

ความสามารถในการปรับสภาพกรดและเบสของดินเหนียวบดอัด



นาย กิตติพงษ์ สกลศรีจิรวัดน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 947-347-104-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20114916

ACID AND BASE BUFFERING IN A COMPACTED CLAY



MR. KITTIPONG SAKULSRIJIRAWAT

สถาบันวิทยบริการ

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 2000

ISBN 947-347-104-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์  
โดย  
สาขาวิชา  
อาจารย์ที่ปรึกษา

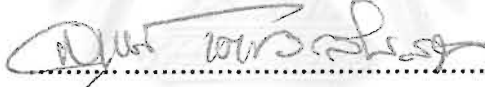
ความสามารถในการปรับสภาพกรดและเบสของดินเหนียวบดอัด  
นายกิตติพงษ์ สกลศรีจิรวัดน์  
วิศวกรรมปฐพี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

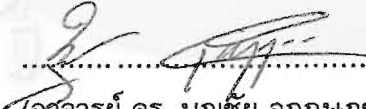
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรันตรา สัมพันธ์รักษ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

กิตติพงษ์ สุกุลศรีจิรววัฒน์ : ความสามารถในการปรับสภาพกรดและเบสของดินเหนียวบดอัด (ACID AND BASE BUFFERING IN A COMPACTED CLAY)

อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 103 หน้า, ISBN 947-347-104-9

งานศึกษาวิจัยนี้เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน การแพร่กระจายได้ รวมถึงความสามารถในการปรับสภาพกรดและเบส ของดินเหนียวบดอัดในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินที่ใช้ในงานศึกษาวิจัยนี้เป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนซึ่งมีต้นกำเนิดบริเวณกรุงเทพฯ โดยเก็บที่ระดับความลึก 1-3 เมตรจากผิวดิน โดยจะนำมาอบแห้งและบดให้ละเอียดเป็นผงก่อนนำไปเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ ส่วนกรดและเบสที่ใช้เป็นสารทดสอบ คือ 0.1M HCl (pH = 1) และ 0.1 NaOH (pH = 13) ตามลำดับ ในการบดอัดตัวอย่างดิน จะทำการบดอัดด้วย Standard Proctor Test สำหรับการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน และบดอัดลงใน Long-Column Box ที่ได้พัฒนาขึ้นมา เพื่อทดสอบความสามารถในการแพร่กระจายได้ โดยจะบดอัดให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด

จากการทดสอบภายหลังจากปล่อยกรด หรือเบสให้ไหลเข้าสู่ตัวอย่างดินแล้วพบว่าค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $1 \times 10^{-9}$  to  $5 \times 10^{-11}$  เมตร ต่อ วินาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ปล่อยน้ำไหลซึมผ่านนั้นถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก นอกจากนี้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเมื่อเทียบกับเวลาที่ทดสอบนั้นก็ถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายได้ของดินเนื่องจากคลอไรด์สามารถคำนวณได้เท่ากับ  $2.6 \times 10^{-10}$  เมตร<sup>2</sup> ต่อ วินาที หลังการทดสอบแล้วเสร็จได้นำตัวอย่างดินมาวัดค่า pH พบว่า ดินมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.0 ถึง 7.7 ในกรณีทดสอบด้วยกรด และเท่ากับ 7.8 ถึง 8.8 เมื่อทดสอบด้วยเบส ในขณะที่ค่า pH ของดินเริ่มต้นเท่ากับ 7.5 ถึง 8.0 จากผลการวัดค่า pH ที่ได้ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปรับสภาพกรด-เบสของตัวอย่างดิน อาจกล่าวได้ว่าน่าจะมาจากปริมาณของไบคาร์บอเนตในดินที่ลดลงอย่างมากหลังทำปฏิกิริยากับสารทดสอบ ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวการหลักในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบส ของดินนี้

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

สาขาวิชา วิศวกรรมปฐพี

ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต... สุกุลศรีจิรววัฒน์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา... สุพจน์ เตชวรสินกุล

## AN ABSTRACT

## 4170227921: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: HYDRAULIC CONDUCTIVITY/ DIFFUSION /ACID/BASE

KITTIPONG SAKULSRIJIRAWAT: THESIS TITLE. (ACID AND BASE BUFFERING IN A COMPACTED CLAY)

THESIS ADVISER: ASSIST. PROF. SUPOT TEACHAVORASINSAKUN, 103 pp.

ISBN 947-347-104-9

A laboratory of permeability and diffusion test in compacted clay for estimate Hydraulic Conductivity (k) and Diffusion Coefficient (D) when use strong acid-base as pore fluids and performances in buffering strong acid-base is demonstrated. The compacted clay used in this experiment was Bangkok Clay, collected at depth of 1-3 m. below ground surface, after oven dried, was thoroughly mixed to batches of clay powder. The pore fluids considered were the solution of Hydrochloric acid (0.1 M HCl, pH=1) and Sodium Hydroxide (0.1M NaOH, pH=13). The compacted clay samples were formed according to Standard Proctor Test and Long-Column Box, which developed this research, for measure hydraulic conductivity and diffusion coefficient, respectively, at maximum dry density.

It is found that the measured hydraulic conductivity when use acid and base as pore fluids, range of  $1 \times 10^{-7}$  to  $5 \times 10^{-9}$  m/s, was not change from that of using water as pore fluid. Furthermore, there is no change in the hydraulic conductivity due to the effect of exposed time. The value of Chloride diffusion coefficient is about  $2.6 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. However, the results of pH value of soil after permeability and diffusion test, obtained by pH-meter, are about 6.0 to 7.7 and 7.8 to 8.8 when use HCl and NaOH as the pore fluids, respectively. The results had shown the minor changes in pH of the samples (the pH value of soil samples before test is 7.5- 8.0). The buffering performance is due the highly reduction in the amount of bicarbonate ion ( $\text{HCO}_3^-$ ) in the tested samples. It was believed to be the main pH buffering agent and bicarbonate ion might be a by-product of infiltrates rainfall whose naturally contains most of the carbonic acid.

Department Civil Engineering

Field of study Geotechnical Engineering

Academic year 2000

Student's signature.....

Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เรื่อง "ความสามารถในการปรับสภาพกรดและเบสของดินเหนียวดอัด" ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เดชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำต่างในการวิจัยมาด้วยดีตลอดและขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรฉัตร สัมพันธ์รักษ์ และ อาจารย์ ดร. บุญชัย อุกฤษฏชน ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณก้องเกียรติ วิเศษรัตน์ นิสิตปริญญาเอก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ แนวคิดและวิธีการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน

ขอขอบคุณ คุณทิว คำปาน นิสิตปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างดิน

ขอขอบคุณ พี่ๆในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพีทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ขอรำลึกถึงพระคุณของบิดา และมารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจเสมอจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

