหนัก (unit weight) และความหนืด (viscosity) แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติบางอย่างของของเหลวจะส่งผลต่อความสามารถในการไหลซึมของของเหลวนั้นผ่านดิน โดยปกติ น้ำจะถูกใช้เป็นของเหลวในการหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านซึ่งจะถูกนิยามไว้ที่อุณหภูมิ 20°C เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างที่ได้กล่าวไว้ โดยที่การทดลองที่อุณหภูมิอื่นจะต้องมีการปรับแก้ตามสมการดังนี้

$$k_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\mu_T}{\mu_{20^{\circ}\text{C}}} k_T \quad \dots[7]$$

เมื่อ	$k_{20^{\circ}\text{C}}$	=	ความสามารถในการไหลซึมผ่านที่อุณหภูมิ 20°C
	k_T	=	ความสามารถในการไหลซึมผ่านที่อุณหภูมิ $T^{\circ}\text{C}$
	$\mu_{20^{\circ}\text{C}}$	=	ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 20°C
	μ_T	=	ความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ $T^{\circ}\text{C}$

หรือในการทดลองกับของเหลวอื่น ๆ คุณสมบัติที่มีผลต่อความสามารถในการไหลซึมผ่าน คือ หน่วยน้ำหนักและความหนืด ดังนั้นการเปรียบเทียบความสามารถในการไหลซึมผ่านเมื่อใช้ของเหลวในการไหลซึมผ่านที่ต่างกักันจึงเป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้องนัก แต่สามารถจะเปรียบเทียบได้ด้วยตัวแปรที่เรียกว่า “absolute permeability หรือ intrinsic permeability” ซึ่งมีการกำจัดผลของหน่วยน้ำหนักและความหนืดออกไปดังสมการ

$$K = \frac{k\mu}{\gamma} \quad \dots[8]$$

เมื่อ	K	=	absolute permeability
	k	=	ความสามารถในการไหลซึมผ่าน
	μ	=	ความหนืดของของเหลว
	γ	=	หน่วยน้ำหนักของของเหลว

ตามสมการนี้เป็นการพิจารณาโดยสมมติว่าดินเป็นวัสดุเฉื่อย (inert material) ซึ่งจะไม่ มีผลทางเคมีกับของเหลวที่ไหลซึมผ่าน แต่ในความเป็นจริงการไหลซึมผ่านด้วยของเหลวแต่ละ

ชนิดอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินโดยเฉพาะในดินเหนียว ดังนั้นอาจจะสามารถกล่าวได้ว่าของเหลวที่ไหลซึมผ่านอาจจะมีปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจากปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของดินด้วย สารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยอุตสาหกรรมสามารถเพิ่มความสามารถในการไหลซึมผ่านของชั้นวัสดุกันซึมเนื่องจากการดึงน้ำออกจากมวลดิน (dehydration) และการหดตัวของดินเหนียว (shrinkage) (Fernandez and Quigley, 1985; Brown, 1988) สารอินทรีย์อาจจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการไหลซึมของวัสดุกันซึมได้เช่นกัน (Daniel and Shackelford, 1989)

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการตระหนักถึงการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเหนียวบดอัดที่เป็นชั้น Liner เนื่องจากการอยู่ร่วมกับน้ำชะมูลฝอย จึงได้มีการศึกษาอย่างจริงจัง (Anderson, 1982; Sai and Anderson, 1991) ซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นไปที่สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอย (Anderson et al., 1985; Foreman and Daniel, 1986; Uppot and Stephenson, 1989; Fernandez and Quigley, 1991) และมีการศึกษาถึงผลของสารเคมีต่าง ๆ เป็นส่วนน้อย (Mitchell and Madsen, 1987; Broderick and Daniel, 1990)

2. ดินที่ทดสอบ (soil) ลักษณะของดินที่มีผลต่อความสามารถในการไหลซึมผ่าน คือ

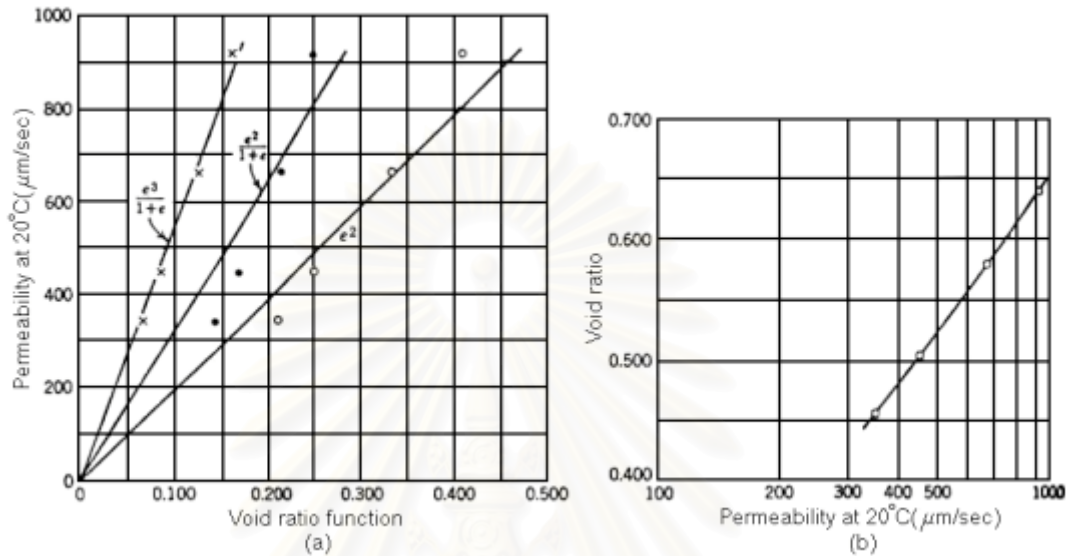
- ขนาดของอนุภาค (particle size)
- อัตราส่วนช่องว่าง (void ratio)
- ส่วนประกอบ (composition)
- โครงสร้าง (fabric)
- ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (degree of saturation)

ลักษณะของดินดังกล่าวยากที่จะพิจารณาแยกศึกษาผลกระทบได้อย่างชัดเจนเนื่องจากแต่ละปัจจัยมีการแปรผันตามกัน

จากความเป็นเหตุเป็นผลกันว่าขนาดของอนุภาคดินเล็กย่อมจะทำให้ช่องว่างระหว่างดินเล็กเป็นผลให้ช่องทางการไหลแคบจนความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำในที่สุด แต่ความคิดนี้จะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนกับดินทรายมากกว่าดินเหนียว Hazen ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับ D_{10} ของดินจำพวกทราย (sand) และทรายแป้ง (silt) ดังนี้

$$k = 100D_{10}^2 \quad \dots[9]$$

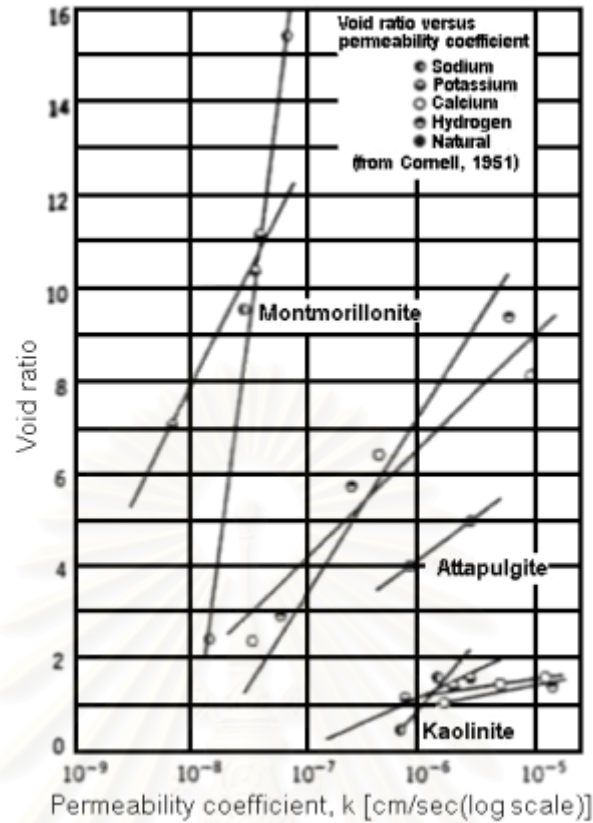
ทฤษฎีมากมายที่ผ่านมามีพบว่าคุณสมบัติในการไหลซึมผ่านมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับฟังก์ชันต่าง ๆ ของอัตราส่วนช่องว่างเช่น $e^3/(1+e)$ $e^2/(1+e)$ e^2 (รูปที่ 2.18 (a)) และมีการทดลองมากมายสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับล็อกความสามารถในการไหลซึมผ่าน ($\log k$) เป็นแบบเส้นตรง (รูปที่ 2.18 (b))



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับฟังก์ชันของอัตราส่วนช่องว่าง

ผลกระทบต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านเนื่องจากส่วนประกอบของดินในดินทรายและทรายแป้งเป็นปัจจัยที่สำคัญรองลงมาจากปัจจัยอื่น ในขณะที่ดินเหนียวจะมีผลกระทบเนื่องจากส่วนประกอบของดินเป็นอย่างมาก ผลกระทบของส่วนประกอบของดินเหนียวต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านแสดงไว้ดังรูปที่ 2.19

จากรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นว่าต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่าในช่วงกว้าง คือเมื่อไอออนโซเดียม (Na^+) เป็น exchangeable ion ต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านจะมีค่าน้อยที่สุด อัตราส่วนของความสามารถในการไหลซึมผ่านของ Ca-montmorillonite ต่อ K-montmorillonite ที่ $e = 7$ เท่ากับ 300 ยิ่งไปกว่านั้น kaolinite มีความสามารถในการไหลซึมผ่านมากกว่า montmorillonite ถึง 100 เท่า ดังนั้นโดยสรุปแล้วดินที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange capacity) ต่ำ ผลกระทบของ exchangeable ion ย่อมต่ำตามกันไป



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับส่วนประกอบของดินเหนียว

โครงสร้างของดินเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินแต่ละชนิด โดยเฉพาะดินเหนียว ซึ่งดังที่กล่าวไว้แล้วว่าที่อัตราส่วนช่องว่างเดียวกัน โครงสร้างแบบระเกะระกะ (flocculated) จะก่อให้เกิดการไหลได้ดีกว่าโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (dispersed)

ดินเหนียวเป็นดินที่ได้มีการนำมาศึกษากลไกที่ควบคุมความสามารถในการไหลซึมผ่านเป็นพิเศษ (Mesri and Olson, 1971) เพราะว่าดินเหนียวมีส่วนประกอบและโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าดินทราย

ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการไหลซึมผ่าน จากการศึกษาค้นคว้าและทดลองที่ผ่านมาพบว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจะมีค่ามากที่สุดเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์ (ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับ 100%) และจะมีค่าลดลงตามกันไป

อย่างไรก็ดี ตัวอย่างดินเหนียวบดอัด โครงสร้างของดินและระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงตามกันคือ การบดอัดทางด้านแห้ง (dry side) จะทำให้ดินมีโครงสร้างแบบระเกะระกะและมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำ ในขณะที่การบดอัดทางด้านเปียก (wet side) จะทำ

ให้ดินมีโครงสร้างแบบเป็นระเบียบและมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำสูง ดังนั้นความแตกต่างของความสามารถในการไหลซึมผ่านของตัวอย่างดินที่บดอัดด้วยปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันแต่มีความหนาแน่นแห้งเท่ากัน จึงมีผลมาจาก 2 ปัจจัยนี้ร่วมกัน และดินเหนียวบดอัดยังมีปัจจัยอื่นอีกที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการไหลซึมผ่าน เช่น หน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) (Fernandez and Quigley, 1991) การเกาะกันเป็นก้อนในกระบวนการผสมระหว่างดินกับน้ำ (Benson and Daniel, 1990) เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุ เครื่องมือ และขั้นตอนการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เบนโทไนต์ (Bentonite)

เบนโทไนต์ที่ใช้ในการทดลองมีชื่อทางการค้าว่า “MAC-GEL” ผลิตโดยบริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด (THAI NIPPON CHEMICAL INDUSTRY CO. LTD.) มีส่วนประกอบของแร่ดินเหนียว montmorillonite เป็นหลัก และมีคุณสมบัติสอดคล้องกับมาตรฐาน API SPEC 13A องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพแสดงไว้ดังนี้

องค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนต์

SiO ₂	55-58%	MgO	2.1-2.5%
Al ₂ O ₃	16-18%	CaO	1.9-2.1%
Fe ₂ O ₃	5-7%	K ₂ O	0.3-0.5%
Na ₂ O	3.6-4.0%	TiO ₂	1.2-1.5%
LoI	11-12%	CEC	80 meq/100 g

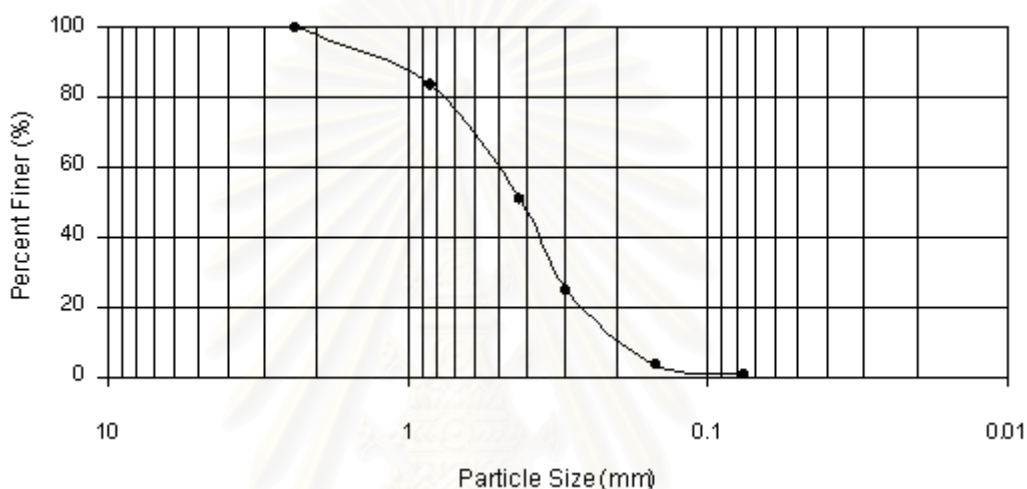
คุณสมบัติทางกายภาพของเบนโทไนต์

Specification	Typical	API Standard
Fann Viscosity @ 600 rpm, cp	40-50	30 min
Fann Viscosity @ 300 rpm, cp	28-35	-
Plastic Viscosity, cp	12-15	-
Yield Point, lb/100 ft ²	16-20	3xPv max.
Filtrate Loss, ml	13.5-14.5	15.0 max.
Dry Screen (passing 75 micron), %	80-85	-
Wet Screen (retained 75 micron), %	1.5-2.0	4.0 max.
PH (6 % suspension)	9.0-11.0	-
Moisture Content, %	8-10	10.0 max.
- Swelling Index	: 25-30 ml per 2 g of clay	
- Loose bulk density	: 0.80-0.95 g/ml	
- Apparent settled density	: 1.05-1.10 g/ml	
- Specific gravity	: 2.5-2.7	
- Gel strength, 10 sec.	: 10-16 lb/100 ft ²	
- Gel strength, 10 min.	: 25-30 lb/100 ft ²	

เบนโทไนต์จะถูกนำไปผสมกับทรายในอัตราส่วน 5% 10% และ 15% และบดอัดในเครื่องมือที่เตรียมไว้เพื่อทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมด้วยสารเคมีต่าง ๆ

3.1.2 ทราย (Sand)

ทรายที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะการกระจายของขนาดคละดังรูปที่ 3.1 และมีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 3.1 ซึ่งจัดเป็นดินพวก SP (poorly graded sand) ตามมาตรฐานการจำแนกชนิดของดิน Unified Soil Classification (USC)



รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายของขนาดคละของทรายที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของทรายที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ (properties)	ค่า
C_u	2.5
C_c	1.1
Fine content (finer than 75 micron), %	2.9
Specific gravity (G_s)	2.63-2.65
e_{min}	0.561
e_{max}	0.835

ทรายจะถูกนำมาผสมกับเบนโทไนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ และทดลองดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น

3.1.3 สารเคมี (Chemical)

1. น้ำประปา (Tap water)

น้ำประปาที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่ใช้กันทั่วไปในชุมชน ซึ่งจะนำมาใช้เป็นของเหลวที่ผสมกับทรายและเบนโทไนต์ในการบดอัดและใช้เป็นของเหลวในการทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสม ผลการทดลองที่ได้จะนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับการไหลซึมผ่านด้วยสารเคมีอื่น ๆ น้ำประปาดังกล่าวมีค่า $\text{pH} = 6.8$ และถือว่ามีคุณสมบัติอื่นใกล้เคียงกับน้ำกลั่น (น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 25°C จะมีหน่วยน้ำหนัก (γ) เท่ากับ 0.98 กรัม/ลบ.ซม. ความหนืด (μ) เท่ากับ 1.0 centipoise ($\mu/\gamma = 1.02$) และ dielectric constant เท่ากับ 80.4)

2. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)

โซเดียมคลอไรด์ หรือที่เรียกว่า “เกลือแกง” ที่ใช้ในการทดลองสามารถหาซื้อได้จากศึกษาภัณฑ์เพื่อความแน่ใจในความบริสุทธิ์ จัดเป็นตัวแทนของเกลือชนิดหนึ่งที่มีอยู่ในน้ำชะมูลฝอย โซเดียมคลอไรด์จะถูกนำไปใช้ทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมแทนน้ำในสถานะของสารละลาย (solution) ที่ความเข้มข้น 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M

3. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2)

แคลเซียมคลอไรด์ จัดว่าเป็นเกลืออีกชนิดหนึ่งซึ่งมีอยู่ในน้ำชะมูลฝอยและเมื่ออยู่ในสถานะสารละลายจะแตกตัวให้อิออนบวกของแคลเซียม (Ca^{2+}) ที่มีค่าประจุไฟฟ้ามากกว่าอิออนบวกของโซเดียม (Na^+) ที่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ทดลองหาซื้อได้จากศึกษาภัณฑ์และจะถูกนำไปใช้ทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมแทนน้ำในสถานะของสารละลายที่ความเข้มข้นเดียวกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์คือ 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M

4. กรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH)

กรดอะซิติกจัดว่าเป็นกรดอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน ๆ และเป็นตัวแทนของกรดอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำชะมูลฝอย กรดอะซิติกสามารถหาซื้อได้จากศึกษาภัณฑ์แต่จะได้ที่ความเข้มข้น 98% เท่านั้น กรดอะซิติกบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 25°C จะมีหน่วยน้ำหนัก (γ) เท่ากับ 1.05 กรัม/ลบ.ซม. ความหนืด (μ) เท่ากับ 1.28 centipoise ($\mu/\gamma = 1.22$) และ dielectric constant เท่ากับ 6.2 กรดอะซิติกจะถูกนำไปใช้ทดลองความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมแทนน้ำในสถานะของสารละลาย (solution) ที่ความเข้มข้น 1.5 M 2.7 M และ 3.8 M ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 2.5 2.3 และ 2.1 ตามลำดับ

5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)

กรดไฮโดรคลอริกจัดว่าเป็นกรดอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดรุนแรงซึ่งสามารถหาซื้อได้จากคึกษาภัณฑ์ในสถานะความเข้มข้น 12 M เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ กรดไฮโดรคลอริกจะถูกนำไปใช้ทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมแทนน้ำในสถานะของสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 M 0.5 M และ 1.5 M ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 1.1 0.7 และ 0.3 ตามลำดับ

6. เบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

เบสโซเดียมไฮดรอกไซด์จัดว่าเป็นเบสอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นด่างรุนแรงและหาซื้อได้จากคึกษาภัณฑ์ในสถานะของของแข็ง (เป็นเกล็ด) เบสโซเดียมไฮดรอกไซด์จะถูกนำไปใช้ทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมแทนน้ำในสถานะของสารละลายที่มีความเข้มข้น 1.5 M 2.7 M และ 3.8 M ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 12.8 12.9 และ 13.0 ตามลำดับ

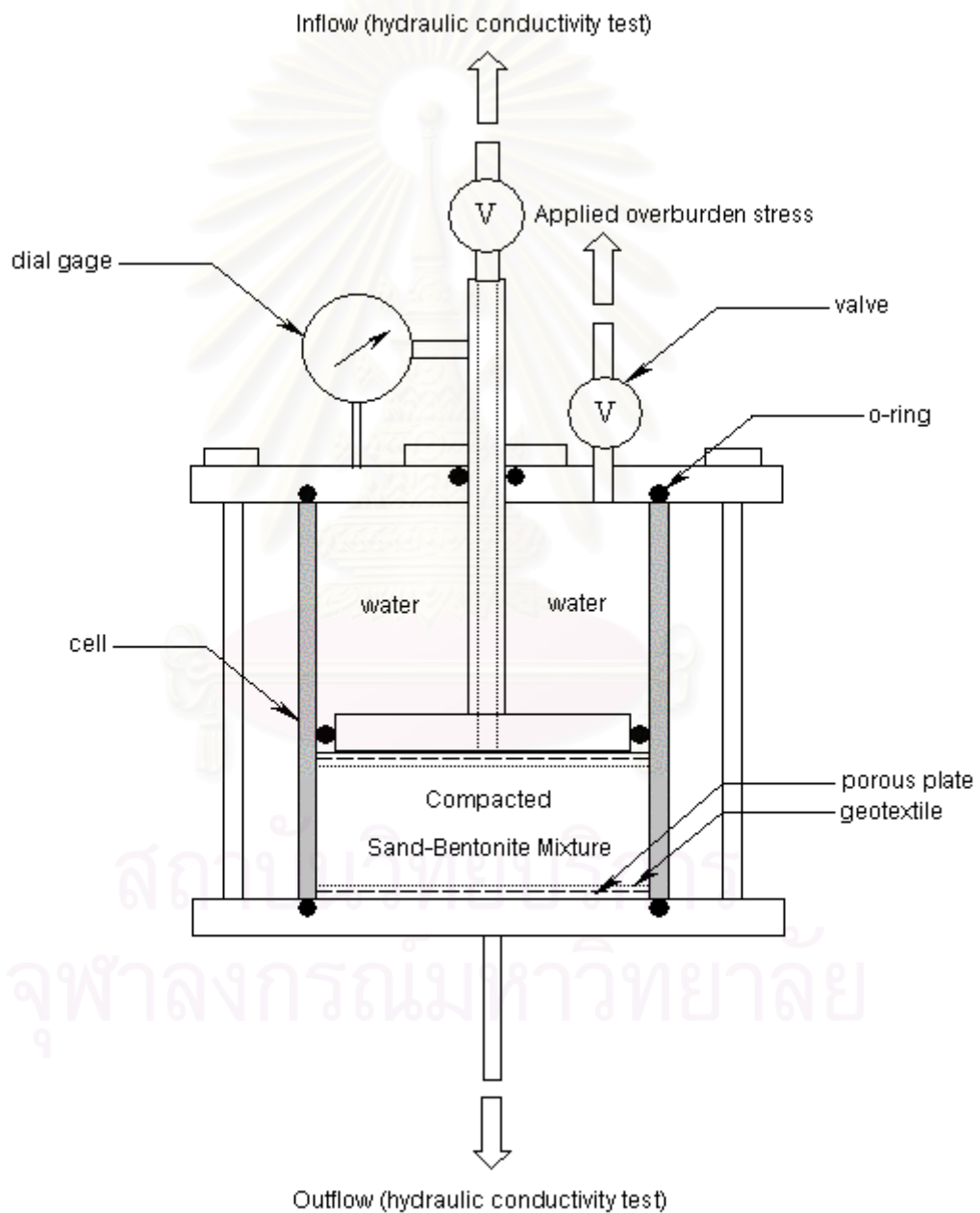
คุณสมบัติของแต่ละสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบสรุปไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

Chemical	Unit Weight (g/cm ³)	pH
Tap water	1.00	-
NaCl 1.6 M	1.04	-
NaCl 3.1 M	1.11	-
NaCl 4.5 M	1.16	-
CaCl ₂ 1.6 M	1.08	-
CaCl ₂ 3.1 M	1.17	-
CaCl ₂ 4.5 M	1.25	-
CH ₃ COOH 1.5 M	1.00	2.5
CH ₃ COOH 2.7 M	1.01	2.3
CH ₃ COOH 3.8 M	1.02	2.1
HCl 0.1 M	0.99	1.1
HCl 0.5 M	1.00	0.7
HCl 1.5 M	1.01	0.3
NaOH 1.5 M	1.05	12.8
NaOH 2.7 M	1.09	12.9
NaOH 3.8 M	1.12	13.0

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองหลักในงานวิจัยฉบับนี้คือการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองจะต้องสามารถเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ทดลองด้วยการบดอัดและสามารถใช้แรงดันอากาศช่วยในการเพิ่มแรงดันน้ำได้ด้วย ดังนั้นเครื่องมือนี้จึงถูกปรับปรุงจากเซลล์การทดลองการบดอัดแบบ Stand Proctor Compaction Test (เครื่องมือการทดลองแบบผนังไม่ยืดหยุ่น) แผนภาพลักษณะของชุดทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2 และส่วนประกอบแต่ละชั้นมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพลักษณะของชุดทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน

1. ครอบตัวอย่าง (cell) ทำจากพลาสติกที่ทนแรงดันได้สูง และมีลักษณะเป็นทรง ครอบกลิ้งผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10.0 ซม. สูง 13.0 ซม. และหนา 0.5 ซม. การที่ครอบ ทำจากพลาสติกก็เพื่อป้องกันปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างวัสดุต่าง ๆ ในระบบกับตัวผนัง ครอบ ครอบนี้จะต้องประกอบด้วย collar ของ standard compaction mold ทางด้านบนใน ขณะทำการบดอัด โดยที่ด้านล่างจะถูกยึดกับแผ่นปิดล่างและรองใต้ตัวอย่างดินด้วยแผ่น geotextile และแผ่นพรุนให้น้ำผ่านตามลำดับ เมื่อพร้อมที่จะทดลอง ครอบตัวอย่างจะถูก ประกอบเข้ากับฝาปิดด้านบนแทน ครอบตัวอย่างที่ใช้ทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 3.3

2. แผ่นให้แรงดันกดทับพร้อมแกนส่งน้ำ (applied stress plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 โดยส่วนที่เป็นแท่ง ภายในจะกลวงเพื่อเป็นทางผ่านของของเหลวที่ต้องการจะให้ไหลซึมผ่านตัว อย่างดินและใช้ยึดจับกับ dial gauge และที่ส่วนแผ่นจานกลม บริเวณขอบจะมีร่องไว้รองรับ O ring โดยรอบเพื่อเป็นการกั้นระบบให้แรงดันกดทับ (overburden stress system) กับระบบการ ไหลซึมผ่าน (permeability test system) ให้แยกออกจากกันอีกทั้งยังช่วยในการลดแรงเสียดทาน ที่เกิดขึ้นระหว่างผนังครอบตัวอย่างกับขอบของจานให้แรงดันกดทับ

3. แผ่นพรุน (porous plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.5 จะอยู่ที่ด้านบนของตัวอย่างซึ่งจะทำ หน้าที่กระจายการไหลของน้ำจากแกนส่งน้ำให้ไหลได้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดของตัวอย่าง ดินและอยู่ที่ด้านล่างของตัวอย่างดินเพื่อรองรับการไหลตลอดทั้งหน้าตัดก่อนที่จะรวมเอาของเหลว ออกทางรูระบายที่แผ่นปิดล่าง

4. แผ่นปิดบน (top plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะประกอบด้วย

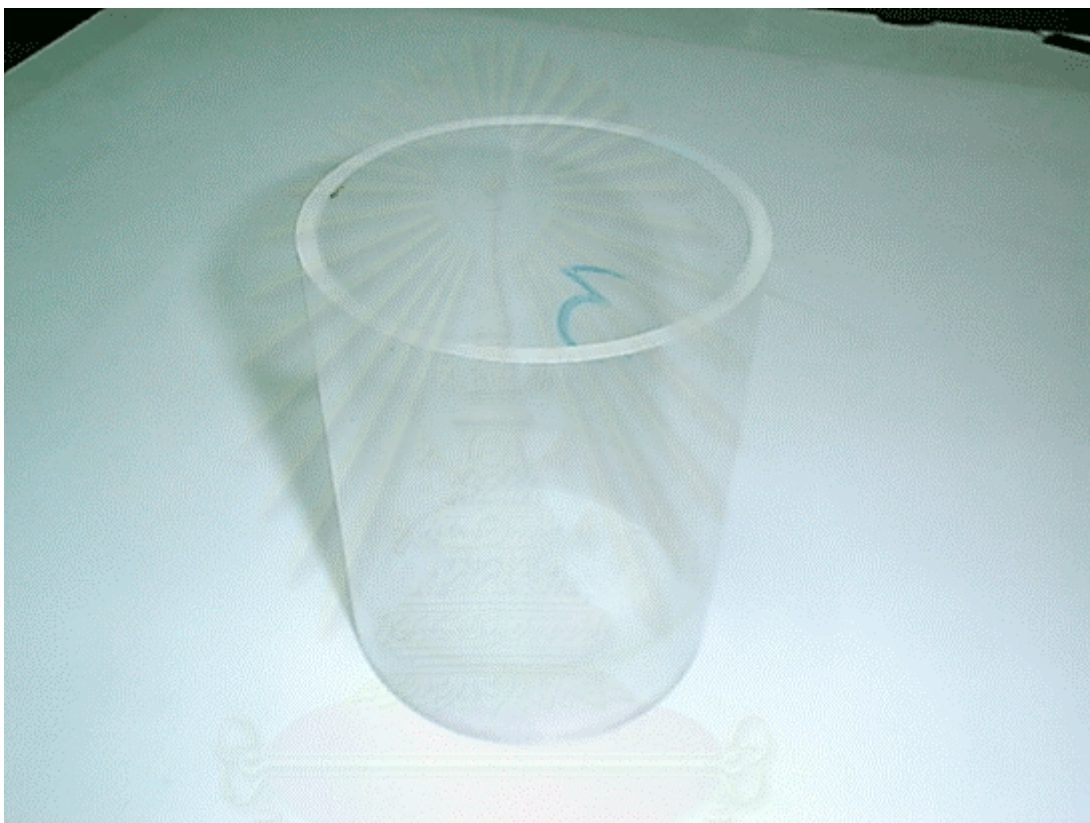
- 4 รูที่มุมของแผ่นเพื่อเตรียมไว้ยึดกับเสา 4 ต้นเมื่อประกอบกับครอบตัวอย่าง
- รูกกลางพร้อมแผ่นครอบและ O ring เพื่อเป็นทางผ่านของแกนส่งน้ำและจะต้องมี ระบบกั้นการรั่วของแรงดันที่ใช้ในการให้แรงดันกดทับ
- รูเจาะที่เตรียมไว้สำหรับเป็นทางผ่านให้แรงดันจากระบบแรงดันภายนอกเข้าสู่ ครอบตัวอย่างเพื่อใช้เป็นแรงดันกดทับแก่ตัวอย่าง
- ร่องวงกลมเพื่อรองรับการยึดกับครอบตัวอย่างพร้อมทั้งกั้นการรั่วของแรงดัน ด้วย O ring ที่หน้าสัมผัสระหว่างแผ่นปิดบนกับครอบตัวอย่าง

5. แผ่นปิดล่าง (bottom plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะประกอบด้วย

- 4 รูที่มุมของแผ่นเพื่อเตรียมไว้ยึดกับเสา 4 ต้นเมื่อประกอบกับครอบตัวอย่าง
- รูกกลางเพื่อใช้เป็นทางระบายออกของของเหลวที่ไหลซึมออกจากตัวอย่างดิน

- ร่องวงกลมเพื่อรองรับกับการยึดกับกระบอกตัวอย่างพร้อมทั้งกันการรั่วของแรงดันด้วย O ring ที่หน้าสัมผัสระหว่างแผ่นปิดล่างกับกระบอกตัวอย่าง

6. ระบบแรงดันอากาศซึ่งประกอบด้วย pump regulator gauge และระบบท่อแรงดันเพื่อใช้เป็นระบบให้แรงดันกดทับและแรงดันเหนือผิวของของเหลวที่จะไหลเข้าตัวอย่างดินซึ่งจะช่วยเพิ่มความชันศาสตร์ให้มีอัตราการไหลซึมที่เร็วขึ้นและเป็นผลให้ใช้เวลาในการทดลองน้อยลง แผนภาพระบบแรงดันอากาศแสดงไว้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.3 แสดงรูปกระบอกตัวอย่าง

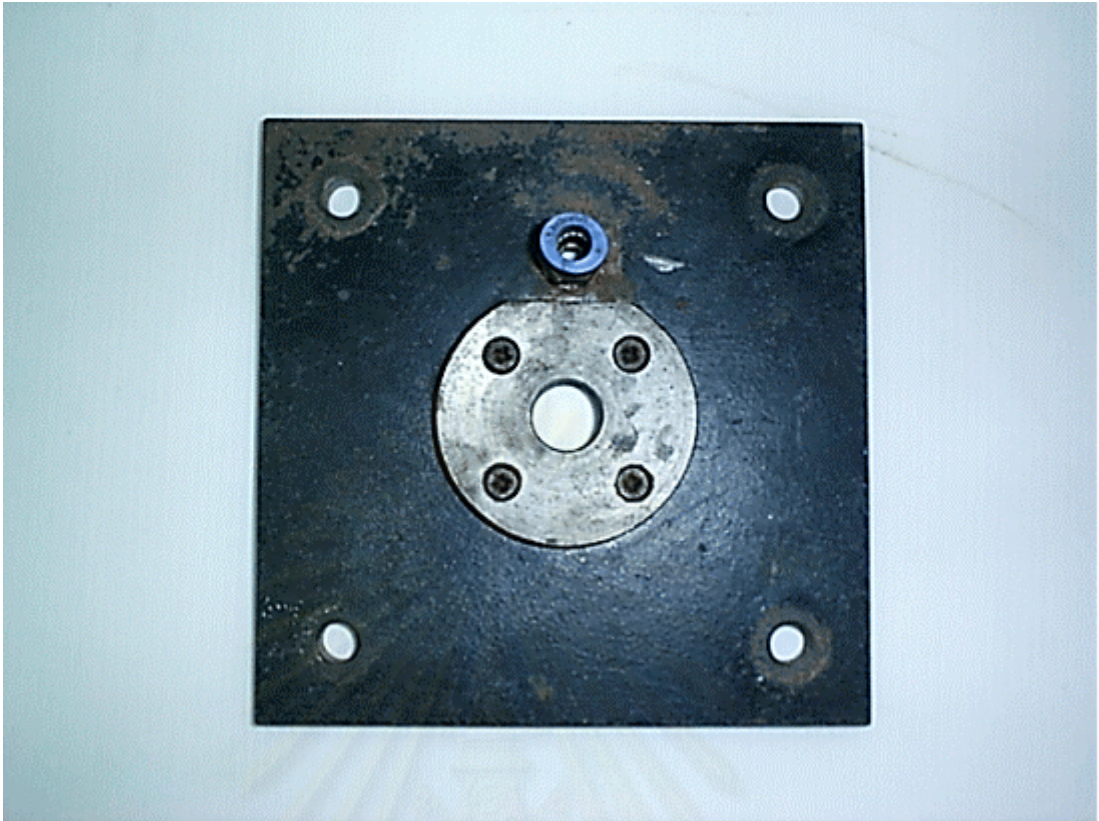
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 แสดงรูปแผ่นให้แรงดันกดทับพร้อมแกนส่งน้ำ