กิตติพงษ์ สกุลศรีจิรวัดณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีบทและผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต.....	5
2.1 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในชั้นดิน.....	5
2.2 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์.....	11
2.2.1 Fixed Concentration Boundary Condition.....	11
2.2.2 Fixed Gradient Boundary Condition.....	13
2.2.3 Variable Flux Boundary Condition.....	14
2.3 การทดสอบเพื่อหาค่าทาง Dispersivity Characteristic.....	15
2.4 การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของสารปนเปื้อน ในห้องปฏิบัติการ.....	17
2.4.1 วิธีทดสอบแบบ Fixed wall testing.....	17
2.4.2 วิธีทดสอบแบบ Flexible wall testing.....	18
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน.....	18
2.6 แร่ดินเหนียว.....	19
2.6.1 การจำแนกประเภทแร่ดินเหนียว.....	20
2.6.2 Isomorphous Substitution.....	22
2.6.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของดิน.....	23
2.6.4 ทฤษฎีวงน้ำ.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6.5 เสถียรภาพคอลลอยด์ของดินเหนียว.....	26
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านกับลักษณะการบดอัด...26	26
<b>บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดสอบ.....</b>	<b>32</b>
3.1 ที่มาของตัวอย่างดิน.....	32
3.2 ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ.....	32
3.3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ .....	32
3.3.1 เครื่องมือทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน แบบ Rigid Boundary.....	34
3.3.2 เครื่องมือทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน แบบ Flexible Boundary.....	35
3.3.3 เครื่องมือทดสอบความสามารถในการแพร่กระจายได้.....	35
3.4 วิธีการทดสอบในการหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน.....	36
3.4.1 การทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด.....	36
3.4.2 การทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้น้ำเป็น pore fluid.....	37
3.4.3 การทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้สารทดสอบเป็น pore fluid.....	39
3.4.4 การทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบ Flexible Boundary .....	40
3.5 วิธีการทดสอบหาคุนสมบัติการแพร่กระจายได้ของดิน.....	41
3.5.1 การเตรียมตัวอย่างดิน และเครื่องมือทดสอบ.....	42
3.5.2 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปวิเคราะห์.....	43
3.6 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในดิน.....	45
3.7 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโบคาร์บอนเนตในดิน.....	45
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์.....</b>	<b>54</b>
4.1 ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในดินที่เหมาะสม.....	54
4.2 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของดินก่อนที่จะนำมาทดสอบ.....	55
4.3 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อใช้น้ำเป็นสารทดสอบ.....	56
4.3.1 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Rigid Boundary.....	56



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

4.3.2	ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Flexible Boundary.....	57
4.4	ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อใช้กรดและเบสเป็น pore fluids....	58
4.5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินหลังการทดสอบ	
	ความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	59
4.5.1	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินเมื่อทดสอบ	
	โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็น pore fluid.....	60
4.5.2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินเมื่อทดสอบ	
	โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น pore fluid.....	60
4.6	ค่า pH ของสารทดสอบทั้งสองชนิดที่ไหลผ่านตัวอย่างดิน และ	
	ค่า pH ของตัวอย่างดินภายหลังทำการทดสอบแล้วเสร็จ.....	61
4.7	ปริมาณคลอไรด์ในดินหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	62
4.8	ปริมาณโบคาร์บอเนตในดินหลังการทดสอบ	
	ความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	63
4.8.1	ปริมาณโบคาร์บอเนตในดินเมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริก	
	เป็นสารทดสอบ.....	63
4.8.2	ปริมาณโบคาร์บอเนตในดินเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์	
	เป็นสารทดสอบ.....	64
4.9	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในดินหลังการทดสอบ	
	โดยวิธี X-ray Fluorescence.....	65
4.10	ผลการวัดค่า pH ของดินที่ผสมกับสารทดสอบโดยไม่ผ่านการบดอัด.....	66
4.11	ผลการทดสอบการแพร่กระจายของดิน	
	โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็น pore fluid.....	68
4.11.1	ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินหลังการทดลอง...	68
4.11.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโบคาร์บอเนตในตัวอย่างดิน	
	ภายหลังการทดสอบ.....	69
4.11.3	ผลการวัด ค่า pH ของตัวอย่างดินที่เวลาทดสอบต่างกัน.....	69
4.11.4	ความเข้มข้นของสารที่ทดสอบที่ระยะเวลาทดสอบมากขึ้น.....	70
4.11.5	ปริมาณความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทดสอบมากขึ้น.....	70
4.12	ผลการวัดค่า pH ของดินใน column box โดยมีสารละลาย	
	โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น pore fluid.....	71

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	95
5.1.1 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่า pH ของตัวอย่างดิน.....	95
5.1.2 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	95
5.1.3 ค่า pH ของดินผสมกับสารทดสอบที่ปริมาณต่าง ๆ กัน.....	98
5.1.4 ผลการทดสอบการแพร่กระจาย.....	98
5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป.....	99
รายการอ้างอิง.....	101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	ค่า $\text{erfc}(x)$ ของฟังก์ชัน Complementary Error Function เพื่อใช้แก้สมการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน.....31
3.1	คุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินก่อนทำการทดสอบ.....32
4.1	ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในดินบดอัด.....54
4.2	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่อยู่ในดินก่อนทำการทดสอบโดยวิธี X-ray Fluorescence.....56
4.3	ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างดินโดยวิธี X-ray Fluorescence ภายหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน .....65
4.4	ค่า pH ของสารทดสอบใน Feed tank ที่เป็นกรดเวลาต่างๆ.....70
4.5	ค่า pH ของสารทดสอบใน Feed tank ที่เป็นกรดเวลาต่างๆ.....72



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 สาเหตุของการเกิดขบวนการเคลื่อนตัวแบบ Mechanical Dispersion.....	28
2.2 การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจากลำคลองเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินเป็นLine source.....	28
2.3 ประจวบที่มายืดเกาะล้อมรอบอนุภาคดินภายใต้สนามไฟฟ้า.....	29
2.4 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเหนียวบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่างๆกัน.....	29
2.5 ผลของความเค้นกดทับที่มีต่อค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	30
3.1 กระจกเซลที่ขั้วบรรจุตัวอย่างดินทดสอบ เมื่อต่อเข้ากับระบบอัดแรงดัน.....	47
3.2 กระจก Plexi-Glass ขั้วบรรจุสารทดสอบเพื่อทดสอบหา ความสามารถในการไหลซึมผ่าน เมื่อต่อเข้ากับระบบอัดแรงดัน.....	47
3.3 ชุด Control Panel ที่ใช้ปรับแรงดันเข้าสู่ตัวอย่างดินทดสอบ.....	48
3.4 ชุด Column-Box และ Feed Tank ขั้วบรรจุสารทดสอบ และน้ำกลั่น.....	48
3.5 เครื่องมือวัดค่า pH.....	49
3.6 แผนภูมิการประกอบชุดเครื่องมือทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	50
3.7 แผนภูมิขั้นตอนในการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน.....	51
3.8 แผนภูมิการประกอบชุดเครื่องมือทดสอบการแพร่กระจายได้.....	52
3.9 แผนภูมิขั้นตอนในการทดสอบการแพร่กระจายได้.....	53
4.1 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างดินทดสอบ.....	73
4.2 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจากการทดสอบแบบ Rigid Boundary โดยใช้น้ำประปาเป็น pore fluid.....	74
4.3 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจากการทดสอบแบบ Flexible Boundary โดยใช้น้ำประปาเป็น pore fluid.....	75
4.4 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเนื่องจากผลของความเค้นกดทับแนวตั้ง.....	76
4.5 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อเทียบกับเวลา.....	77
4.6 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินเมื่อทดสอบโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ.....	78
4.7 ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินเมื่อทดสอบโดยใช้เบสเป็นสารทดสอบ.....	79
4.8 ค่า pH ของสารทดสอบหลังจากผ่านตัวอย่างดินเมื่อเทียบกับเวลา.....	80
4.9 ค่า pH ของดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ.....	81
4.10 ค่า pH ของดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้เบสเป็นสารทดสอบ.....	82
4.11 ปริมาณคลอไรด์ในดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ.....	83