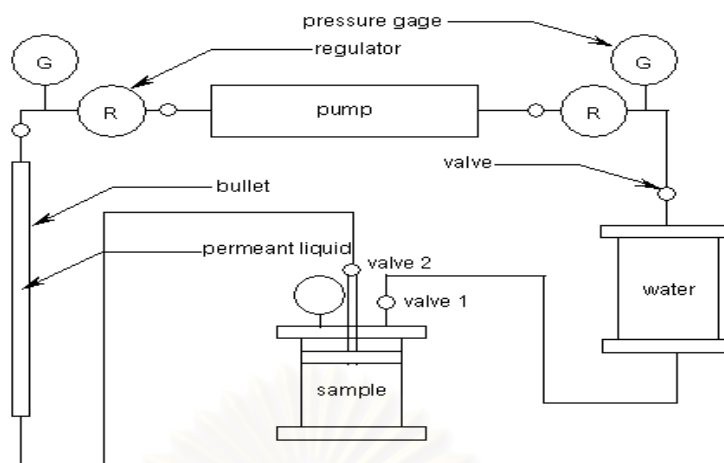
รูปที่ 3.5 แสดงรูปแผ่นพจน



รูปที่ 3.6 แสดงรูปแผ่นปิดบน



รูปที่ 3.7 แสดงรูปแผ่นปิดล่าง



รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพระบบแรงดันอากาศ

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด

ก่อนที่จะทำการทดลองในหัวข้อนี้ จะต้องทำการทดลอง Standard Proctor Compaction Test เพื่อต้องการทราบ γ_{dmax} และ OMC ของแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์แล้วนำมากำหนดสถานะเริ่มต้นของวัสดุผสมที่ใช้ทดลองในหัวข้อนี้ ($\gamma_d = \gamma_{dmax} \pm 5\%$ ของแต่ละอัตราส่วนผสมทรายกับเบนโทไนต์และ $W.C. = 16 \pm 0.5\%$) ขั้นตอนโดยรวมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ 1. ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด และ 2. ขั้นตอนการทดลองโดยการปล่อยให้ของเหลวไหลซึมผ่านวัสดุผสม

1. ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์

- กำหนดหาปริมาณของวัสดุแต่ละชนิดที่จะนำมาผสม (ปริมาณน้ำ 16% ของวัสดุผสมแห้ง)

- ผสมแห้งระหว่างทรายกับเบนโทไนต์ในเครื่องปั่น (รูปที่ 3.9) ที่ความเร็วต่ำสุด โดยใช้เวลาที่เหมาะสมซึ่งจะต้องคำนึงถึงปัญหาการฟุ้งของเบนโทไนต์และในขณะเดียวกันทรายกับเบนโทไนต์จะต้องถูกผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันด้วย เวลาที่ใช้กำหนดไว้ที่ 3 นาที



รูปที่ 3.9 แสดงรูปเครื่องปั่นวัสดุผสม

- ผสมวัสดุผสมแห้งเข้ากับน้ำในขณะที่มีการปั่นอย่างต่อเนื่อง การใส่น้ำจะกระทำโดยกระบอกฉีดแบบสเปรย์ แล้วหาน้ำหนักน้ำที่ใส่ในตัวอย่างจากการสูญเสียน้ำในกระบอกฉีด ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 10 นาที ซึ่งจะต้องสังเกตว่าวัสดุผสมไม่มีการจับตัวกันเป็นก้อน

- ทิ้งวัสดุผสมไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการพัฒนาของน้ำของอนุภาคเบนโทไนต์ได้อย่างเต็มที่ โดยควรที่จะเก็บไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดและมีปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรของวัสดุผสมเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในบริเวณกว้าง ในขั้นตอนการเก็บจะต้องกระทำโดยให้เกิดการบดอัดก่อนที่จะทำการบดอัดจริงให้น้อยที่สุด

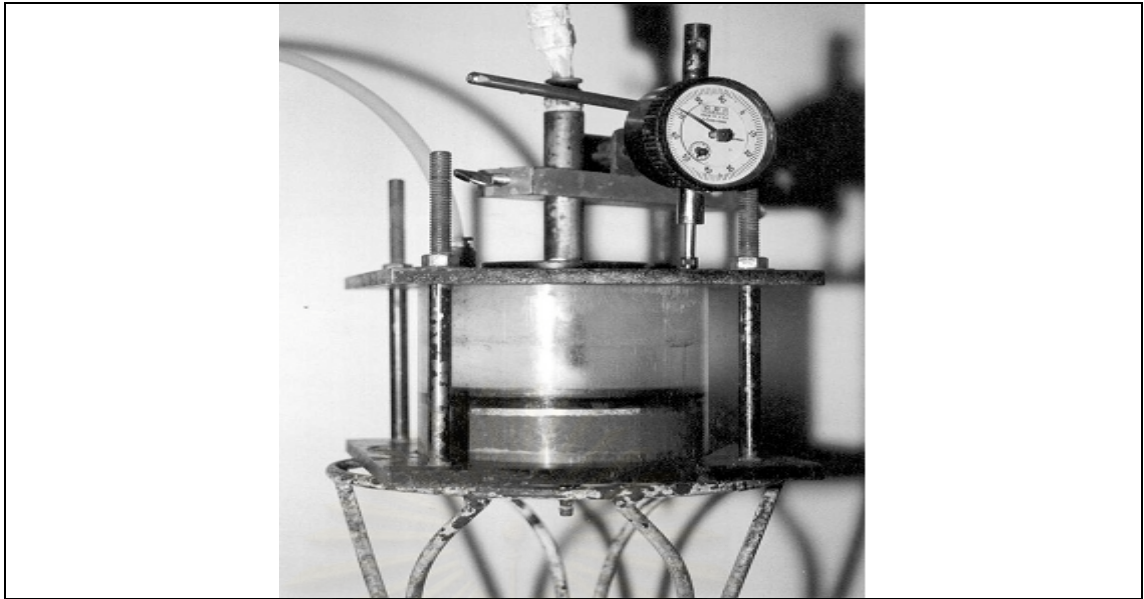
- เตรียมชุดกระบอกตัวอย่างสำหรับการบดอัดซึ่งจะประกอบด้วย กระบอกตัวอย่าง แผ่นปิดล่าง เสา collar และแผ่นพรุณ โดยมีการรองด้วย geotextile ก่อนการบดอัด รูปชุดกระบอกตัวอย่างสำหรับการบดอัดแสดงไว้ดังรูปที่ 3.10



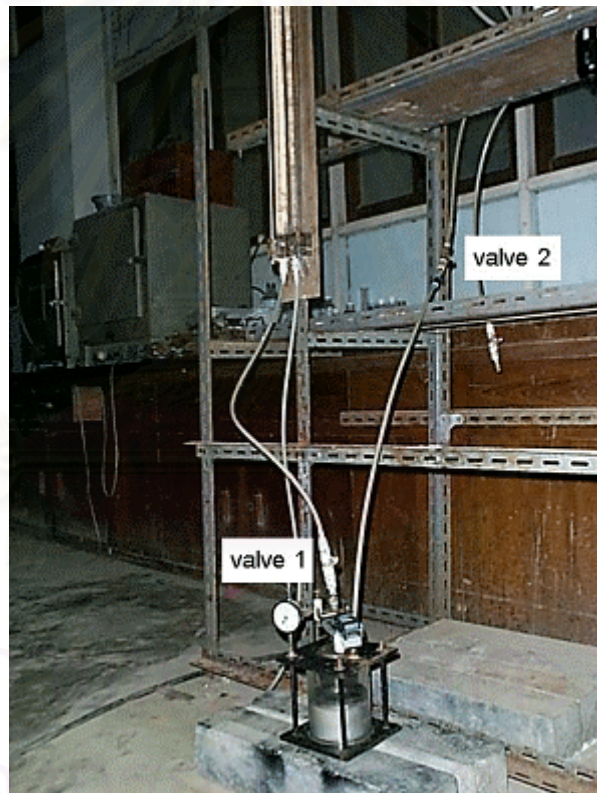
รูปที่ 3.10 แสดงรูปชุดกระบอกตัวอย่างสำหรับการบดอัด

- บดอัดวัสดุผสมที่มีความหนาแน่นที่ต้องการโดยควบคุมน้ำหนักและความสูงของตัวอย่างที่ 2 ซม. ซึ่งจะมีการเผื่อในส่วนผิวหน้าที่ไม่เรียบ การบดอัดจะกระทำเสมือนกับการบดอัดใน standard compaction mold เพียงชั้นเดียว (น้ำหนักค้อน 5.5 ปอนด์ ยกสูง 12 นิ้ว 25 ครั้ง) หลังจากบดอัดแล้วต้องทำการปาดดินส่วนเกินออกเพื่อให้ผิวหน้าเรียบและได้ความสูงของตัวอย่าง 2 ซม. หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักกระบอกกับวัสดุผสมที่บดอัดแล้วและลบออกด้วยน้ำหนักกระบอกเปล่าเพื่อหาน้ำหนักของตัวอย่างดินเพื่อนำไปคำนวณหาความหนาแน่นรวม ในขั้นตอนนี้จะต้องแบ่งวัสดุผสมก่อนการบดอัดที่มากพอควรไปตรวจสอบหาปริมาณความชื้นและปริมาณของเบนโทไนต์ในวัสดุผสม

- ประกอบกระบอกตัวอย่างเข้ากับอุปกรณ์อื่น ๆ ดังรูปที่ 3.11 และนำไปประกอบเข้ากับระบบแรงดันอากาศดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แสดงรูปชุดกระบอกตีตัวอย่างพร้อมทดลอง



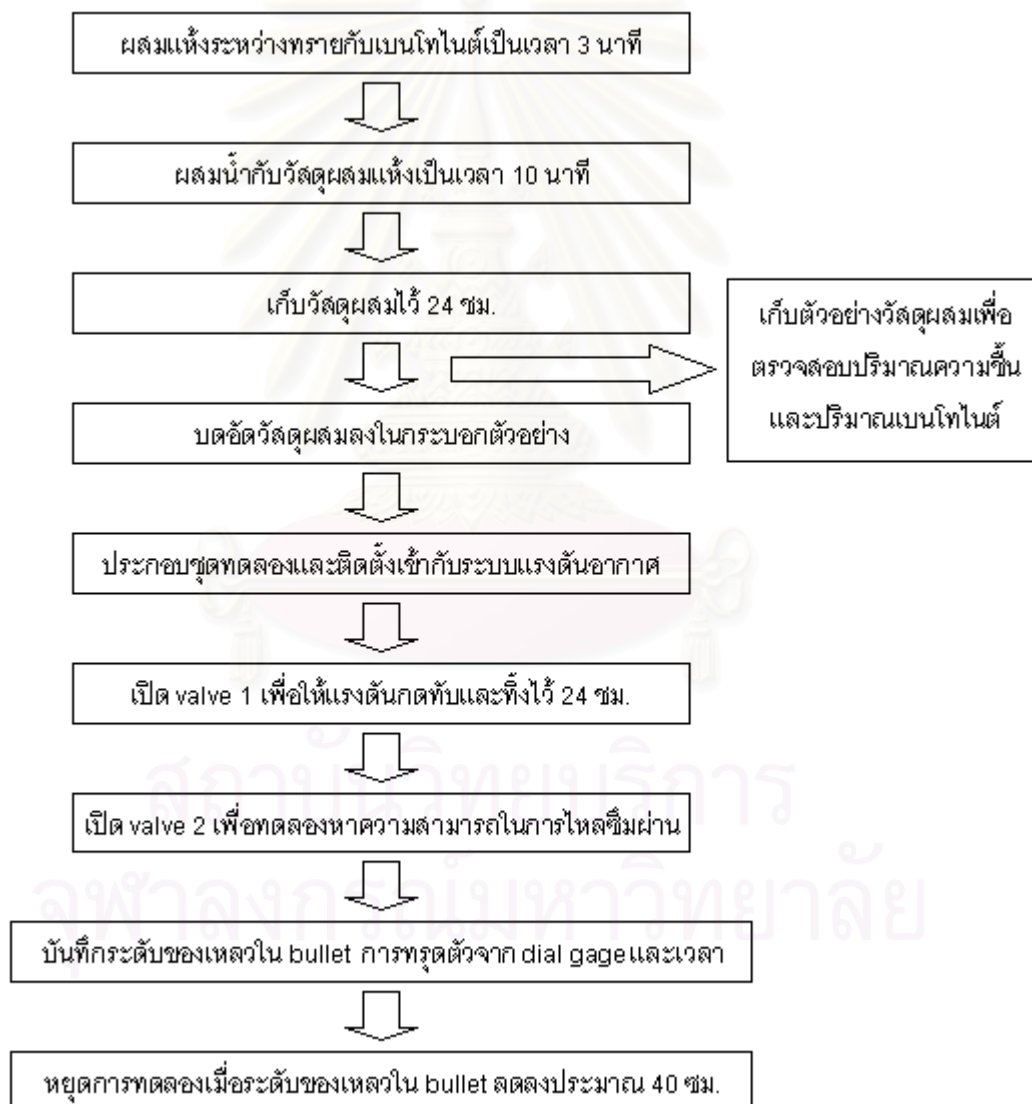
รูปที่ 3.12 แสดงการติดตั้งชุดทดลองกับระบบแรงดันอากาศ

2. ขั้นตอนการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน

- เปิด valve 1 ในรูปที่ 3.12 เพื่อให้แรงดันกดทับกับตัวอย่างดิน และจะต้องทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการทรุดตัวของดินและแน่ใจว่ามีแรงดันด้านข้าง (lateral stress) ระหว่างตัวอย่างดินกับผนังกระบอกเต็มที่แล้ว

- เปิด valve 2 ในรูปที่ 3.12 เพื่อทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน พร้อมทั้งจดระดับของเหลวใน bullet และค่าการทรุดตัวจาก dial gauge ที่เวลาต่าง ๆ กันจนระดับของของเหลวลดลงได้ประมาณ 40 ซม.หลังจากเริ่มการทดลอง

แผนภาพลำดับขั้นตอนการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 3.13 และเงื่อนไขการทดลองของแต่ละตัวอย่างแสดงไว้ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.13 แสดงแผนภาพลำดับขั้นตอนการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการทดลองของแต่ละตัวอย่าง

Sample no.	B/S (%)	W.C. (%)	γ_d (t/m ³)	OBS (kPa)	P_p (kPa)	Permeant
1	5	16	1.77	150	0	Tap water
2	10	16	1.80	150	25	Tap water
3	15	16	1.80	150	25	Tap water
4	20	16	1.80	150	25	Tap water
5	10	16	1.80	150	25	NaCl 1.6 M
6	10	16	1.80	150	25	NaCl 3.1 M
7	10	16	1.80	150	25	NaCl 4.5 M
8	15	16	1.80	150	25	NaCl 1.6 M
9	15	16	1.80	150	25	NaCl 3.1 M
10	15	16	1.80	150	25	NaCl 4.5 M
11	10	16	1.80	150	25	CaCl ₂ 1.6 M
12	10	16	1.80	150	25	CaCl ₂ 3.1 M
13	10	16	1.80	150	25	CaCl ₂ 4.5 M
14	15	16	1.80	150	25	CaCl ₂ 1.6 M
15	15	16	1.80	150	25	CaCl ₂ 3.1 M
16	15	16	1.80	150	25	CaCl ₂ 4.5 M
17	10	16	1.80	150	25	CH ₃ COOH 1.5 M
18	10	16	1.80	150	25	CH ₃ COOH 2.7 M
19	10	16	1.80	150	25	CH ₃ COOH 3.8 M
20	15	16	1.80	150	25	CH ₃ COOH 1.5 M
21	15	16	1.80	150	25	CH ₃ COOH 2.7 M
22	15	16	1.80	150	25	CH ₃ COOH 3.8 M
23	10	16	1.80	150	25	HCl 0.1 M
24	10	16	1.80	150	25	HCl 0.5 M
25	10	16	1.80	150	25	HCl 1.5 M
26	15	16	1.80	150	25	HCl 0.1 M
27	15	16	1.80	150	25	HCl 0.5 M
28	15	16	1.80	150	25	HCl 1.5 M
29	10	16	1.80	150	25	NaOH 1.5 M
30	10	16	1.80	150	25	NaOH 2.7 M
31	10	16	1.80	150	25	NaOH 3.8 M
32	15	16	1.80	150	25	NaOH 1.5 M

33	15	16	1.80	150	25	NaOH 2.7 M
34	15	16	1.80	150	25	NaOH 3.8 M
B/S	=	อัตราส่วนโดยน้ำหนักแห้งของเบนโทไนด์ต่อทราย				
W.C.	=	ปริมาณความชื้นในการบดอัด				
OBS	=	Overburden Stress (แรงดันกดทับตัวอย่าง)				
P_p	=	แรงดันช่วยการไหล				
k_c/k_w	=	อัตราส่วนเปรียบเทียบความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ของสารเคมีต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ของน้ำประปาของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนด์เดียวกัน				

3.3.2 ขั้นตอนการทดลองหาพิกัดขีดเหลวของเบนโทไนด์โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ

วิธีการทดลองทำแบบเดียวกับการทดลองด้วยน้ำกลั่นแต่เปลี่ยนเป็นใช้สารเคมีที่ใช้ในการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแทน และควรจะทำจากสภาพเปียกไปหาแห้งเนื่องจากป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนและเพื่อให้วงน้ำรอบอนุภาคเบนโทไนด์พัฒนาได้เต็มที่ ค่าพิกัดขีดเหลวนี้อาจจะเป็นตัวบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับของเหลวไว้รอบอนุภาคดินซึ่งเป็นการบอกถึงขนาดของวงน้ำรอบอนุภาคดินในทางอ้อม

3.3.3 ขั้นตอนการทดลองหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี

Unconfined Compression Test

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาคคุณสมบัติทางด้านกำลังของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนด์บดอัดที่ใช้ในการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยไม่ได้มีการกระทำกับตัวอย่างที่ผ่านการไหลซึมด้วยของเหลวชนิดต่าง ๆ เนื่องจากจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่คุณสมบัติทางด้านความสามารถในการไหลซึมผ่านมากกว่า ขั้นตอนในการทดลองมีดังนี้

- ผสมวัสดุผสมในลักษณะเดียวการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน
- บดอัดวัสดุผสมใน standard compaction mold
- กดกระบอกลูกเก็บตัวอย่างเพื่อเก็บตัวอย่างดิน กระบอกลูกเก็บตัวอย่างมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 32 มม. สูง 70.5 มม. โดยที่ปลายกระบอกลูกกดกับดินจะมีลักษณะเหมือนคีมมีด รูปกระบอกลูกเก็บตัวอย่างแสดงไว้ดังรูปที่ 3.14

- ดันตัวอย่างออกจากกระบอกระบายด้วยเครื่องดันดิน โดยจะได้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 31 มม. และสูงประมาณ 65 มม. หลังจากที่ทำกรปาดหัวท้ายแล้ว (ขนาดใกล้เคียงกับตัวอย่างดินเหนียวที่เตรียมจากเครื่องมือในการทดลอง Unconfined Compression Test โดยเฉพาะ)
- นำเข้าเครื่องทดสอบ Unconfined compression test โดยใช้อัตราในการเคลื่อนตัวในแนวตั้งเท่ากับ 1 มม./นาที



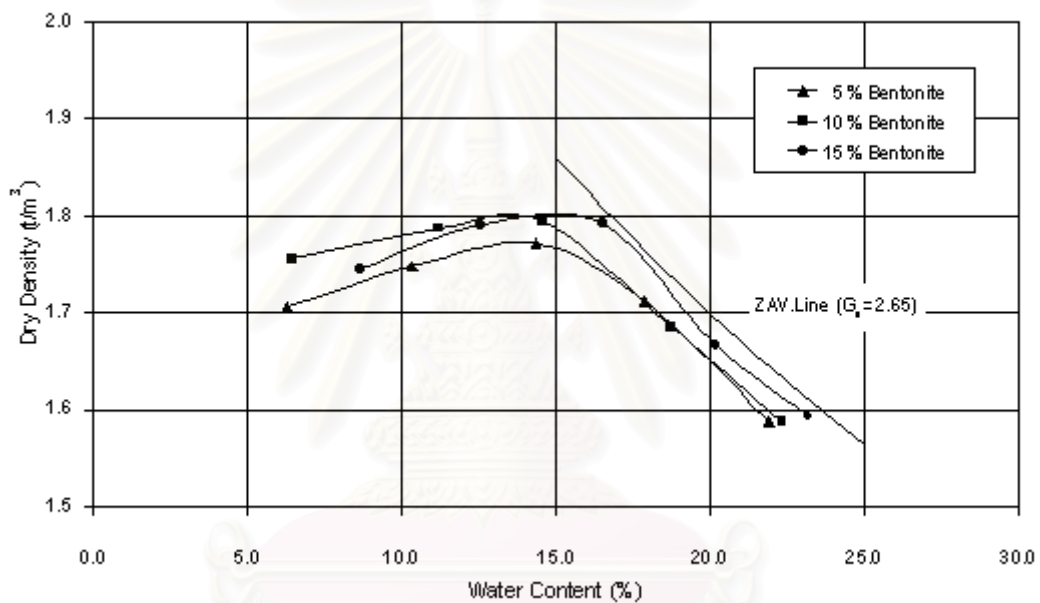
รูปที่ 3.14 แสดงรูปกระบอกระบายตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลองหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม โดยจะนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดลองในหัวข้อถัดไป ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดลองบดอัดวัสดุผสมด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองบดอัดวัสดุผสมด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test

อัตราส่วนผสมเบนโทไนต์ต่อทราย (เปอร์เซ็นต์)	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ตัน/ลบ.ม.)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (เปอร์เซ็นต์)
5	1.77	14.0
10	1.80	13.5
15	1.80	15.0

จากการสรุปผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 ทั้งสามอัตราส่วนผสมให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ในช่วง 1.77 ถึง 1.80 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) อยู่ในช่วง 13.5 ถึง 15.0% ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า มีการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมตามปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในส่วนของการเตรียมตัวอย่างทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านด้วยสารเคมีต่าง ๆ จึงใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดที่ 16% เท่ากันในทุกปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสมและมีการควบคุมความหนาแน่นแห้งให้ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนผสมด้วย การเตรียมตัวอย่างที่ปริมาณความชื้นในการบดอัดสูงกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 2% ก็เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงและยังเป็นการทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพเกือบอิ่มตัวด้วยน้ำมากขึ้นอีกด้วย

4.2 ผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่านวัสดุผสมถูกแบ่งออกตามชนิดของสารเคมีที่ใช้เป็นของเหลวในการไหลซึมผ่าน โดยถือว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของน้ำประปาเป็นค่าอ้างอิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความสามารถในการไหลซึมผ่านด้วยสารเคมีอื่น ผลการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งไม่มีผลของการหลุดตัวของตะกอนเนื่องจากการหลุดตัวมีค่าน้อยมากประมาณ 0.01 ถึง 0.02 มม. เท่านั้น และผลการทดลองของตัวอย่างที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับตัวอย่างในกลุ่มแสดงไว้ในภาคผนวกตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด

Sample no.	B / S (%)	W.C. (%)	γ_d (t/m ³)	OBS (kPa)	P_p (kPa)	Permeant	k (cm/sec)	k_c/k_w
1	4.8	16.2	1.76	150	0	Tap water	3.0×10^{-6}	-
2	10.0	15.7	1.77	150	25	Tap water	2.0×10^{-9}	-
3	14.8	15.6	1.76	150	25	Tap water	5.0×10^{-10}	-
4	19.8	15.6	1.78	150	25	Tap water	5.2×10^{-10}	-
5	9.8	16.3	1.78	150	25	NaCl 1.6 M	1.4×10^{-8}	7
6	10.5	15.6	1.77	150	25	NaCl 3.1 M	2.1×10^{-8}	10
7	10.0	15.9	1.78	150	25	NaCl 4.5 M	9.7×10^{-8}	47
8	15.2	16.2	1.77	150	25	NaCl 1.6 M	1.9×10^{-8}	38
9	15.2	16.2	1.78	150	25	NaCl 3.1 M	5.9×10^{-8}	117
10	15.2	16.2	1.76	150	25	NaCl 4.5 M	7.9×10^{-8}	156
11	10.4	15.7	1.77	150	25	CaCl ₂ 1.6 M	1.6×10^{-7}	79
12	10.0	16.3	1.77	150	25	CaCl ₂ 3.1 M	1.2×10^{-7}	59
13	10.4	15.7	1.77	150	25	CaCl ₂ 4.5 M	1.2×10^{-7}	58
14	15.3	16.1	1.79	150	25	CaCl ₂ 1.6 M	4.7×10^{-8}	93

Sample no.	B / S (%)	W.C. (%)	γ_d (t/m ³)	OBS (kPa)	P_p (kPa)	Permeant	k (cm/sec)	k_c/k_w
15	15.3	16.1	1.77	150	25	CaCl ₂ 3.1 M	7.4×10^{-8}	148
16	15.3	16.1	1.79	150	25	CaCl ₂ 4.5 M	3.0×10^{-7}	589
17	10.0	15.7	1.77	150	25	CH ₃ COOH 1.5 M	5.6×10^{-7}	277
18	10.2	15.6	1.77	150	25	CH ₃ COOH 2.7 M	7.1×10^{-7}	350
19	10.0	15.7	1.77	150	25	CH ₃ COOH 3.8 M	5.7×10^{-7}	281
20	15.1	16.0	1.77	150	25	CH ₃ COOH 1.5 M	6.9×10^{-9}	14
21	14.8	15.6	1.77	150	25	CH ₃ COOH 2.7 M	6.0×10^{-8}	119
22	14.7	16.1	1.77	150	25	CH ₃ COOH 3.8 M	3.9×10^{-8}	78
23	9.6	16.4	1.77	150	25	HCl 0.1 M	1.5×10^{-6}	758
24	9.7	15.7	1.77	150	25	HCl 0.5 M	1.6×10^{-6}	801
25	10.3	15.7	1.78	150	25	HCl 1.5 M	4.7×10^{-6}	2317
26	14.9	16.1	1.76	150	25	HCl 0.1 M	1.4×10^{-9}	3
27	14.9	16.1	1.76	150	25	HCl 0.5 M	1.2×10^{-9}	23
28	14.8	15.6	1.77	150	25	HCl 1.5 M	2.0×10^{-8}	39
29	9.5	16.1	1.77	150	25	NaOH 1.5 M	1.4×10^{-7}	71
30	10.4	15.7	1.78	150	25	NaOH 2.7 M	1.8×10^{-7}	89
31	10.1	16.3	1.78	150	25	NaOH 3.8 M	2.5×10^{-7}	120
32	14.6	15.8	1.78	150	25	NaOH 1.5 M	2.0×10^{-8}	39
33	14.7	16.3	1.77	150	25	NaOH 2.7 M	3.1×10^{-8}	61
34	14.6	15.8	1.77	150	25	NaOH 3.8 M	2.0×10^{-7}	394

B/S = อัตราส่วนโดยน้ำหนักแห้งของเบนโทไนต์ต่อทราย

W.C. = ปริมาณความชื้นในการบดอัด

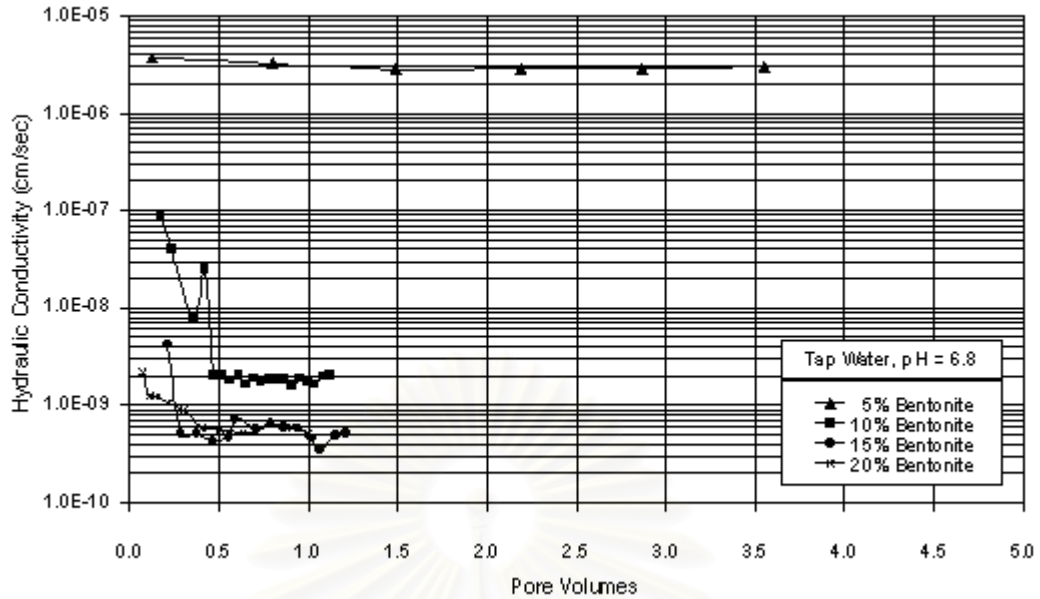
OBS = Overburden Stress (แรงดันกดทับตัวอย่าง)

P_p = แรงดันช่วยการไหล

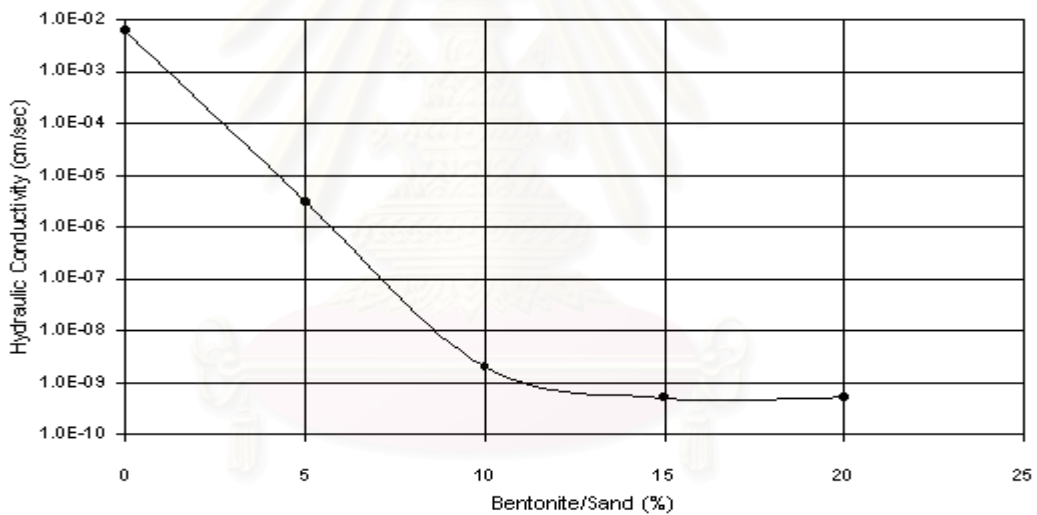
k_c/k_w = อัตราส่วนเปรียบเทียบความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ของสารเคมี
ความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ของน้ำประปาของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์เดียวกัน

4.2.1 น้ำประปา (Tap water)

น้ำประปาเป็นของเหลวที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้เพื่อต้องการนำคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการไหลซึมผ่านมาเป็นค่าอ้างอิงและเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเดียวกันเมื่อไหลซึมผ่านของสารเคมีอื่น ๆ โดยใช้ตัวอย่างวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5% 10% และ 15% ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของน้ำประปาผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา กับปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม

จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตเห็นว่าวัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 10% 15% และ 20% ความสามารถในการไหลซึมผ่านจะสูงในช่วงแรกและจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง จากตารางที่ 4.2 พบว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 10% 15% และ 20% มีค่าต่ำกว่า 1.0×10^{-7} ซม./วินาทีซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานคุณสมบัติชั้นวัสดุกันซึมรองใต้หลุมฝังกลบขยะ ในขณะที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนต์ 5% ไม่ผ่านมาตรฐาน ดังนั้นการทดลองกับสารเคมีอื่น ๆ จึงทดลองที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ

15% เท่านั้น วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 20% ไม่ได้นำมาทดลองเนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเวลา

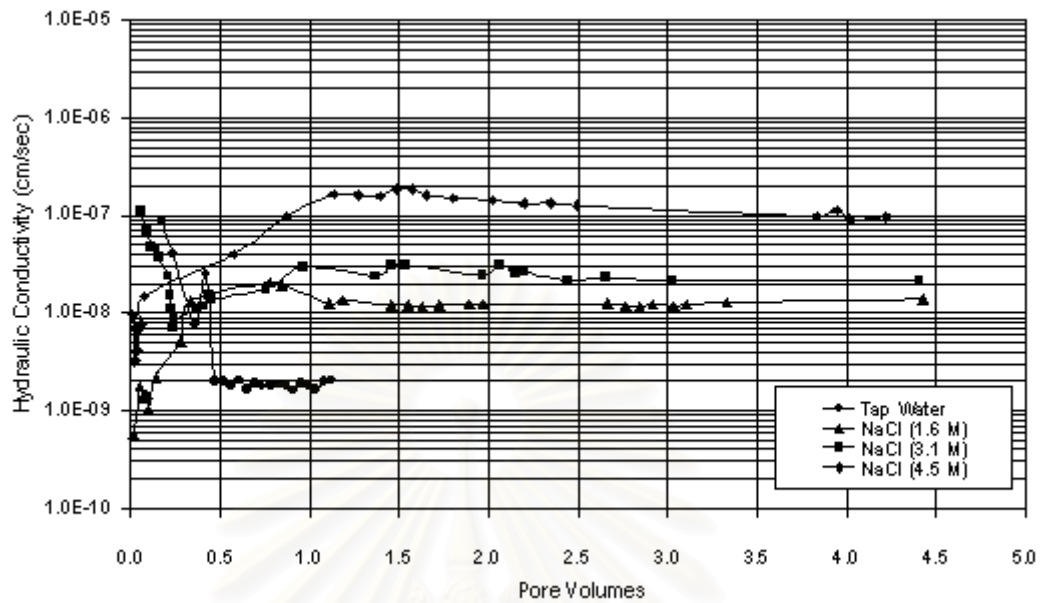
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสมกับความสามารถในการไหลซึมผ่านดังรูปที่ 4.3 พบว่าในขณะที่ปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการไหลซึมผ่านจะลดลง ซึ่งปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสมที่ทำให้วัสดุผสมมีความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที มีค่าประมาณ 7% และจะสังเกตเห็นว่าการลดลงในช่วงจากปริมาณเบนโทไนต์ 0% ถึง 10% มีค่ามากกว่าการลดลงในช่วงจากปริมาณเบนโทไนต์ 10% ถึง 20% การเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้น่าจะมีสาเหตุจากก้อนเบนโทไนต์ที่เกิดจากการผสมแบบไม่สม่ำเสมอ การมีอยู่ของก้อนเบนโทไนต์จะทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างกลุ่มก้อนเบนโทไนต์นี้ ดังนั้นช่องว่างขนาดใหญ่จึงเป็นตัวควบคุมปริมาณการไหลและทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านที่วัดได้มีปริมาณสูง จากการสังเกตของผู้เขียน การผสมแบบไม่สม่ำเสมอของวัสดุผสมชนิดนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้สูงในกรณีที่มีปริมาณเบนโทไนต์เป็นส่วนผสมมาก เพราะว่าความสามารถในการดึงดูดน้ำของเบนโทไนต์ที่สูงกว่าทรายมากนั่นเอง จึงทำให้การผสมเป็นไปได้ยาก รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้จาก Daniel et al.(1990)

4.2.2 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

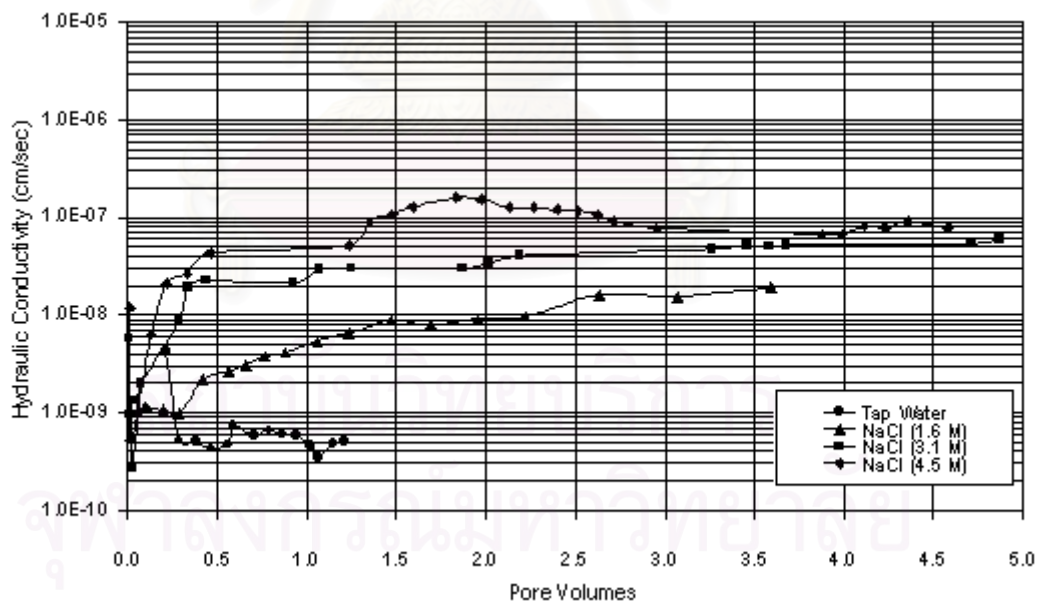
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M นำมาใช้ทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.6