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.12 ปริมาณโบคาร์บอนเนตในดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้กรวดเป็นสารทดสอบ.....	84
4.13 ปริมาณโบคาร์บอนเนตในดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้เบสเป็นสารทดสอบ.....	85
4.14 ค่า pH ของตัวอย่างดินผสมน้ำที่ปริมาณ moisture content ต่าง ๆ กัน โดยไม่ผ่านขั้นตอนการบดอัด.....	86
4.15 ค่า pH ของตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการบดอัดผสมกรดที่ปริมาณกรดต่าง ๆ กัน.....	87
4.16 ค่า pH ของตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการบดอัดผสมเบสที่ปริมาณเบสต่าง ๆ กัน.....	88
4.17 ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....	89
4.18 ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายที่ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด.....	90
4.19 ปริมาณโบคาร์บอนเนตตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจาย โดยใช้กรวดเป็นสารทดสอบ.....	91
4.20 ค่า pH ของตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายโดยใช้กรวด เป็นสารทดสอบที่ระยะเวลาทดสอบต่าง ๆ กัน.....	92
4.21 ปริมาณความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทดสอบเพิ่มมากขึ้น.....	93
4.22 ค่า pH ของตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายโดยใช้เบส เป็นสารทดสอบที่ ระยะเวลาทดสอบต่าง ๆ กัน.....	94

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชั้นดินเหนียวธรรมชาติ และ ดินเหนียวบดอัดมักจะถูกใช้เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกรองสารปนเปื้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการป้องกันสารปนเปื้อนที่ถูกทิ้งออกจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งฝังกลบขยะ เพื่อให้สารปนเปื้อนกระจายตัวออกไปยังชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินโดยรอบ การปนเปื้อนของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินเป็นปัญหาที่ถูกมองข้ามมาเป็นระยะเวลาานาน ทั้งนี้เพราะว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นไม่สามารถสัมผัสหรือรู้สึกได้ในทันที ยกเว้นในกรณีที่สารปนเปื้อนนั้นกระจายตัวออกจนถึงชั้นน้ำใต้ดินด้านล่าง และมีการนำน้ำใต้ดินที่ถูกปนเปื้อนนั้นมาใช้เพื่อการอุปโภค บริโภค ประกอบกับปัญหาสารปนเปื้อนของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินเป็นปัญหาเฉพาะจุดและพื้นที่ (Local problem) ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้การพัฒนาทางเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนนั้นเป็นไปได้ช้าและไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร อีกทั้งความซับซ้อนและการเปลี่ยนแปลงของสภาพชั้นดินในบริเวณต่าง ทำให้เทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมีข้อจำกัดต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่หนึ่งๆ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเริ่มทำการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง ให้มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับชั้นดินในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล ซึ่งมีโอกาสที่จะถูกปนเปื้อนโดยสารพิษที่มีอันตรายได้ง่าย หากไม่มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดแล้ว ประเทศไทยก็จะต้องพึ่งพาแต่เทคโนโลยีจากต่างประเทศ ซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้สูญเสียเงินตราต่างประเทศแล้ว เทคโนโลยีที่นำเข้ามาอาจไม่เหมาะสมกับสภาพของชั้นดินและชั้นน้ำใต้ดินในประเทศไทยก็ได้

ดินเหนียวบดอัดเป็นชั้นดินที่สำคัญในการก่อสร้างแหล่งฝังกลบขยะ โดยจะนำดินเหนียวในพื้นที่มาทำการบดอัดให้ได้ตามมาตรฐานเพื่อใช้ทำเป็น Liner ป้องกันมิให้ของเสียภายในแหล่งฝังกลบขยะ แพร่กระจายออกไปด้านนอก แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการที่ชั้นดินเหนียวบดอัดต้องสัมผัสกับสารเคมีต่างๆภายในแหล่งฝังกลบนั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียวที่มีต้นกำเนิดจากบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยในการศึกษานี้จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในด้านความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) และการแพร่กระจายได้ (Diffusion) ของสารปนเปื้อนต่างๆภายในดินเหนียวบดอัดตามชนิดของ pore fluid โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าค่าการไหลซึมผ่านได้ของดินเหนียวของดินนั้นมีทั้งที่เพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อคุณสมบัติของ pore fluid ที่ใช้เปลี่ยนแปลงไป ใน

การศึกษาวิจัยนี้จะได้นั้นไปที่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการไหลซึมผ่าน เมื่อ pore fluid มีสภาพความเป็นกรด เบสต่างๆ

งานวิจัยนี้จะป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นทางวิศวกรรมที่มีผลโดยตรงและโดยอ้อมต่อการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในดิน โดยจะทำการศึกษาคูณสมบัติเหล่านี้ในชั้นดินเหนียวบดอัดก่อนเป็นเบื้องต้น ซึ่งคุณสมบัติของดินที่จะทำการศึกษานั้นจะเน้นไปที่คุณสมบัติทางกายภาพเป็นหลัก ได้แก่ คุณสมบัติทางด้านความสามารถในการไหลซึมผ่านของของไหล (Hydraulic Conductivity) ,คุณสมบัติทางด้านการแพร่กระจาย (Molecular Diffusion and Mechanical Dispersion) ของสารปนเปื้อนภายในดินเหนียวบดอัดเมื่อสภาพของของไหลภายในช่องว่างมีความเป็นกรดเบสต่างๆกันออกไป รวมถึงความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดและเบสของดินเหนียวบดอัดนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาคูณสมบัติของดินเหนียวบดอัด ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของดินในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมปฐพี โดยจะทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่นำจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน เช่น ชนิดและปริมาณความเข้มข้นของสารทดสอบที่จะนำมาใช้แทนสารปนเปื้อนจริง, สภาพความเค็มที่มีต่อตัวอย่างดิน, และแรงดันของของไหล เป็นต้น โดยจะเน้นการศึกษาคูณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในเชิง Hydrodynamics เป็นหลัก ซึ่งคุณสมบัติที่จะทำการศึกษาในขั้นนี้ ได้แก่ คุณสมบัติทางด้านความสามารถในการไหลซึมผ่าน และการแพร่กระจายได้ ของสารปนเปื้อนในดินเหนียวบดอัด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งขณะทำการทดสอบและภายหลังการทดสอบแล้วเสร็จ เพื่อใช้ในการคาดคะเนการกระจายตัวของสารปนเปื้อนในชั้นดิน และพัฒนาวิธีการบำบัดชั้นดินปนเปื้อนที่เหมาะสมกับชนิดของดินในแต่ละท้องถิ่นต่อไป

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้จะทำการศึกษาคูณสมบัติทางด้านความสามารถในการไหลซึมผ่านและการแพร่กระจายได้ของสารปนเปื้อนในดินเหนียวบดอัด ซึ่งตัวอย่างดินที่ใช้จะเป็นดินมีต้นกำเนิดจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok Soft Clay) โดยจะศึกษาถึงที่การเคลื่อนตัวของสารปน

เป็อนอันเนื่องมาจากขบวนการทาง Hydrodynamics ซึ่งจะเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมปฐพีเป็นหลัก โดยใช้เครื่องมือทดสอบบางส่วนจะพัฒนาขึ้นมาเอง ส่วนสารทดสอบที่จะ นำมาใช้เป็น pore fluid เพื่อเป็นตัวแทนของสารปนเป็อนในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้เป็นสารประเภท กรด และ เบส เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น อันได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารทดสอบที่มีต่อตัวอย่างดิน โดยในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของสารปนเป็อนและคุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมี ดังต่อไปนี้

- 1.) ทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) ของตัวอย่างดินเมื่อถูกสารปนเป็อนเคลื่อนตัวผ่าน โดยจะทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการไหลซึมผ่านอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเป็นกรดและเบส ของ pore fluid, สภาวะความเค็มที่กระทำต่อตัวอย่างดิน, ชนิดของเครื่องมือทดสอบ, ระยะเวลาในการทดสอบ โดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นมา ซึ่งค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านนี้จะประมาณจากวิธีเฮดความดันคงที่ (Constant Head Method)
- 2.) ทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านการแพร่กระจายของสารปนเป็อนในตัวอย่างดิน (Dispersivity Characteristic) โดยใช้เครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ เรียกว่า Long - Column Box โดยการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารทดสอบ (pore fluid) อันได้แก่ กรดและเบส ภายใต้สภาวะควบคุมเดียวกัน โดยการนำตัวอย่างดินที่เวลาต่างๆ กัน มาศึกษาการแพร่กระจายตัวของสารปนเป็อนในตัวอย่างดิน
- 3.) ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางด้านเคมีของตัวอย่างดิน โดยใช้ตัวอย่างดินที่ได้จากการทดสอบในข้อ 1. และ 2. ข้างต้น มาทำการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงที่น่าจะเกิดขึ้นกับตัวอย่างดิน ซึ่งในที่นี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของดินภายหลังการปล่อยให้ตัวอย่างดินมีการสัมผัสกับสารทดสอบทั้งที่เป็นกรด และ เบส รวมถึงปริมาณสารบางชนิดในดินที่มีส่วนในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบสในดิน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิธีการศึกษาวิจัยรวมถึงวิธีการทดสอบต่างๆ ซึ่งแม้เป็นการทดสอบแบบเบื้องต้นตามมาตรฐานการทดสอบทั่วไป น่าจะมีส่วนในการพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ถูกต้อง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง หรือให้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่มีอยู่มากขึ้น ส่วนผล



การศึกษาวิจัยที่ได้ คาดว่าน่าจะมีประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการก่อสร้างพื้นที่จัดเก็บขยะ หรือสารปนเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อรองรับการขยายตัวของภาคการผลิตของประเทศ โดยเฉพาะหน่วยงานในพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล หรือนำใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดสารปนเปื้อนที่เหมาะสมกับสภาพชั้นดินในประเทศ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีบทและผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต

#### 2.1 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในชั้นดิน

ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนผ่านชั้นดิน และชั้นใต้ดิน มีด้วยกันหลายลักษณะ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. **Hydrodynamic Process:** เป็นการเคลื่อนตัวของมวลสารผ่านชั้นดินด้วยการไหล ซึ่ง ได้แก่การไหลของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดินหรือที่ซึมลงไปจากผิวดิน จัดได้ว่าเป็นการเคลื่อนตัวประเภทหลักของสารปนเปื้อนในชั้นดิน ซึ่งการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนประเภทนี้ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้ดังนี้ คือ

- Advective Transport
- Molecular Diffusion
- Mechanical Dispersion

2. **Abiotic Reaction Process:** เป็นการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางกายภาพระหว่างเม็ดดินกับสารปนเปื้อน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้หลายปฏิกิริยาดังกัน เช่น การเกิด Radioactive Decay, Sorption, Dissolution/Precipitation, Hydrolysis, Ion Exchange เป็นต้น

3. **Biotic Reaction Process:** เป็นการเคลื่อนตัวของมวลสารอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางชีวภาพต่างๆ

#### Advective Transport

การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในลักษณะนี้ เป็นการเคลื่อนตัวด้วยการไหลของน้ำหรือของเหลว ซึ่งปริมาณของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารในชั้นน้ำใต้ดินและอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน ดังนั้นการพิจารณาการเคลื่อนตัวในลักษณะนี้จึงต้องมีความเร็วในการไหลของน้ำ (Seepage Velocity,  $v$ ) เข้า

มาเกี่ยวข้อง โดยสามารถหาปริมาณการไหลของสารปนเปื้อนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวแบบ Advective นี้ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของการไหลในลักษณะ 1 มิติ (One-dimensional Flow) ซึ่งจะวัดปริมาณของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดตั้งฉากหนึ่งหน่วยในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งจะเรียกว่า mass flux,  $f$  โดย

$$f = n.v.c \quad (1.)$$

หรือ 
$$= v_a.c$$

เมื่อ

$n$  = ความพรุนประสิทธิผลของดิน (Effective Porosity)

$v$  = ความเร็วในการไหลของสารปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน (Seepage velocity) [L/T]

$v_a$  = ความเร็วของ Darcy (Darcy's velocity) [L/T]

$$= n.v$$

$c$  = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินเป็นระยะทางหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง [M/L<sup>3</sup>]

ในที่นี้สัญลักษณ์ในเครื่องหมาย [ ] บอกถึงหน่วย โดยที่ L คือ หน่วยของความยาว, T คือ หน่วยของเวลา และ M คือหน่วยของน้ำหนักหรือมวล

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหามวลสาร ( $m_a$ ) เนื่องจากขบวนการเคลื่อนที่แบบ Advection ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของชั้นดิน ( $A_0$ ) จากแหล่งต้นกำเนิดของสารปนเปื้อนไปยังจุดใดๆ ภายในระยะเวลา  $t$  ได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$m_a = A_0 \int_0^t n.v.c dt \quad (2.)$$

อย่างไรก็ดีจากความสัมพันธ์ข้างต้น จะเห็นได้ว่า ถ้าไม่มีการไหลของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินก็จะไม่เกิดการเคลื่อนตัวอันเนื่องมาจากขบวนการ Advection ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการไหลด้วยวิธี Advection นั้นสามารถดูได้จากคุณสมบัติของชั้นดิน กล่าวคือ ถ้าชั้นดินมีความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ดี ขบวนการเคลื่อนตัวเนื่องจาก Advection จะเกิดได้น้อยดังแสดงได้ด้วยสมการของ Darcy คือ

$$v = k_i \quad (3.)$$

$$= k \cdot (dh/dL)$$

เมื่อ  $k$  คือ ความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ (Hydraulic Conductivity)  
[ LT ]

ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของดินนั้น เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ทราบว่า มีขบวนการเคลื่อนตัวแบบ Advection เกิดขึ้นมากน้อยเพียงไร ซึ่งค่าคุณสมบัติทางด้านการไหลซึมผ่านของดินนั้น สามารถหาได้ทั้งจากในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี (Soil Testing Laboratory) และในสนาม (In-situ Test) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในภายหลัง

### Diffusion Transport

ขบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแบบ Diffusion จะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในแง่ของศักย์ทางเคมี (Chemical potential) กล่าวคือ เป็นการเคลื่อนที่จากจุดที่มีความเข้มข้นของสารสูงไปยังจุดที่เข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งปริมาณสาร หรือ mass flux,  $f$  ที่เคลื่อนที่โดยขบวนการ Diffusion เพียงอย่างเดียว สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Fick ดังสมการดังนี้

$$f = -n \cdot D_e \cdot (\partial c / \partial z) \quad (4.)$$

เมื่อ

$n$  = ความพรุนประสิทธิผลของดิน (Effective porosity)  
 $D_e$  = Effective Diffusion Coefficient [ L<sup>2</sup>/T ]  
 $\partial c / \partial z$  = Concentration gradient ซึ่งในที่นี้หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเมื่อเทียบกับระยะทางที่สารปนเปื้อนนั้นเคลื่อนที่ผ่าน

โดยที่เครื่องหมายลบ ในที่นี้ หมายถึง ทิศทางการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน ที่ จะเคลื่อนที่ผ่านจุดที่มีความเข้มข้นสูงไปยังจุดที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า โดยสามารถหาปริมาณมวลสารที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินด้วยขบวนการ Diffusion อย่างเดียวได้ในลักษณะเดียวกันกับการเคลื่อนที่แบบ Advection คือ

$$m_d = A_0 \int_0^t (-n \cdot D_e \cdot (\partial c / \partial z)) dt \quad (5.)$$

เมื่อ

$$m_d = \text{มวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินอันเนื่องมาจาก  
ขบวนการ Diffusion [M]}$$

การเคลื่อนตัวด้วยขบวนการ Diffusion ผ่านช่องว่างในมวลดิน สิ่งสำคัญที่มีผลต่อการเคลื่อนตัว คือ ชนิดของ pore fluid ที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในมวลดิน โดยปัจจัยที่ทำให้อัตราการเคลื่อนตัวโดยขบวนการ Diffusion ผ่านมวลดินได้แตกต่างกันได้แก่

1. ความคดเคี้ยวของ flow path รอบๆอนุภาคของดิน (tortuosity,  $\tau$ )
2. ค่าความพรุนของดิน (Porosity,  $n$ ) ของดินซึ่งอาจพิจารณาในรูปของ volumetric water content,  $\theta$
3. ความหนืด (Viscosity) ของ pore fluid
4. การแลกเปลี่ยน Cation และ Anion ของสารปนเปื้อนในดิน
5. ขบวนการ biodegradation เนื่องจากสาร organic ในดิน
6. ขบวนการ Counter – Osmotic flow
7. ดุลย์ประจุไฟฟ้าเมื่อเกิดขบวนการ Anion exclusion

#### Advection– Diffusion Transport

ในกรณีที่ขบวนการเคลื่อนที่ทั้งขบวนการ Advection และ Diffusion เกิดขึ้นพร้อมกัน อีกทั้งมีทิศทางในการเคลื่อนตัวในทิศทางเดียวกัน ซึ่งก็จะส่งผลให้ปริมาณสารปนเปื้อนเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งได้มากขึ้นภายในเวลาที่สั้นลง การเคลื่อนตัวลักษณะนี้สามารถอธิบายโดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$f = n \cdot v \cdot c - n \cdot D_e \cdot (\partial c / \partial z) \quad (6.)$$

ซึ่งมวลสาร  $m$  ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นดินอันเนื่องมาจากขบวนการเคลื่อนที่ทั้งแบบ Advective และ Diffusive ด้วย ในช่วงเวลาหนึ่ง มีค่าเป็น

$$m = A_0 \int_0^t (n \cdot v \cdot c - n \cdot D_e \cdot (\partial c / \partial z)) dt \quad (7.)$$

## Mechanical Dispersion

ในกรณีที่น้ำใต้ดินมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราการไหลไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ ความเร็วในการไหลมีทั้งที่มากกว่าและน้อยกว่าความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้น (Average Linear Velocity,  $v_x$ ) จะเกิดการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนผ่านช่องว่างของเม็ดดินอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของความเร็วของการไหลและความไม่สม่ำเสมอของชั้นดิน (Non-homogeneity) ซึ่งเรียกว่าขบวนการ "Mechanical Dispersion" ซึ่ง Bear, 1972 ได้กล่าวถึงสาเหตุของการเกิดขบวนการเคลื่อนที่ประเภทนี้ไว้ดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

1. ช่องว่างในดินที่มีขนาดไม่เท่ากันทำให้ของเหลวเคลื่อนตัวได้ช้าเร็วต่างกัน
2. อนุภาคของของเหลวบางอนุภาคอาจเคลื่อนตัวผ่านชั้นดินด้วยระยะเคลื่อนตัวที่ยาวกว่าอนุภาคอื่น
3. ของเหลวที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในเม็ดดิน จะเคลื่อนที่ผ่านตรงกลางของช่องว่างได้เร็วกว่าบริเวณขอบ เนื่องจากบริเวณขอบของการไหลจะมีแรงเสียดทานมากกว่า

ถึงแม้ขบวนการเคลื่อนที่แบบ Mechanical Dispersion จะต่างจากขบวนการเคลื่อนที่แบบ Diffusion อย่างไรก็ดี Freeze and Cherry, 1979 สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายขบวนการเคลื่อนตัวแบบ Diffusion มาประยุกต์ใช้กับขบวนการเคลื่อนตัวแบบ Mechanical Dispersion ได้โดยใช้กฎของ Fick โดยรวม Parameter ที่ใช้ในการคำนวณจากขบวนการเคลื่อนตัวทั้งสองประเภทเข้ามาพิจารณาด้วยกัน และใช้ชื่อเรียกใหม่เป็น "Hydrodynamic Dispersion, D" นั่นคือ

$$D = D_e + D_{md} \quad (8.)$$

เมื่อ

$$D_e = \text{Effective (Molecular) Diffusion Coefficient [ L}^2/\text{T ]}$$

$$D_{md} = \text{Mechanical Diffusion Coefficient [ L}^2/\text{T ]}$$

ดังนั้นเมื่อรวมผลของทั้งสองขบวนการและใช้สมการเคลื่อนตัวแบบ Molecular Diffusion มาพิจารณาจะได้ว่า

$$f = n.v.c - n.D. (\partial c / \partial z) \quad (9.)$$

เมื่อ

$$D = D_e + D_{md}$$

โดย Bear, 1979 และ Freeze and Cherry, 1979 ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณการเคลื่อนตัวแบบ Dispersion ว่ามีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วของการไหล ดังนี้คือ

$$D_{md} = \alpha \cdot v \quad (10.)$$

เมื่อ

$$\alpha = \text{Dispersivity [L]}$$

Gillham และ Cherry, 1982 ได้เสนอว่า ค่า  $\alpha$  นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ และ Gelhar et al., 1985 ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่า  $\alpha_L$  (Longitudinal Dispersivity) จากข้อมูลในสนาม (in situ test) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha_L$  กับระยะที่ทำการสำรวจ (x) คือ

$$\begin{aligned} \alpha_L &\approx x^2/100 \text{ เมตร} && ; x \leq 100 \text{ เมตร} \\ \alpha_L &= 100 \text{ เมตร} && ; x > 100 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

นอกจากนั้น Gelhar et al., (1985) ยังได้เสนอค่าขอบเขตล่าง (Lower Bound) ของค่า  $\alpha_L$  ไว้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \alpha_L &\approx x/100 \text{ เมตร} && ; x \leq 1000 \text{ เมตร} \\ \alpha_L &= 10 \text{ เมตร} && ; x > 1000 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

ส่วนค่าขอบเขตบน (Upper Bound) ของค่า  $\alpha_L$  เป็นดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \alpha_L &\approx x^4/100 \text{ เมตร} && ; x \leq 10 \text{ เมตร} \\ \alpha_L &= 200 \text{ เมตร} && ; x > 10 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่า  $D_{md}$  มีความสัมพันธ์กับความเร็วของการไหล และจากสมการที่ 3 อาจกล่าวได้ว่าค่า  $D_{md}$  ก็จะมีค่าสัมพันธ์กับความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ (Hydraulic Conductivity,  $k$ ) ด้วย ดังนั้นการทราบถึงความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ ก็อาจนำมาใช้ในการประมาณค่า  $D_{md}$  เพื่อใช้ในการหาปริมาณของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนตัวด้วยขบวนการ Mechanical Dispersion ได้ต่อไป

## 2.2 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยใช้ Partial Differential Equations มาแก้ปัญหา ซึ่งจะต้องทราบ initial และ boundary condition โดยพิจารณาจาก geometry และ heterogeneity ของดิน รวมถึงสภาวะแวดล้อมภายนอกของดิน เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ใช้ทดสอบ ( $C_0$ ) ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจะแบ่งลักษณะของ boundary condition ออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. แบบ Fixed Concentration
2. แบบ Fixed Gradient
3. แบบ Variable Flux

โดยในการแก้ปัญหามสมการดังกล่าว เพื่อให้ง่ายต่อการหามสมการคำตอบจำเป็นที่จะต้องตั้งสมมติฐานของการเคลื่อนตัวนี้ให้เป็นการเคลื่อนตัวในลักษณะ 1 มิติ คืออยู่ในรูปของ สมการความเข้มข้นที่ระยะทาง  $x$  ใดๆ ในช่วงเวลา  $t$  ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการได้ว่า

$$C(x,t) = C(t) \quad (11.)$$

### 2.2.1 Fixed Concentration Boundary Condition

ในการทำการทดลองหาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาคุณสมบัติทางด้าน Diffusion และ Dispersion จะนำตัวอย่างดินบรรจุไว้อยู่ในกระบอก หรือกล่องขนาดตั้งแต่ 10-30 ซม. โดยจะได้กล่าวถึงลักษณะของอุปกรณ์ในบทถัดไป ซึ่งในขั้นเริ่มต้นก่อนการปล่อยสารทดสอบความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  ลงไปในตัวอย่างดินนั้น จะถือว่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในตัวอย่างดินเป็นศูนย์ แต่หลังจากที่ปล่อยให้สารปนเปื้อนเคลื่อนเข้าสู่ตัวอย่างดิน ที่เวลา  $t$  ใดๆ ภายในตัวอย่าง



ดินนั้นจะมีความเข้มข้นเป็น  $C(t)$  จากลักษณะดังกล่าวสามารถหา initial และ boundary condition ได้ว่า

$$\begin{aligned} C(x,0) &= 0 && ; x \geq 0 \text{ Initial Condition} \\ C(0,t) &= C_0 && ; t \geq 0 \text{ Boundary Conditions} \\ C(\infty,t) &= 0 && ; t \geq 0 \end{aligned} \quad (12.)$$

จาก Initial และ Boundary Condition แบบ Fixed Concentration ข้างต้น และจากการตั้งสมมติฐานว่าการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนเป็นการไหลในลักษณะ 1 มิติ และตัวอย่างดินมีลักษณะ Homogenous จะสามารถแก้ปัญหาคสมการ Differential Equation ได้ดังนี้ คือ

$$D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (13.)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} D_L &= \text{Longitudinal Hydrodynamic Dispersion [L}^2\text{/T]} \\ v_x &= \text{Average Linear Velocity [L/T]} \end{aligned}$$

จากสมการดังกล่าวรวมถึง Boundary Condition ข้างต้น ซึ่ง Ogata and Banks, 1961 ได้คำนวณหาคำตอบของสมการไว้อยู่ในรูปของ Error Function ดังนี้คือ

$$C = 0.5C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left( \frac{v_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L + v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (14.)$$

ซึ่งคำตอบของสมการข้างต้นอาจเขียนให้อยู่ในรูปของ  $t_R$  และ Peclet number,  $P_e$  ซึ่งเป็น Parameter ที่ไร้หน่วยได้เป็น

$$\begin{aligned} C_R(t_R, P_e) &= 0.5 \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{P_e}{4t_R} \right)^{1/2} \cdot (1 - t_R) \right] \right. \\ &\quad \left. + \exp(P_e) \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{P_e}{4t_R} \right)^{1/2} \cdot (1 + t_R) \right] \right\} \end{aligned} \quad (15.)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 t_R &= \text{Pore volume of Flow} \\
 &= v_x t / L \\
 C_R &= C / C_0 \\
 P_e &= \text{Peclet Number} \\
 &= v_x t / D_L \\
 \text{erfc} &= \text{Complementary error function (ดูตารางที่ 2.1)}
 \end{aligned}$$

### 2.2.2 Fixed Gradient Boundary Condition

โดยธรรมชาติของชั้นน้ำใต้ดินที่ถูกปนเปื้อนมักไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำหรือสารปนเปื้อนอย่างทันทีทันใด ดังนั้นการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนโดยมีลักษณะของ Boundary Condition เป็นแบบ Fixed Gradient นี้จึงไม่ค่อยเกิดขึ้น แต่อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่พิจารณาการเคลื่อนที่ในลักษณะ 1 มิติ และเกิดการ leakage ของสารปนเปื้อนจากลำคลองหรือทางน้ำเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินเป็น line source ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งการเคลื่อนตัวในลักษณะนี้จะถือว่าอัตราการไหลเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินของสารปนเปื้อนคงที่ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในชั้นดินที่พิจารณาจะเป็นศูนย์ ส่วนความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ไหลเข้ามาเป็น  $C_0$  ซึ่งสามารถเขียน Initial และ Boundary Condition ได้ว่า

$$C(x,0) = 0 \quad : -\infty < x < +\infty \quad \text{Initial Condition}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} n_c C(x,t) dx = C_0 n_c v_x t \quad : t > 0 \quad \text{Boundary Conditions}$$

$$C(\infty,t) = 0 \quad : t \geq 0 \quad (16.)$$

จาก Boundary Condition ข้างต้นจะเห็นว่า มวลของสารปนเปื้อนที่เคลื่อนตัวภายในระยะตั้งแต่  $-\infty$  ถึง  $+\infty$  จะเป็นสัดส่วนกับระยะเวลาที่สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ โดย Sauty, 1980 ได้หาคำตอบของสมการโดยมี Boundary Condition แบบ Fixed Gradient ได้เป็น

$$C = 0.5C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) - \exp \left( \frac{v_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L + v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (17.)$$

หรือสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปไร้หน่วยได้เป็น

$$C_R(t_R, P_e) = 0.5 \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{P_e}{4t_R} \right)^{1/2} \cdot (1 - t_R) \right] - \exp(P_e) \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{P_e}{4t_R} \right)^{1/2} \cdot (1 + t_R) \right] \right\} \quad (18.)$$

จะเห็นได้ว่า สมการคำตอบของ Boundary Condition แบบแรก และแบบที่สอง นั้นคล้ายกัน ต่างกันตรงที่เครื่องหมายบวกและลบที่พจน์ที่สองของสมการคำตอบเท่านั้น และ Sauty, 1980 ได้ประมาณสมการคำตอบ ในกรณีที่เป็น one-dimensional dispersion และค่า Peclet Number มีค่าสูงๆ พจน์ที่สองของสมการคำตอบสามารถตัดทิ้งได้เป็น

$$C = 0.5C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (19.)$$

หรือสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปไร้หน่วยได้เป็น

$$C_R(t_R, P_e) = 0.5 \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \left( \frac{P_e}{4t_R} \right)^{1/2} \cdot (1 - t_R) \right] \right\} \quad (20.)$$

### 2.2.3 Variable Flux Boundary Condition

Van Genuchten, 1981 ได้สร้าง Boundary Condition ของการเคลื่อนตัวภายใต้ boundary นี้ไว้ดังนี้ คือ

$$C(x, 0) = 0 \quad \text{Initial Condition}$$

$$\left( -D \frac{\partial C}{\partial x} + v_x C \right) \Big|_{x=0} = v_x C_0 \quad \text{Boundary Conditions}$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x \rightarrow \infty} = (\text{finite}) \quad (21.)$$

ซึ่ง Boundary Condition แบบที่สามนี้แสดงว่า แม้ระยะการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน  $x$  เข้าใกล้ระยะอนันต์  $\infty$  แต่ concentration gradient จะยังคงอยู่ในขอบเขต ซึ่งภายใต้สภาวะเช่นนี้สามารถหาคำตอบของสมการได้เป็น

$$C = 0.5C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{L - v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \left( \frac{v_x^2 t}{\pi D_L} \right)^{1/2} \exp \left[ -\frac{(L - v_x t)^2}{4D_L t} \right] - 0.5 \left( 1 + \frac{v_x L}{D_L} + \frac{v_x^2 t}{D_L} \right) \exp \left( \frac{v_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{L + v_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (22.)$$

สมการคำตอบของ Boundary Condition ประเภทนี้สามารถลดรูปได้เช่นเดียวกับสองแบบข้างต้นโดยอยู่ในรูปเดียวกับสมการที่ 19

### 2.3 การทดสอบเพื่อหาค่า Dispersivity, $\alpha$

การทดสอบหาค่า Dispersivity เพื่อนำไปใช้ประมาณการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### การทดสอบหาค่า Dispersivity ในห้องปฏิบัติการ

สามารถทำการทดสอบได้โดยบรรจุหรือบดอัดดินลงในกระบอกหรือกล่อง (Column packed) ขนาดตั้งแต่ 10-30 ซม. ซึ่งค่าที่วัดออกมาได้จากการทดสอบจะอยู่ในรูปของ pore volume of fluid ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดิน โดย 1 pore volume, 1PV มีค่าเท่ากับ ผลคูณของปริมาตรของกระบอกดิน กับ ค่าความพรุนของดิน (A.L.n) ส่วนค่าอัตราการไหลของสารปนเปื้อนผ่านดินนั้นจะมีค่าเท่ากับผลคูณของ ความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้น ความพรุนของดิน และพื้นที่หน้าตัดของกระบอกดิน ( $v_x \cdot n \cdot A$ ) ซึ่งเราสามารถหาปริมาณของ pore volume ทั้งหมดที่สารปนเปื้อนเคลื่อนที่ผ่าน (U) ได้ว่ามีค่าเท่ากับ ค่าอัตราการไหลหารด้วย unit pore volume ดังนี้คือ

$$U = \frac{v_x n A t}{A L n} = \frac{v_x t}{L} = t_R \quad (23.)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถจัดรูปให้ ปริมาณของ pore volume ทั้งหมด อยู่ในรูปของเวลาไร้หน่วย (dimensionless time,  $t_R$ ) ได้ และจากสมการที่ 19 Brigham, 1974 ได้จัดรูปของสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปของ pore volume ได้ดังนี้ คือ

$$C = 0.5C_0 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{1-U}{2(UD_L / v_x L)^{1/2}} \right) \right] \quad (24.)$$

การหาค่า Dispersivity,  $\alpha_L$  โดยใช้ parameter ที่ได้ทำการวิเคราะห์มาข้างต้น สามารถทำได้โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คำนวณหาค่า  $U$  ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารทดสอบที่ไหลผ่านตัวอย่างดินที่จุดๆหนึ่ง ในช่วงเวลาหนึ่ง, ( $C$ )
2. พล็อตกราฟระหว่าง ค่า  $C/C_0$  กับ  $[(U-1)/U^{1/2}]$  บนสเกลของ linear probability
3. โดยสมมติฐานว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นหรือเป็นข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normally Distributed) จะสามารถหาค่า  $D_L$  ได้จาก

$$D_L = \left( \frac{v_x L}{8} \right) (J_{0.84} - J_{0.16})^2 \quad (25.)$$

เมื่อ

$$J_{0.84} = [(U-1)/U^{1/2}] \text{ เมื่อ } C/C_0 = 0.84$$

$$J_{0.16} = [(U-1)/U^{1/2}] \text{ เมื่อ } C/C_0 = 0.16$$

4. จากความสัมพันธ์ที่ว่า  $D_L = D_e + \alpha_L v_x$  ฉะนั้นจะได้ว่า

$$\alpha_L = \frac{D_L - D_e}{v_x} \quad (26.)$$

ซึ่งค่า  $v_x$  ในการทดลองนี้สามารถหาได้จาก หน่วยอัตราการไหลหารด้วยพื้นที่หน้าตัดและความพรุนของดิน [ $v_x = (Q/t)/nA$ ]

## 2.4 การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของสารปนเปื้อนในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหาคุณสมบัติการไหลซึมผ่านของสารปนเปื้อนที่ไหลผ่านดินในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนนั่นที่นิยมนำมาใช้ทดสอบหากแบ่งตามลักษณะของ Boundary ของเครื่องมือทดสอบแล้ว สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. Fixed Wall Testing หรือ Rigid Boundary Test
2. Flexible Wall หรือ Flexible Boundary Test

### 2.4.1 วิธี Fixed Wall Testing

โดย Bowder et al., 1986 แนะนำว่า วิธีทดสอบประเภทนี้เป็นวิธีทดสอบที่ดีในการหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของสารปนเปื้อนในดินเหนียวบดอัด เพราะเป็นการทดสอบที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม อีกทั้งยังใช้เวลาทดสอบน้อยกว่า โดยรูปแบบการทดสอบนี้สามารถทดสอบได้ทั้งแบบ เฮดคงที่ (Constant Head Method) และ แบบเฮดแปรผัน (Variable Head Method) ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบนี้จะถูกบดอัดลงในกระบอกเซลล์ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดใกล้เคียงกับ Compaction mold ในการทดสอบ Compaction Test ซึ่งก่อนหน้าทำการทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน สามารถทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ก่อนได้ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยของความเค้น (stress) ในแนวตั้งที่มีผลต่อความสามารถในการไหลซึมผ่านด้วย ซึ่งการอัดตัวคายน้ำ และลักษณะการไหลซึมผ่านได้ของของเหลวผ่านตัวอย่างดินนี้จะเข้าไปในลักษณะ 1 มิติ (One-dimension flow and consolidation)

อย่างไรก็ดีแม้การทดสอบด้วยวิธี Fixed Wall จะเป็นวิธีการทดสอบที่ให้ค่าใกล้เคียงกับในสนาม แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่บางประการ เช่น

- หากทำการทดสอบด้วยหน่วยแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์ หรือค่อนข้างต่ำอาจเกิดการ leak ของดินออกทางด้านข้างของกระบอกเซลล์ โดยเฉพาะในดินบดอัดที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าค่า ปริมาณความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content)
- หากทำการทดสอบด้วยหน่วยแรงในแนวตั้งที่สูงเกินไปอาจเกิดการวิบัติทางด้านข้างของกระบอกเซลล์รวมถึงจะต้องมีการอุดรอยรั่วซึมของกระบอกเซลล์ให้ดี มิฉะนั้นจะเกิดการรั่วซึมได้

- เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีนี้ มักไม่ใส่ back pressure กับตัวอย่างดิน ฉะนั้นในตัวอย่างดินเหนียวบดอัดจะเป็นตัวอย่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated sample) ทำให้ค่าการไหลซึมที่ได้ อาจไม่ถูกต้องนัก

#### 2.4.2 วิธี Flexible Wall Testing

การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบ และวิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนทำการทดสอบคล้ายการทดสอบแบบ Triaxial ซึ่งข้อดีของการทดสอบวิธีนี้คือสามารถทำให้ดินมี degree of saturation สูงขึ้นได้ โดยการใส่ back pressure เข้าไปในตัวอย่างดินเพื่อให้อากาศในช่องว่างภายในดินละลาย แต่การทดสอบวิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดเช่นกันคือ

- cell pressure ที่ใช้ไม่ควรสูงเกินไป จนทำให้การทำให้การทดสอบการไหลซึมผ่านของสารปนเปื้อนเกิดได้ลำบาก
- สารปนเปื้อนบางชนิดอาจทำปฏิกิริยากับยาง membrane ที่ห่อหุ้มตัวอย่างดินซึ่งอาจทำให้ชำรุดได้
- ใช้ได้กับตัวอย่างที่เป็นหิน หรือดินเหนียวประเภท hard fractured

ซึ่งวิธีการทำการทดสอบเพื่อหาค่าในการไหลซึมผ่านจะได้กล่าวในบทต่อไป

### 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน

ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ของของไหลในดิน (Hydraulic Conductivity,  $k$ ) ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักหลายอย่างด้วยกัน เช่น

- 1) ลักษณะของการไหล: โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ มักจะคำนวณโดยอาศัยกฎของ Darcy ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมการไหลให้เป็นไปในลักษณะของ Laminar flow ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็เมื่อความเร็วของการไหลอยู่ในระดับต่ำ จากการวิจัยของ Muskat (1937), Olsen (1962), และ Michell et al. (1973) สามารถสรุปได้ว่า โดยทั่วไปถ้าการไหลของน้ำในดินมีค่า Hydraulic

Gradient ต่ำกว่า 5 จะทำให้เกิดการไหลแบบ Laminar ยกเว้นในกรวด และทราย หยาบที่การไหลแบบ Turbulent มีโอกาสเกิดขึ้นได้สูง

2) อัตราส่วนช่องว่างในดิน (Void ratio,  $e$ ) ซึ่งในดินที่มีอัตราส่วนช่องว่างในมวลดิน (void ratio) สูง เช่น ดินทราย จะมีความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงกว่า ดินเหนียวซึ่งมีค่า void ratio ต่ำกว่า และค่า void ratio นี้เป็นตัวแปรหนึ่งที่จะนำมาใช้ในการสร้างสูตร Empirical equation ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล ในมวลดิน เช่น สมการของ Kozeny – Carman (Carman, 1952)

3) ระดับความอิ่มตัวของน้ำในมวลดิน (Degree of Saturation) โดยทั่วไป ความสามารถในการไหลซึมผ่านจะสูงขึ้นเมื่อ ระดับความอิ่มตัวเพิ่มขึ้น (Mitchell et al. 1973)

4) ความไม่สม่ำเสมอของชั้นดิน (Heterogeneity) โดย Philip (1980) ได้แบ่งประเภทของความไม่สม่ำเสมอออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Deterministic heterogeneity เกิดจากการผสมผสานของ Uniformity และ Anisotropy ของชั้นดิน และ Stochastic heterogeneity ซึ่งเป็นการเกิดขึ้นในลักษณะที่คาดเดาได้ยาก

5) คุณสมบัติของการไหลที่ซึมผ่าน ได้แก่ ความหนืด (Viscosity) ความหนาแน่น และปริมาณความเข้มข้นของสาร (Young et al. 1992)

6) โครงสร้างการจัดเรียงของเม็ดดิน ซึ่งทำให้การเรียงตัวของช่องว่างต่างกันออกไป ช่องว่างที่เป็นระเบียบยอมให้ของเหลวผ่านได้ดีกว่าช่องว่างที่ซับซ้อน

## 2.6 แร่ดินเหนียว (Clay Mineral)

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ที่เกิดจากการรวมตัวกันระหว่างหน่วยโครงสร้างพื้นฐาน ได้แก่ Silica sheet และ Octahedral sheet เป็น unit cell ขึ้นมา

**Silica sheet:** ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวโดยทั่วไป Silica unit จะเกาะกันเป็นแผ่นต่อเนื่องเรียกว่า Silica sheet กล่าวคือ มีออกซิเจน 3 ตัวใน 4 ตัว ที่อยู่ตามมุมของ Silica Tetrahedron ของแต่ละ unit จะยึดกันเป็นโครงข่าย ยังผลให้ส่วนประกอบของหน่วยโครงสร้างเป็น  $(Si_4O_{10})^{4-}$  โดยมีความหนา  $4.63 \text{ \AA}$  โดย



ที่ประจุของหน่วยโครงสร้างสามารถทำให้สมดุลได้โดยการแทนที่ Oxygen 4 ตัว ด้วย Hydroxyl (OH)<sup>-</sup>

- **Octahedral sheet:** เป็นการรวมตัวของ Octahedral sheet ซึ่งในบางกรณีก็อาจมีประจุบวกชนิดอื่นมาอยู่แทนที่ Al<sup>3+</sup> และ Mg<sup>2+</sup> ได้ เช่น Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Ti<sup>4+</sup> และ Li<sup>+</sup> เป็นต้น ความหนาของ Octahedral sheet นี้จะเท่ากับ 5.05 Å° ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ
  - Dioctahedral sheet หรือ Gibbsite (Al(OH)<sub>3</sub>) มีลักษณะคือ 2 ใน 3 ของช่องว่างภายในจะถูกแทนที่ด้วย Al<sup>3+</sup>
  - Trioctahedral sheet หรือ Brucite (Mg(OH)<sub>2</sub>) นั่นคือ ช่องว่างภายในทั้งหมดจะถูกแทนที่ด้วย Mg<sup>2+</sup>

### 2.6.1 การจำแนกประเภทของแร่ดินเหนียว

ซึ่งการจำแนกประเภทแร่ดินเหนียว อาจมีการพิจารณาจากหลักการต่างๆ ดังนี้ คือ

1. ความสูงของ unit cell หรือความหนาของ layer
2. ส่วนประกอบของ unit cell ว่าเป็น Dioctahedral หรือ Trioctahedral
3. ลักษณะการเกาะกันของ layer

ถ้าจำแนกตามลักษณะการเกาะกันของ layer สามารถแบ่งประเภทแร่ได้ เป็น 3 กลุ่มตามจำนวน sheet ที่เกาะเป็น unit cell คือ

- 2 – layer mineral (1:1) ซึ่งเกิดจาก Silica sheet เกาะกันกับ Octahedral sheet
- 3 – layer mineral (1:2) ซึ่งเกิดจาก Octahedral sheet ถูกประกบด้วย Silica sheet ทางด้านบนและท้าย
- 4 – layer mineral (2:1:1) เป็นพวก 3 - layer ซึ่งมี Hydroxyl sheet แทรกอยู่

หรือในบางกรณีอาจแบ่งประเภทแร่ดินเหนียวตามความหนาของ layer ได้ ดังนี้

- 1 แร่พวก 7A<sup>