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะสังเกตเห็นว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของแต่ละการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะเข้าสู่ช่วงคงที่หลังจาก 1 pore volume ยกเว้นในการทดลองกับวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl เข้มข้น 3.1 M ซึ่งมีการลดลงในช่วงแรกจนถึง 0.2 pore volume หลังจากนั้นจึงมีลักษณะเช่นเดียวกับตัวอย่างอื่นจากตารางที่ 4.2 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 7 ถึง 47 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา และในทำนองเดียวกันวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีความสามารถในการไหลซึมผ่านเพิ่มขึ้นในช่วง 38 ถึง 156 แสดงว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีผลกระทบจากการไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl มากกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% แต่จากการพิจารณากราฟดังรูปที่ 4.6 พบว่า ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ทั้งสองค่ามีค่าใกล้เคียงกันเมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นหนึ่ง ๆ และยังคงสอดคล้องกับมาตรฐานชั้นวัสดุกันซึมรองใต้หลุมฝังกลบขยะเช่นเดิม โดยที่ในแต่ละ

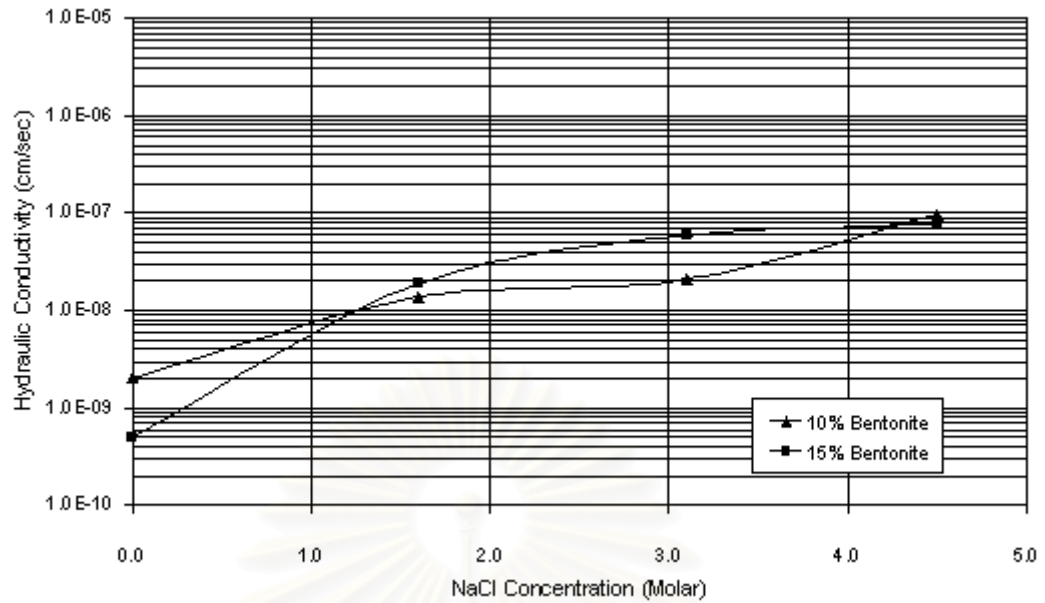
ปริมาณเบนโทไนต์มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการไหลซึมผ่านตามความเข้มข้นของสารละลาย NaCl



รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%



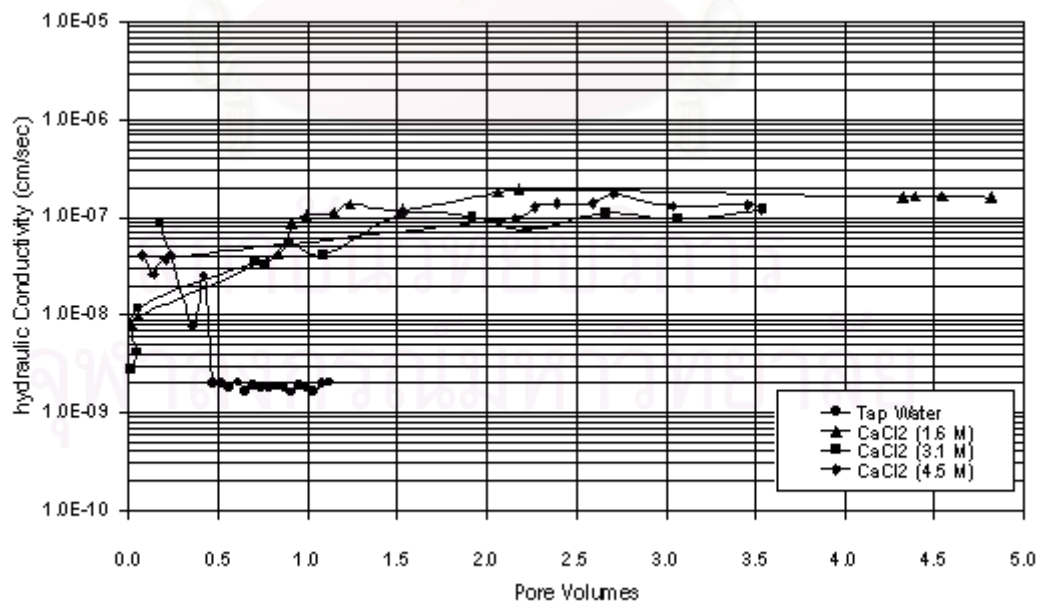
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

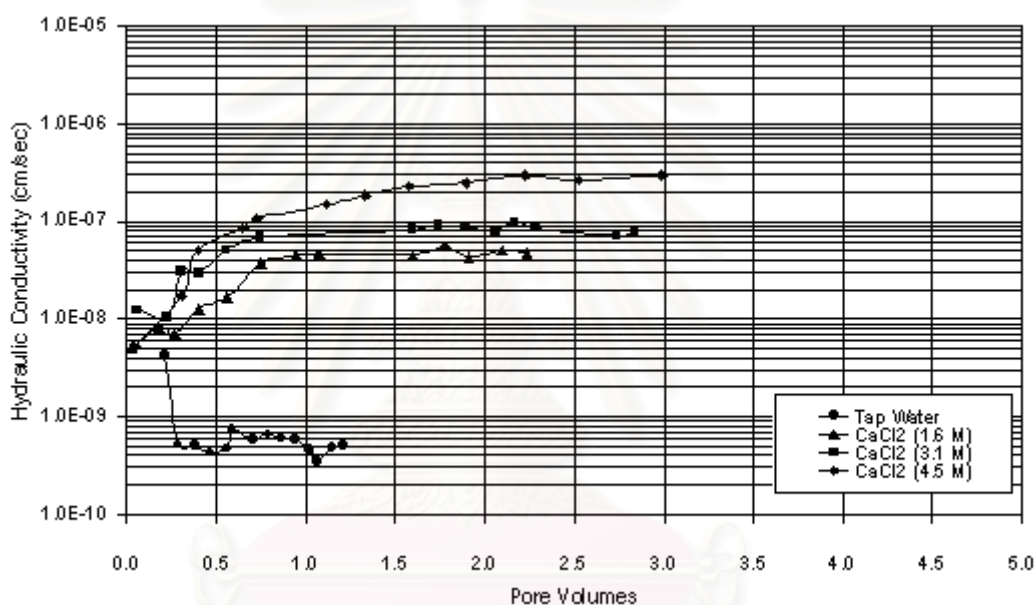
4.2.3 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M นำมาใช้ทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.7 ถึง 4.9



รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%

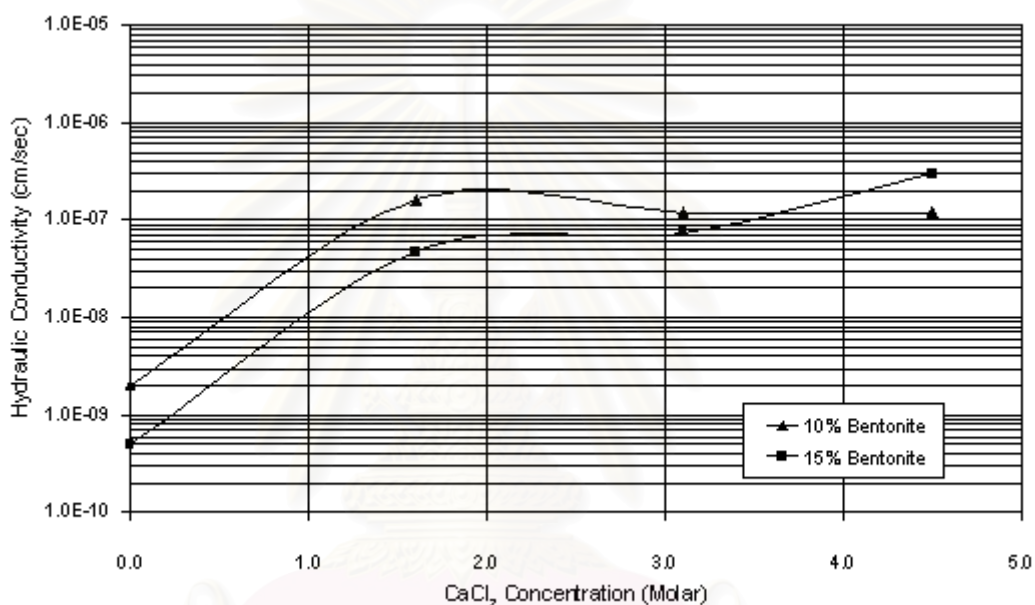
จากรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งหลังจากผ่านไป 1 pore volume เช่นเดียวกับเมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl โดยที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่นี้มีค่าประมาณ 2.0×10^{-7} ซม./วินาที ทั้ง 3 ตัวอย่างซึ่งไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CaCl_2 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันแสดงว่า วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% มีผลกระทบจากการไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CaCl_2 ที่ความเข้มข้น 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปาพบว่า สารละลาย CaCl_2 ที่ความเข้มข้นในการทดลองสามารถทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของ วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% เพิ่มขึ้นประมาณ 60 ถึง 70 เท่า และเป็นผลให้วัสดุผสมมีความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงเกินกว่ามาตรฐานชั้นวัสดุกันซึมที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%

ในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% ดังรูปที่ 4.8 พบว่ากราฟมีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% คือ มีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนคงที่ในช่วงหลัง แต่ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่นี้มีค่าแตกต่างกัน โดยที่ความเข้มข้นของสารละลาย CaCl_2 ที่มากกว่าจะส่งผลให้วัสดุผสมมีความสามารถในการไหลซึมผ่านมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปาพบว่า สารละลาย CaCl_2 ที่ความเข้มข้น 1.6 M 3.1 M และ 4.5 M ทำให้วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเพิ่มขึ้น 93 148 และ 589 เท่า ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% แสดงว่า สารละลาย CaCl_2 มีแนวโน้มว่าจะส่งผลกระทบมากขึ้นตามปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม

แต่เมื่อพิจารณาความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ทั้งสองค่าดังรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลาย CaCl_2 พบว่า สารละลาย CaCl_2 ที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ค่า จะทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% เพิ่มขึ้นจนสูงเกิน 1×10^{-7} ซม./วินาที ในขณะที่สารละลาย CaCl_2 ที่ความเข้มข้น 4.5 M เท่านั้นที่ทำให้วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงเกิน 1×10^{-7} ซม./วินาที นั้นย่อมาหมายความว่า วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็น Liner มากกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%



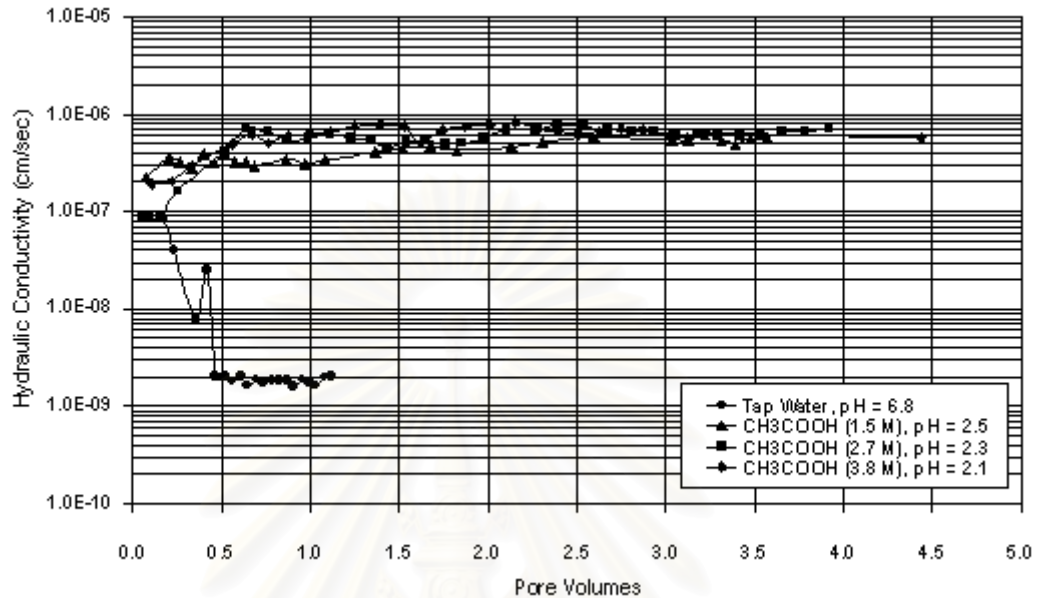
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

4.2.4 สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH)

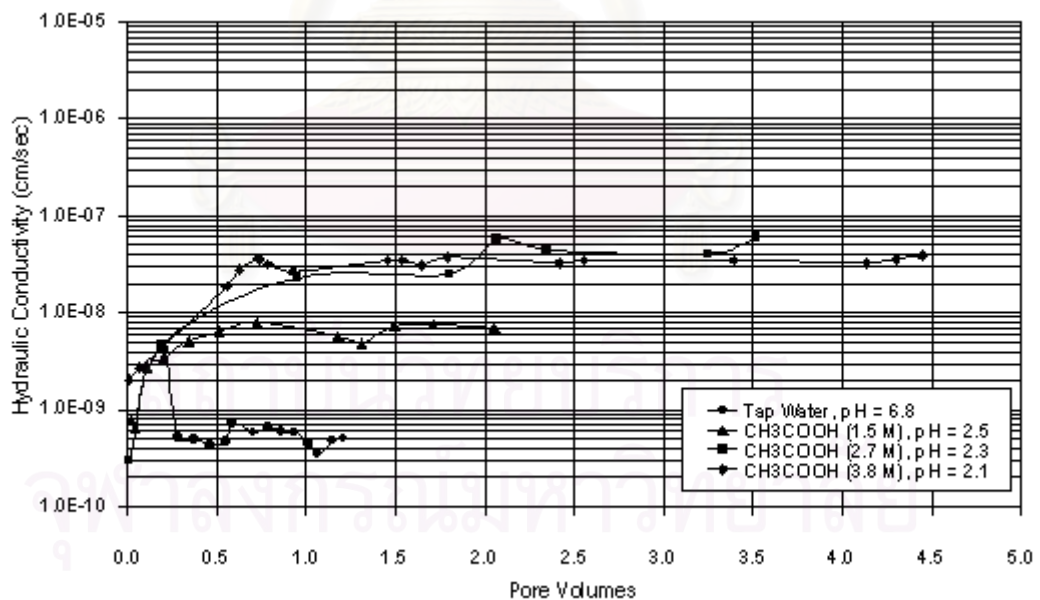
สารละลายกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 1.5 M 2.7 M และ 3.8 M ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 2.5 2.3 และ 2.1 ตามลำดับ นำมาใช้ทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.10 ถึง 4.12

จากรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นผลการทดลองของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% พบว่า ขณะที่มีการไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CH_3COOH ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านมีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนคงที่ในช่วงหลังเช่นเดียวกับการไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl และ CaCl_2 ซึ่งความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่มีค่าประมาณ 6×10^{-7} ซม./วินาที ใกล้เคียงกันทั้งหมด เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CH_3COOH ที่ความเข้มข้น 1.5 M 2.7 M และ 3.8 M และเมื่อ

เปรียบเทียบกับผลการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปาพบว่า สารละลาย CH_3COOH ทำให้วัสดุผสมมีความสามารถในการไหลซึมผ่านเพิ่มขึ้น 277 ถึง 350 เท่า เป็นผลให้วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% มีคุณสมบัติด้านความทึบน้ำไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็น Liner

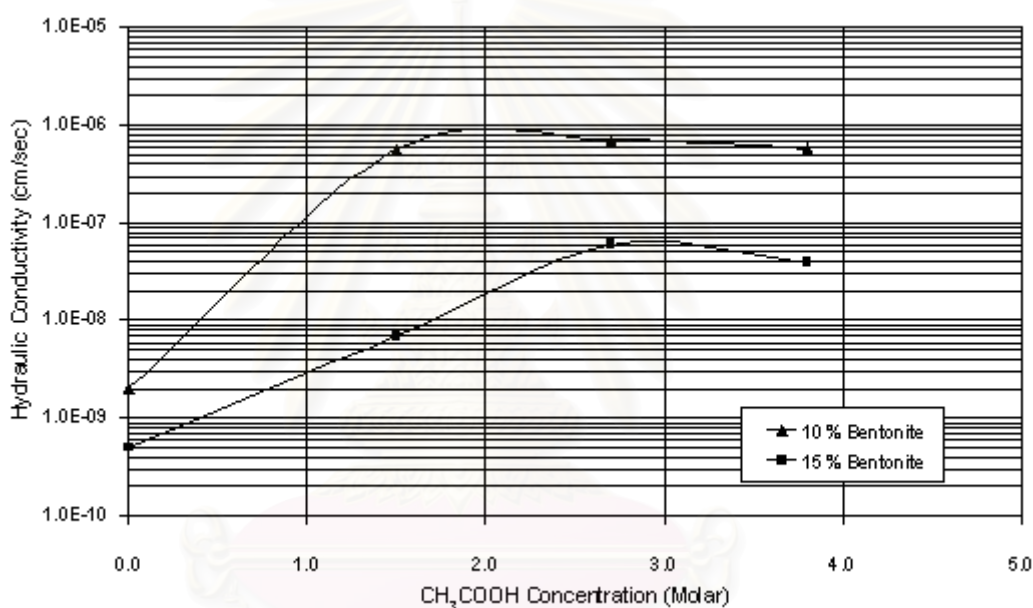


รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดอะซิติกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%



รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดอะซิติกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%

จากรูปที่ 4.11 พบว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีการเพิ่มขึ้นจนคงที่ของความ สามารถในการไหลซึมผ่านเหมือนกราฟอื่น ๆ โดยที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CH_3COOH เข้มข้น 1.5 M มีค่าเท่ากับ 6.9×10^{-9} ซม./วินาที และ เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CH_3COOH เข้มข้น 2.7 M และ 3.8 M ความสามารถในการไหล ซึมผ่านในช่วงคงที่มีค่าเท่ากับ 6.0×10^{-9} และ 3.9×10^{-9} ซม./วินาที ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปาพบว่า สารละลาย CH_3COOH ทำ ให้วัสดุผสมมีความสามารถในการไหลซึมผ่านเพิ่มขึ้น 14 ถึง 119 เท่า ซึ่งน้อยกว่าในกรณีของวัสดุ ผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% แสดงว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% มีผลกระทบจากการ ไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CH_3COOH มากกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%



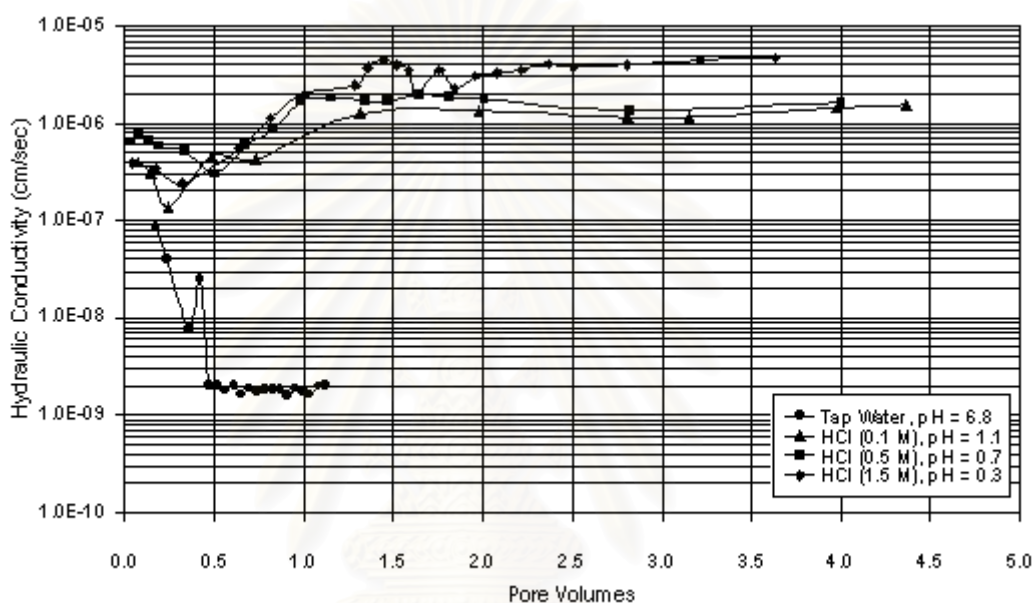
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายกรดอะซิติก

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการไหลซึมผ่านตามความเข้มข้นของสารละลาย CH_3COOH ที่ไหลซึมผ่านวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ทั้งสองค่าดังรูปที่ 4.12 พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลาย CH_3COOH ค่าเดียวกัน ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% มีค่าสูงกว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% อย่างชัดเจน หรืออาจพิจารณาในอีกลักษณะหนึ่งว่า สารละลาย CH_3COOH ทุกความเข้มข้นในการทดลองทำให้วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านมากกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที ในขณะที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่

ปริมาณเบนโทไนต์ 15% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CH_3COOH ทุกความเข้มข้นยังคงต่ำกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานของ Liner ดั้งเดิม

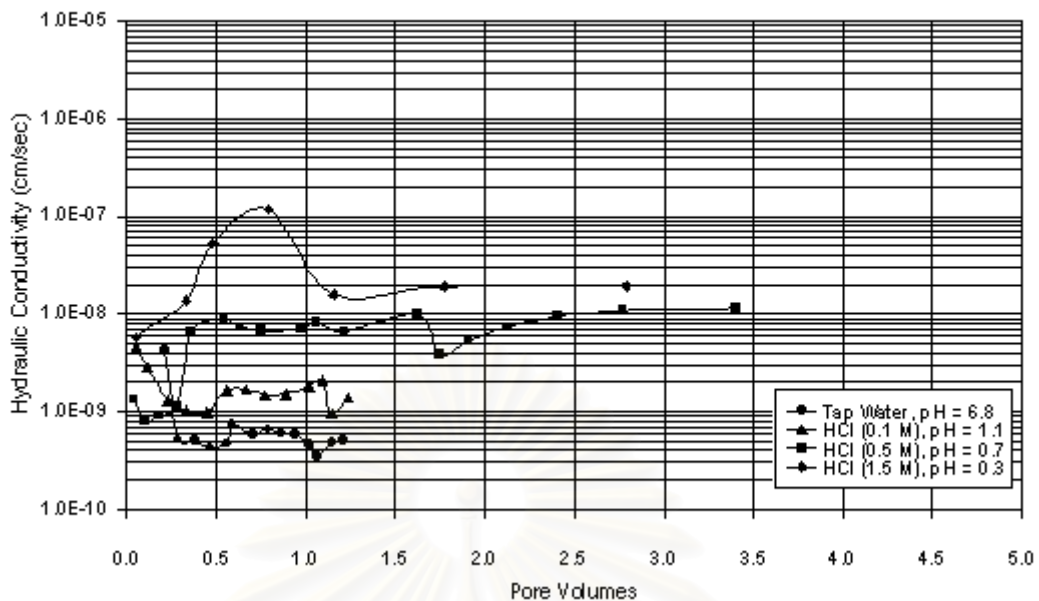
4.2.5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 M 0.5 M และ 1.5 M ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 1.1 0.7 และ 0.3 ตามลำดับ นำมาใช้ทดลองการไหลซึมผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15



รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%

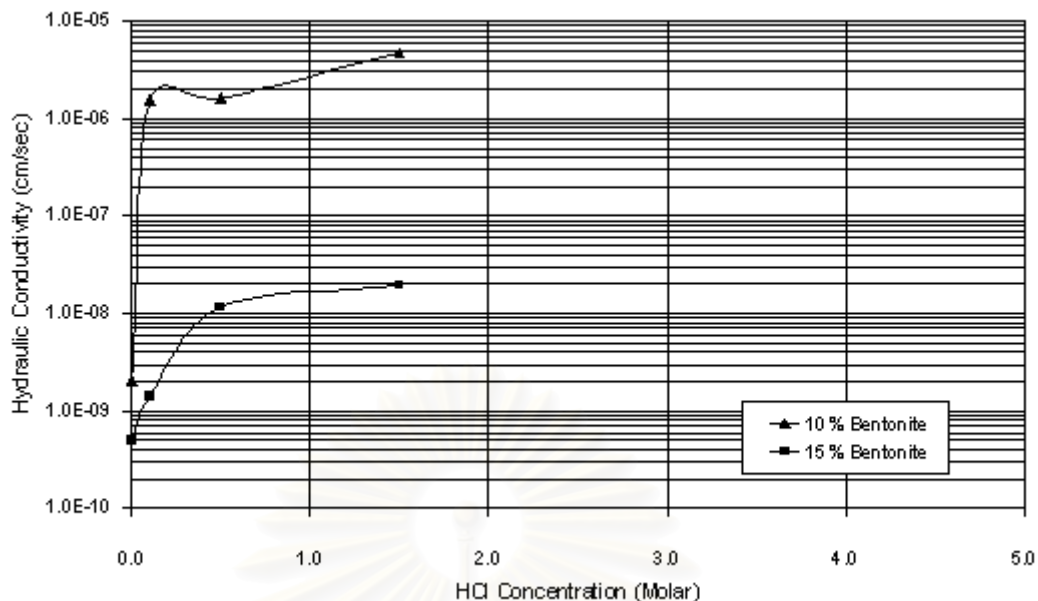
จากรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นผลการทดลองของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่าลักษณะของกราฟมีความแตกต่างจากการไหลซึมผ่านด้วยสารละลายอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือ ความสามารถในการไหลซึมผ่านจะลดลงในช่วงแรกจนถึงประมาณ 0.5 pore volume แล้วจะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ค่าคงที่หลังจากผ่านไปได้ 1.5 pore volume ความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ของทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วง 1.5×10^{-6} ถึง 4.7×10^{-6} ซม./วินาทีและมีค่ามากกว่าการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา 758 ถึง 2317 เท่า



รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%

จากรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นผลการทดลองของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าลักษณะของกราฟก่อนที่จะเข้าสู่ค่าคงที่มีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละความเข้มข้นของสารละลาย HCl ความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.4×10^{-9} ถึง 2.0×10^{-8} ซม./วินาที ซึ่งต่ำมากเมื่อเทียบกับในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ยิ่งไปกว่านั้น ความสามารถในการไหลซึมผ่านเมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้น 0.1 M ยังมีค่าใกล้เคียงกับในกรณีเมื่อไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปาอีกด้วย ความสามารถในการไหลซึมผ่านจากการไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย HCl มีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 3 ถึง 39 เท่า เท่านั้นเมื่อเทียบกับการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา ซึ่งแสดงว่า วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีผลกระทบจากการไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย HCl น้อยกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%

จากรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ระหว่างวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% กับ 15% ซึ่งไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย HCl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% มีค่าสูงมาก และสูงกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที ในขณะที่กรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีค่าต่ำกว่ามาก และต่ำกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที แสดงว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นทำเป็น Liner มากกว่า

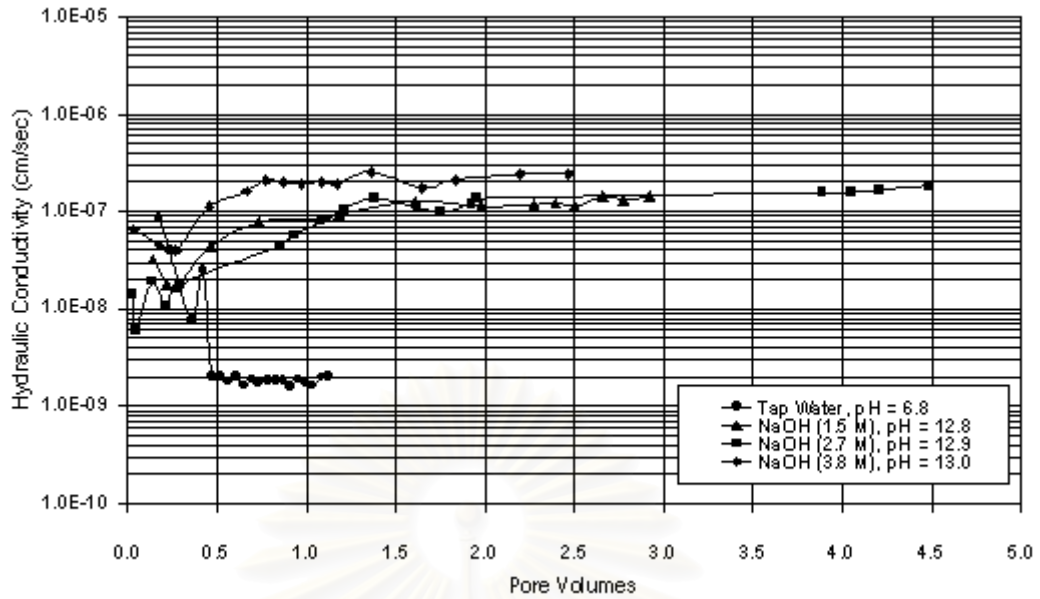


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

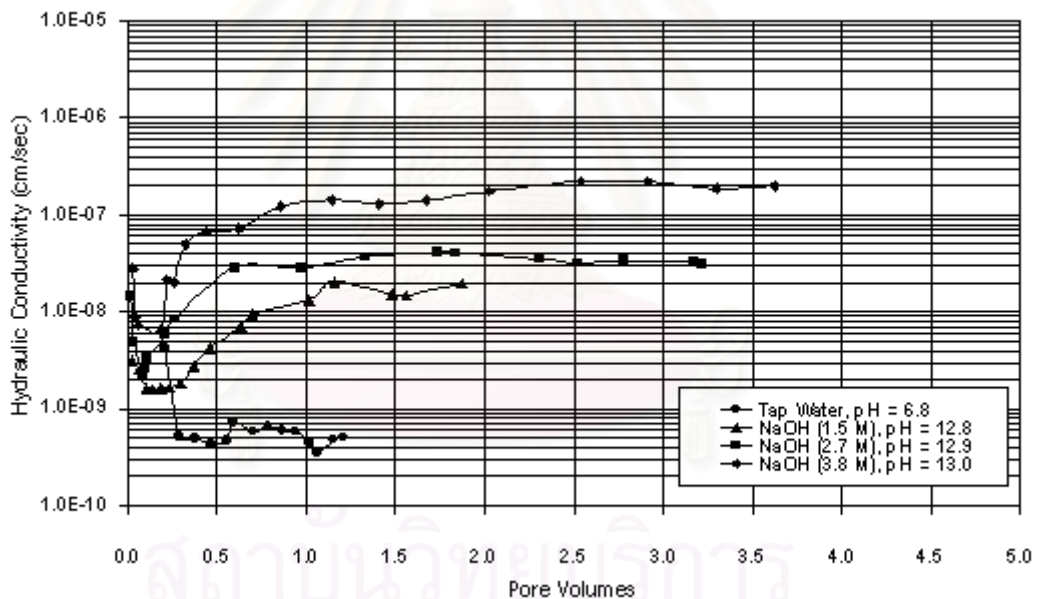
4.2.6 สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 M 2.7 M และ 3.8 M ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 12.8 12.9 และ 13.0 ตามลำดับ นำมาใช้ทดสอบการไหลซึมผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.16 ถึง 4.18

จากรูปที่ 4.16 พบว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการไหลผ่านด้วยสารละลาย NaOH ในลักษณะเดียวกับการไหลผ่านด้วยสารละลาย HCl คือ มีค่าลดลงในช่วงแรกแล้วเพิ่มขึ้นในช่วงกลางจนเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงหลัง ความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ของทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 2×10^{-7} ซม./วินาที และมีค่ามากกว่าในกรณีของน้ำประปาประมาณ 100 เท่า



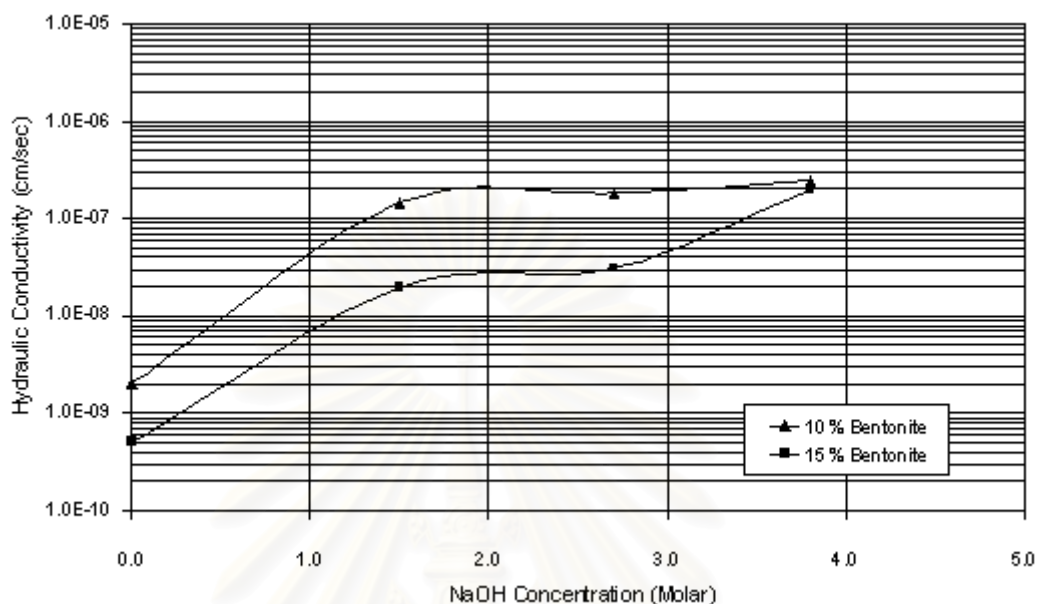
รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%



รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15%

จากรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงผลการทดลองของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% จะสังเกตเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านตามปริมาณการไหลผ่านด้วยสารละลาย NaOH มีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% แต่ความสามารถในการไหลซึมผ่านในช่วงคงที่ของแต่ละความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่มีแนวโน้มว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความ

เข้มข้นของสารละลาย NaOH และเมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปาพบว่า วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นในการทดลอง มีความสามารถในการไหลซึมผ่านเพิ่มขึ้น 39 ถึง 394 เท่า

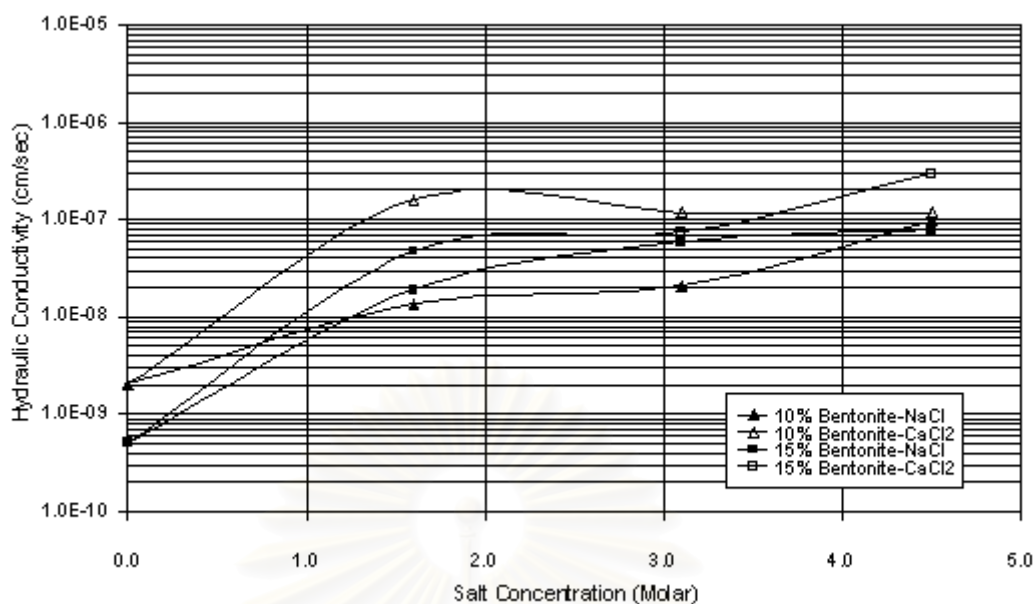


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% พบว่า วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaOH มีความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำกว่าในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% อย่างชัดเจน ยกเว้นที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 3.8 M ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีความเหมาะสมกับการใช้งานเป็น Liner มากกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% เมื่อพิจารณาด้วยการไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaOH

4.2.7 เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์กับสารละลายเกลือแคลเซียมคลอไรด์

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัสดุผสมถูกไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย CaCl_2 ความสามารถในการไหลซึมผ่านจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย NaCl โดยจะสังเกตเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนในวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ในขณะที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% เมื่อไหลซึมผ่านด้วยสารละลายทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

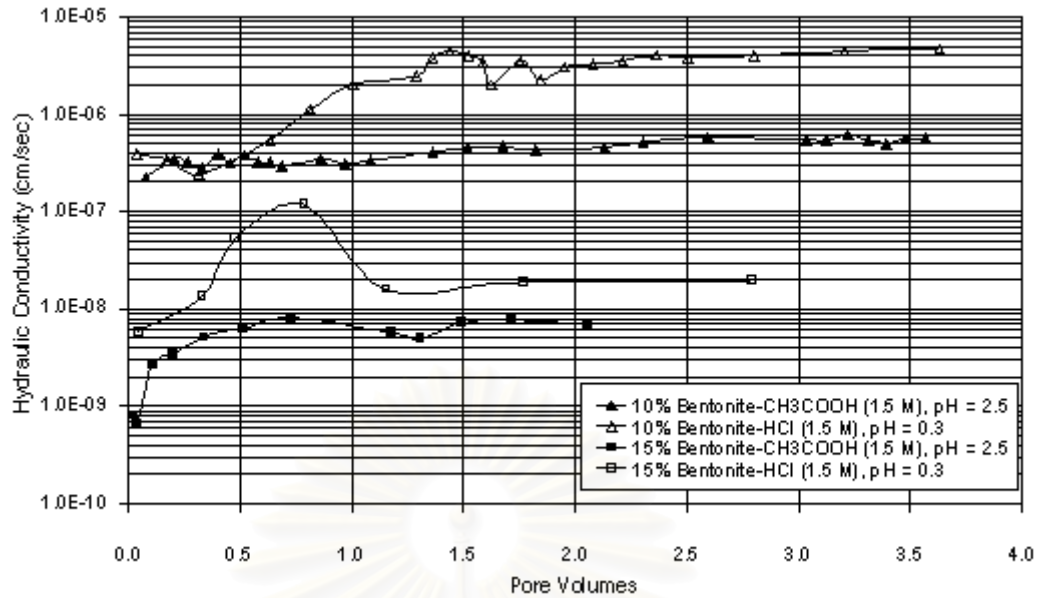
4.2.8 เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายกรดอินทรีย์ (กรดอะซิติก) กับสารละลายกรดอนินทรีย์ (กรดไฮโดรคลอริก)

การเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยการไหลซึมผ่านของสารละลายกรดทั้งสองชนิด จะพิจารณาที่ความเข้มข้น 1.5 M ซึ่งเป็นความเข้มข้นค่าเดียวที่มีการทดลองเหมือนกัน

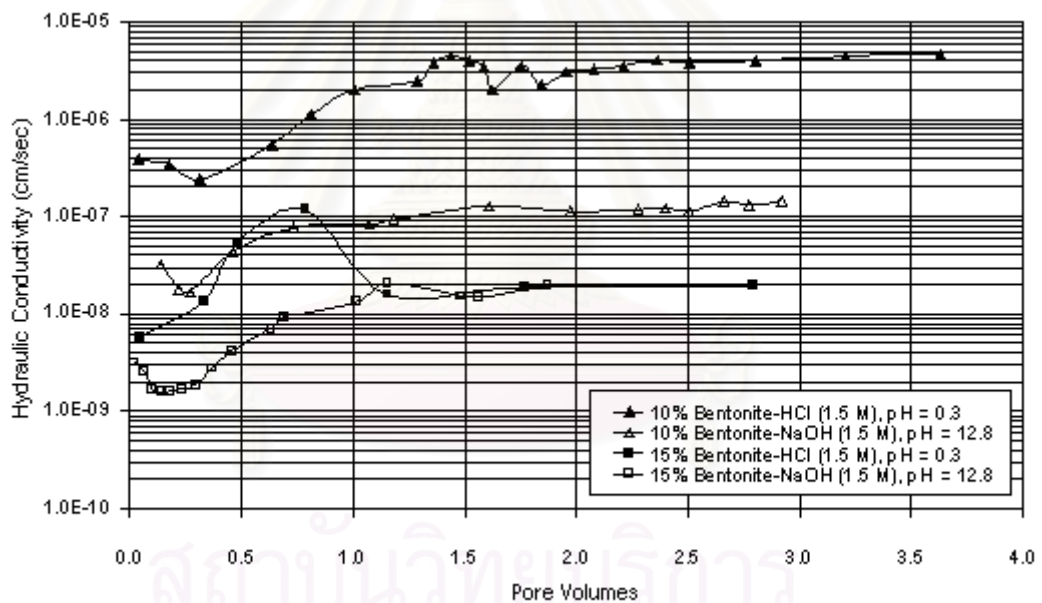
จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อพิจารณาในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์เดียวกัน การไหลซึมผ่านด้วยสารละลาย HCl จะทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับการไหลซึมด้วยสารละลาย CH₃COOH

4.2.9 เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายกรดแก่ (กรดไฮโดรคลอริก) กับสารละลายเบสแก่ (เบสโซเดียมไฮดรอกไซด์)

ผลการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลาย 1.5 M เท่ากัน (รูปที่ 4.21) แสดงให้เห็นว่า ในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% การไหลซึมด้วยสารละลาย HCl จะทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการไหลซึมด้วยสารละลาย NaOH อย่างชัดเจน แต่ในกรณีของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% การเพิ่มขึ้นของความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกันมากจนอาจจะกล่าวได้ว่าเท่ากัน ดังนั้นจึงยังไม่สามารถระบุได้ว่าสารละลายกรดแก่หรือเบสแก่มีผลเสียต่อวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์มากกว่ากัน เนื่องจากผลกระทบบังกล่าวมีแนวโน้มว่าจะขึ้นกับปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม และผลการทดลองเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นค่าเดียวเท่านั้น



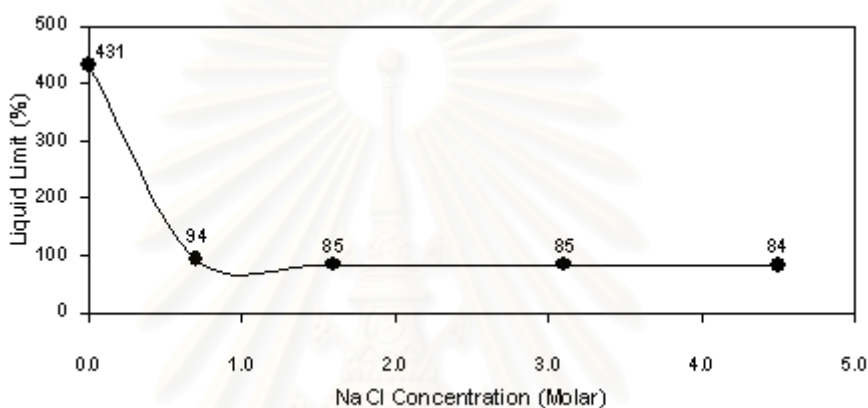
รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายกรดอะซิติกกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1.5 M



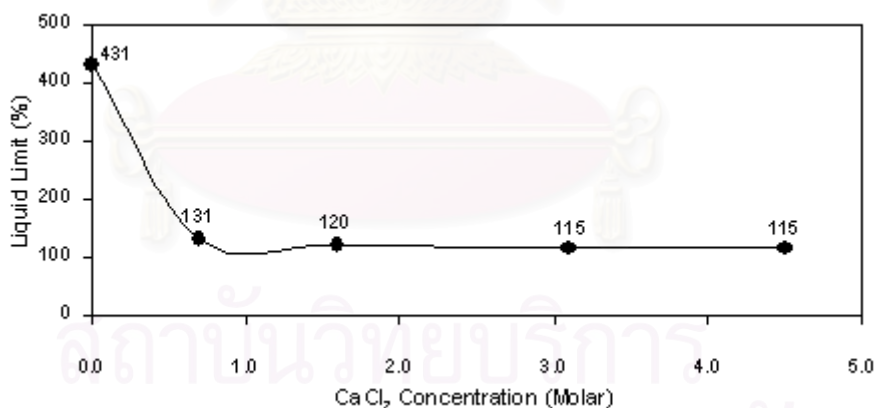
รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกกับสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.3 ผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวของเบนโทไนต์โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ

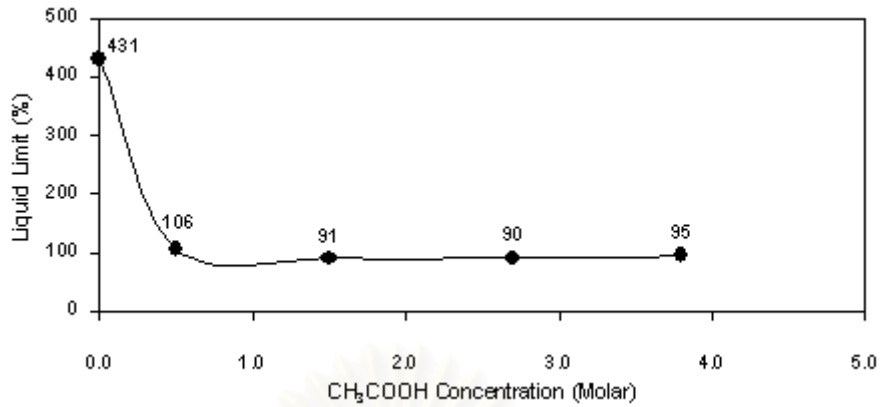
การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางการดูดซับของเหลวของเบนโทไนต์ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของของเหลวภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคเบนโทไนต์ จากการทดลองพบว่า ในทุกสารเคมีทดสอบและทุกความเข้มข้น ค่าพิกัดขีดเหลวจะลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าทดสอบด้วยน้ำประปาซึ่งถือว่าเป็นกรณีอ้างอิง โดยค่าพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยน้ำประปามีค่าเท่ากับ 431% และค่าพิกัดขีดเหลวของสารทดสอบอื่นแสดงไว้ดังรูปที่ 4.22 ถึง 4.26



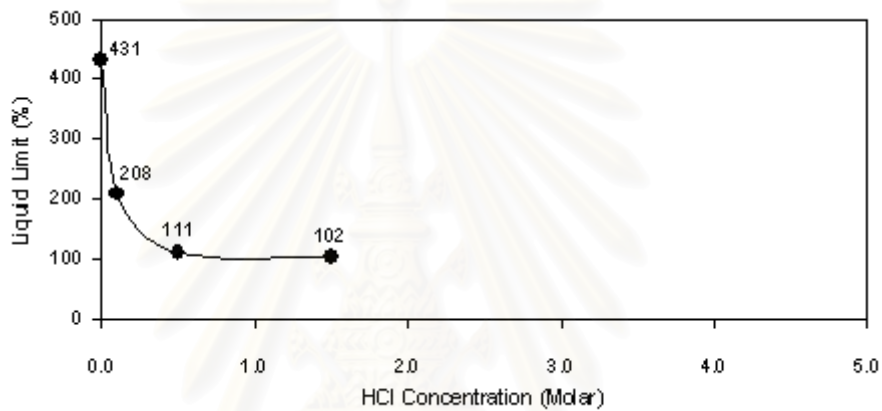
รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์



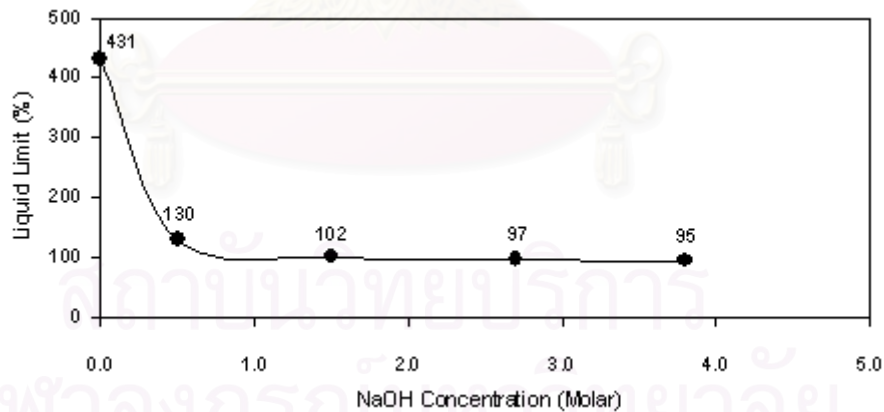
รูปที่ 4.23 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



รูปที่ 4.24 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายกรดอะซิติก



รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก



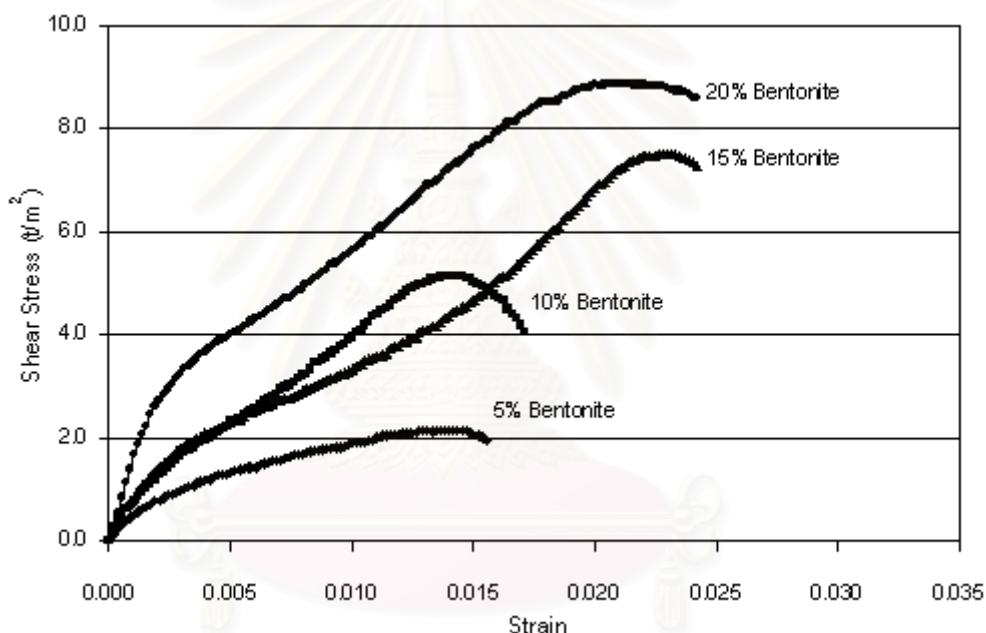
รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเบนโทไนต์อยู่ร่วมกับสารเคมีที่นำมาทดสอบจะทำให้มีคุณสมบัติด้านพิกัดขีดเหลวลดลงอย่างมากภายในช่วงความเข้มข้นถึงประมาณ 1 M เมื่อเปรียบเทียบกับในสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำประปา และความเข้มข้นที่มากขึ้นไม่ได้มีผลทำให้ค่าพิกัดขีด

เหลวลดลงได้อีกมากนัก นั้นย่อมาหมายความว่า เบนโทไนต์มีพฤติกรรมการดูดซับของเหลวได้น้อยลงอย่างมากแม้ว่าจะอยู่ในสภาพแวดล้อมของสารเคมีที่มีความเข้มข้นภายใน 1 M เท่านั้น

4.4 ผลการทดลองหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี Unconfined Compression Test

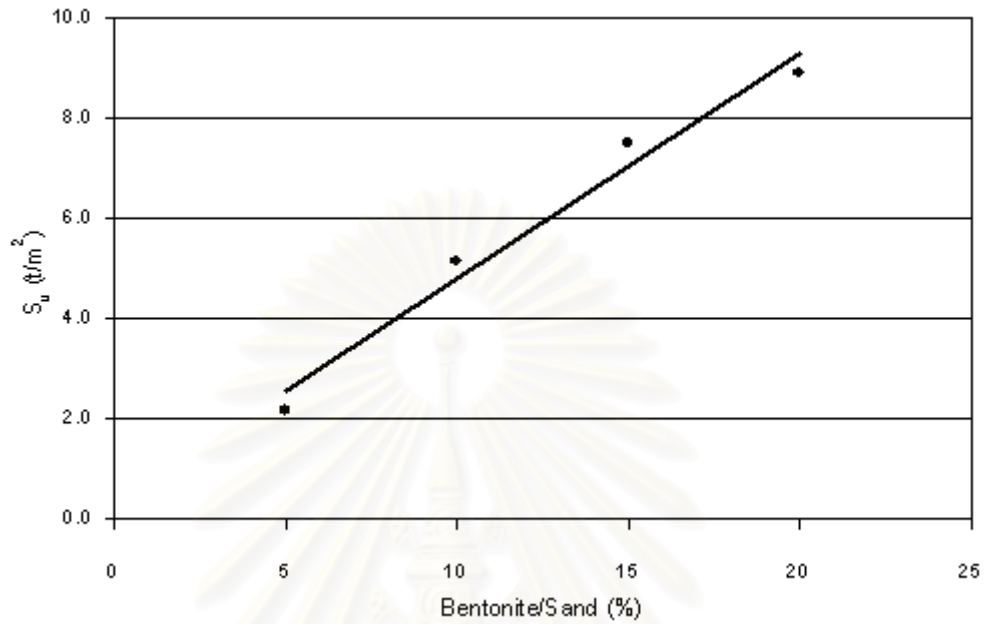
การทดลองนี้เป็นการหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5% 10% 15% และ 20% โดยใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัด 16% เพื่อเป็นข้อมูลทางด้านกำลังของตัวอย่างที่ใช้ทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านซึ่งถือเป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28



รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดลองหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี Unconfined Compression Test

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม 5% 10% 15% และ 20% และที่ปริมาณความชื้นในการบดอัด 16% มีค่าเท่ากับ 2.2 5.2 7.5 และ 8.9 ตัน/ตร.ม. ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม อย่างไรก็ตามในสภาพการใช้งานจริงวัสดุผสมจะต้องอยู่ในสภาพเปียกชื้นอย่างแน่นอน ดังนั้นค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนจะสามารถลดลงได้อย่างมาก ยิ่งในกรณีวัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนต์สูง เนื่องจากเบนโทไนต์มีคุณสมบัติการดูดซับน้ำได้เป็นอย่างดี และดังที่ได้กล่าวมานี้ เมื่อพิจารณาทางด้านกำลัง ปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสมที่สามารถนำไปใช้งานในภาคสนามได้

อย่างมีประสิทธิภาพจึงไม่ใช่ปริมาณที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนหลังการบดอัดสูงเพียงอย่างเดียว หากแต่ยังจะต้องคำนึงถึงความไวต่อการเปลี่ยนแปลงทางตามสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงในขณะใช้งานอีกด้วย



รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำกับปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สรุปผลการทดลองหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนด์บดอัดด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test

วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนด์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนด์ 5% 10% และ 15% เมื่อถูกบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test พบว่า วัสดุผสมที่บดอัดแล้วมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด (γ_{dmax}) อยู่ในช่วง 1.77 ถึง 1.80 ตัน/ลบ.ม. และความชื้นที่เหมาะสม (OMC) อยู่ในช่วง 13.5 ถึง 15.0% ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณเบนโทไนด์ในวัสดุผสมมีผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

5.1.2 สรุปผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารเคมีผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนด์บดอัด

1. ขณะทดลองการไหลซึมของของเหลวไหลซึมผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนด์บดอัดพบว่าเกิดการทรุดตัวน้อยมากโดยมีค่าประมาณ 0.01 ถึง 0.02 มม. เท่านั้น

2. ความสามารถในการไหลซึมของน้ำประปาผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนด์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนด์ 5% 10% และ 15% มีค่าประมาณ 3×10^{-6} , 2×10^{-9} , 5×10^{-10} ซม./วินาที ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนด์ 5% มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงกว่ามาตรฐานของชั้นวัสดุกันซึมจึงไม่มีการนำมาทดลองกับสารเคมีอื่น ๆ ในขณะที่วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนด์ 10% และ 15% ให้ค่าที่สอดคล้องกับข้อกำหนด จึงได้นำวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนด์ดังกล่าวมาทดลองการไหลซึมผ่านด้วยสารเคมีอื่น

3. ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมเมื่อไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปามีแนวโน้มว่าจะลดลงเมื่อปริมาณเบนโทไนด์ในวัสดุผสมเพิ่มขึ้น และปริมาณเบนโทไนด์ที่มากกว่า 7% จึงจะสามารถทำให้วัสดุผสมมีความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที แต่จะสังเกตพบว่ามีปริมาณเบนโทไนด์ในวัสดุผสมสูงถึงค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งทำให้การผสมให้สม่ำเสมอทำได้ยากแล้ว ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมที่ได้ อาจจะไม่ต่ำเท่าที่ควร

4. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% มีค่าเพิ่มขึ้น 7 ถึง 156 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา

5. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% มีค่าเพิ่มขึ้น 58 ถึง 589 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา

6. สารละลายกรดอะซิติกทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% มีค่าเพิ่มขึ้น 14 ถึง 350 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา

7. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% มีค่าเพิ่มขึ้น 3 ถึง 2317 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา

8. สารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% และ 15% มีค่าเพิ่มขึ้น 39 ถึง 394 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการไหลซึมผ่านด้วยน้ำประปา

9. การไหลซึมด้วยสารละลายเกลือแคลเซียมคลอไรด์มีผลทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์มีค่าเพิ่มขึ้นได้มากกว่าการไหลซึมด้วยสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์

10. กรดอินทรีย์ (กรดอะซิติก) ที่ความเข้มข้น 1.5 M ทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าในกรณีของกรดอินทรีย์ (กรดไฮโดรคลอริก) ที่ความเข้มข้นเดียวกัน

11. ในวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% สารละลายกรดแก่ (กรดไฮโดรคลอริก) สามารถทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าในกรณีของสารละลายเบสแก่ (เบสโซเดียมไฮดรอกไซด์) ในขณะที่กรณีวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% สารละลายทั้งสองชนิดให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน

12. เมื่อเปรียบเทียบจากความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้สารเคมีที่ใช้ทดลองพบว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 15% มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นวัสดุกันซึมมากกว่าวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10%

5.1.3 สรุปผลการทดลองหาพิกัดขีดเหลวของเบนโทไนต์โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ

1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทำให้พิกัดขีดเหลวของเบนโทไนต์มีค่าลดลงอย่างมาก แม้ว่าจะอยู่ในสถานะเข้มข้นเพียง 1 M

2. การลดลงของค่าพิกัดขีดเหลวเมื่อทดลองด้วยสารเคมีแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเบนโทไนต์มีค่าลดลงซึ่งอาจพิจารณาได้ถึงขนาดวงน้ำรอบอนุภาค เบนโทไนต์ที่เล็กลง

5.1.4 สรุปผลการทดลองหากล้างด้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี

Unconfined Compression Test

1. กล้างด้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 5% 10% 15% และ 20% และที่ปริมาณความชื้นในการบดอัด 16% ในสภาพหลังการบดอัดโดยยังไม่มีกรไหลซึมผ่านด้วยของเหลวใด ๆ มีค่าเท่ากับ 2.2 5.2 7.5 และ 8.9 ตัน/ตร.ม. ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มว่ากล้างด้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโทไนต์ในวัสดุผสม

2. วัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์สูงมีค่ากล้างด้านทานแรงเฉือนสูงหลังจากทำการบดอัด แต่ในสภาวะใช้งานซึ่งจะต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นของเหลวย่อมอาจจะทำให้กล้างด้านทานแรงเฉือนตกลงได้มากเนื่องจากเบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับของเหลวสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือที่เป็นหลัก การของ rigid wall นั้นย่อมหมายความว่า ผลการทดลองที่ได้มีผลกระทบจากการไหลข้างซึ่งทำให้ผลการทดลองอาจจะได้ค่าที่ใกล้เคียงของจริงในสนามหรือไม่ก็ได้

2. การศึกษาในงานวิจัยนี้กระทำโดยนิยามสารปนเปื้อนด้วยสารเคมีเพียงชนิดเดียวในของเหลว ซึ่งในความเป็นจริงน้ำชะมูลฝอยจะมีส่วนประกอบหลากหลายชนิดปะปนกันจึงอาจจะเป็นผลให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลซึมผ่านด้วยของเหลวที่มีสารปนเปื้อนเพียงชนิดเดียว ดังนั้นจึงควรศึกษากับน้ำชะมูลฝอยจริง พร้อมทั้งกับองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วย

3. ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากของเหลวที่มีสารปนเปื้อนต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านของวัสดุผสมเป็นหลัก โดยมีผลของกำลังต้านทานแรงเฉือนหลังจากทำการบดอัดเท่านั้น ซึ่งของเหลวที่มีสารปนเปื้อนเหล่านี้อาจจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกำลังหรือไม่ก็เป็นได้ จึงควรที่จะศึกษาผลกระทบทั้งทางด้านกำลังและด้านความสามารถในการไหลซึมผ่านควบคู่กันไปด้วย

4. วัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดยังคงอาจจะมีผลกระทบจากปัจจัยอื่นนอกเหนือจากของเหลวที่ไหลซึมผ่าน เช่น พลังงานในการบดอัด ปริมาณเบนโทไนต์ที่เหมาะสม ขนาดผลของทราย ชนิดของเบนโทไนต์ เป็นต้น โดยในการศึกษาเพิ่มเติมควรที่จะค้นหาสภาพของวัสดุผสมที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามสภาพแวดล้อมสูงสุด เพื่อที่จะนำไปประยุกต์กับการใช้งานได้ตรงตามเป้าหมายต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

หนังสือ

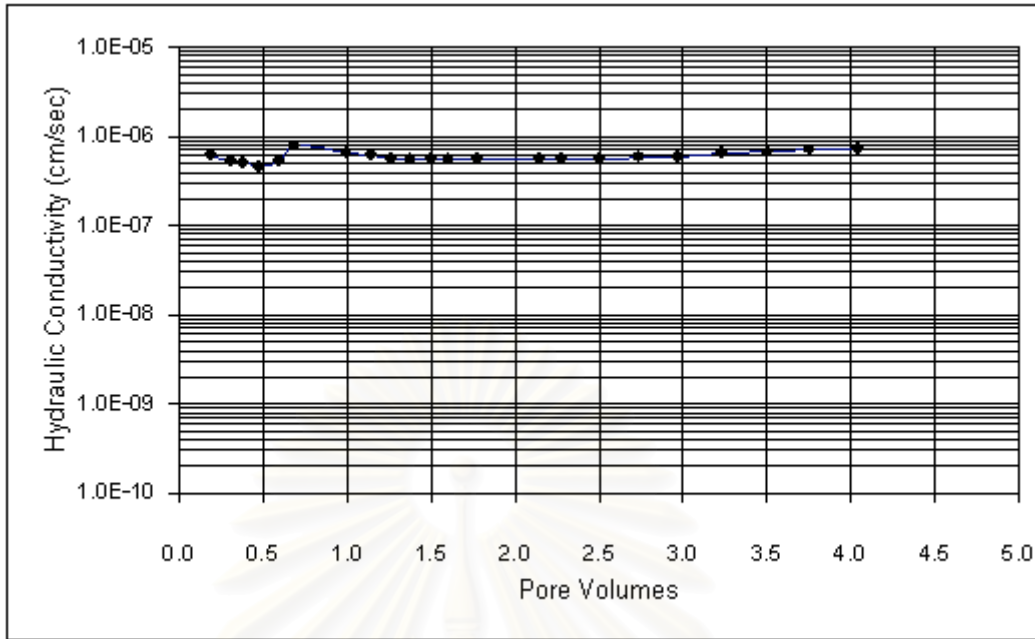
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. 1969. Soil Mechanics, SI Version. New York: John Wiley & sons
- Mitchell, J. K. 1993. Fundamentals of Soil Behavior. Second Edition. Singapore: John Wiley & sons
- Rowe, R. K. Quigley, R. M. and Booker, J. R. 1995. Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities. First Edition. E & FN Spon. London: Chapman & Hall
- บทความในวารสาร
- Anderson, D. 1982. Does landfill leachate make clay liners more permeable?. Civil Engineering-ASCE: 66-69.
- Anderson, D. C. Brown, K. W. and Thomas, J. C. 1985. Conductivity of compacted clay soils to water and organic liquids. Waste Management & Research 3: 339-349.
- Ashford, S. A. Visvanathan, C. Husain, N. and Chomsurin, C. 2000. Design and construction of engineered municipal solid waste landfills in Thailand. Waste Management & Research 18: 462-470.
- Benson, C. H. and Daniel, D. E. 1990. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 8: 1231-1248.
- Bowders, J. J. and Daniel, D. E. 1987. Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 12: 1432-1448.
- Broderick, G. P. and Daniel, D. E. 1990 Stabilizing compacted clay against chemical attack. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 10: 1549-1567.
- Chapuis, R. P. 1990 Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory test. Canadian Geotechnical Journal, 27: 47-57.
- Dineen, K. Colmenares, J. E. Ridley, A.M. and Burland, J.B. 1999. Suction and volume changes of a bentonite-enriched sand. Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 137: 197-201.

- Fernandez, F. and Quigley, R. M. 1985. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. Canadian Geotechnical Journal, 22: 205-214.
- Fernandez, F. and Quigley, R. M. 1991. Controlling the destructive effects of clay-organic liquid interactions application. Canadian Geotechnical Journal, 28: 388-398.
- Foreman, D. E. and Daniel, D. E. 1986. Permeation of compacted clay with organic chemicals. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 7: 669-681.
- Gleason, M. H. Daniel, D. E. and Eykholt, G. R. 1997. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 5: 438-445.
- Gnanapragasam, N. Lewis, B. G. and Finno, R. J. 1995. Microstructural changes in sand-bentonite soils when exposed to aniline. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 2: 119-125.
- Kenny, T. C. van Veen, W. A. Swallow, M. A. and Sungaila, M. A. 1992. Hydraulic conductivity of compacted sand-bentonite mixtures. Canadian Geotechnical Journal, 29: 364-374.
- Lambe, T. W. 1958. The structure of compacted clay. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 84, No. SM 2: 1654-1-1654-33.
- Mesri, G. and Olson, R. E. 1971. Mechanisms controlling the permeability of clays. Clays and Clay minerals Vol. 19: 151-158.
- Mitchell, J. K. and Madsen, F. T. 1987. Chemical effects on clay hydraulic conductivity. Geotechnical Practice for Waste Disposal' 87: 87-116.
- Mollins, L. H. Stewart, D. I. And Cousens, T. W. 1996. Predicting the properties of bentonite-sand mixtures. Clays and Clay minerals Vol. 31: 243-252.
- Mollins, L. H. Stewart, D. I. And Cousens, T. W. 1999. Drained strength of bentonite-enhanced sand. Geotechnique 49, No. 4: 523-528.
- Uppot, J. O. and Stephenson, R. W. 1989. Permeability of clays under organic permeants. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 1: 115-131.

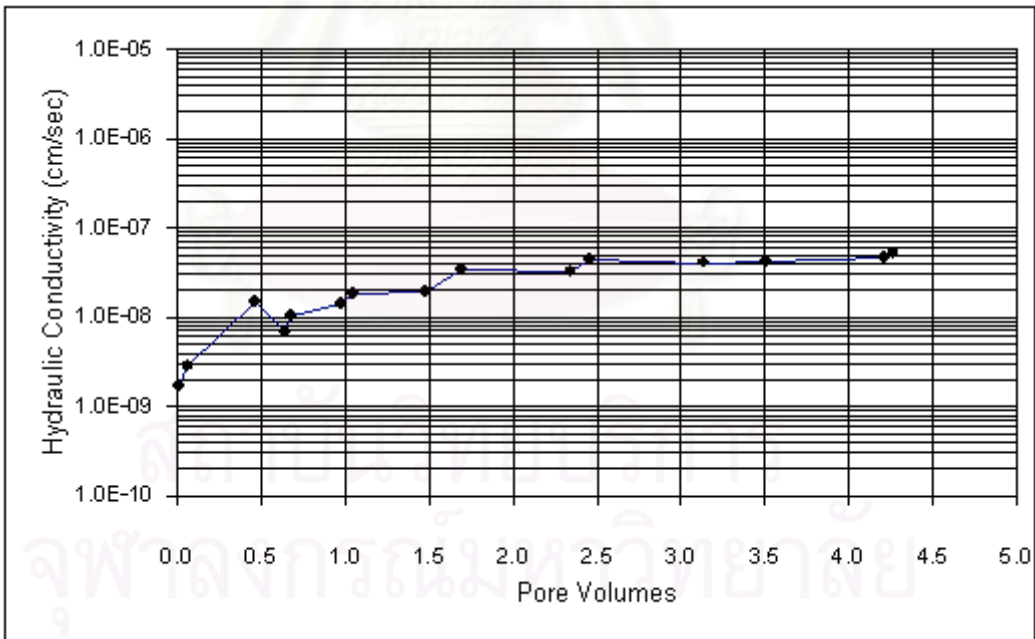
ภาคผนวก



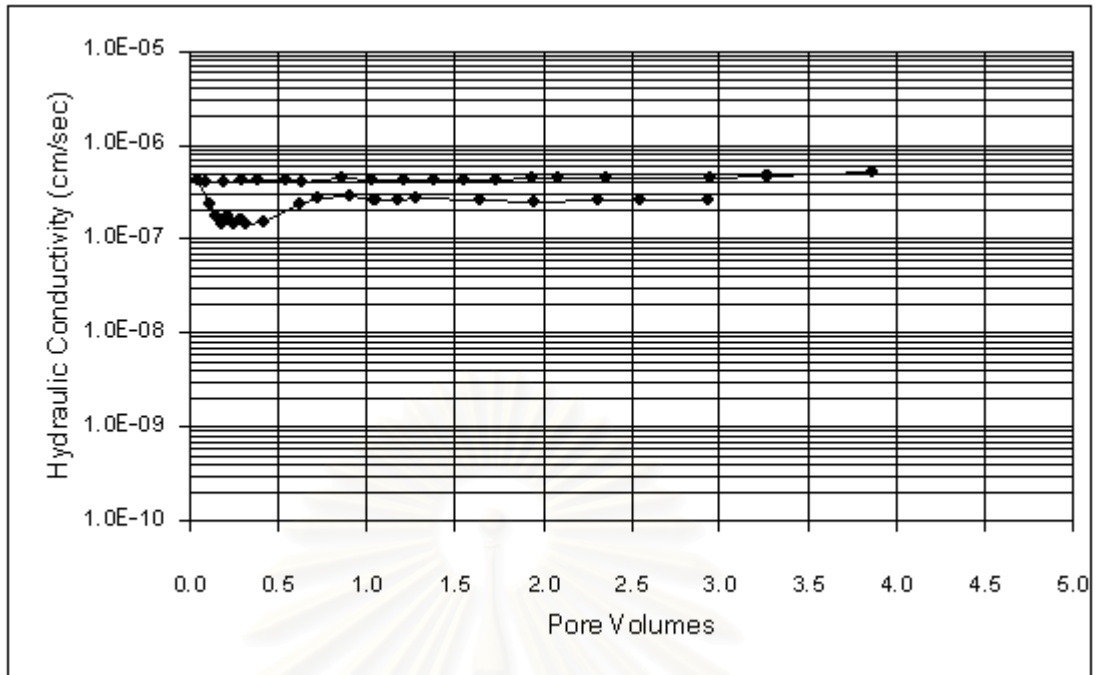
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ก แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 4.5 M ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ของตัวอย่างที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับตัวอย่างในกลุ่ม



รูป ข แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 M ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ของตัวอย่างที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับตัวอย่างในกลุ่ม



รูป ค แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการไหลซึมของสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.5 M ผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัดที่ปริมาณเบนโทไนต์ 10% ของตัวอย่างที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับตัวอย่างในกลุ่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายโกวิทย์ ทศศิริ เกิดวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2521 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีพ.ศ. 2542 โดยเข้าศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพีในปีเดียวกัน จนจบหลักสูตรในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย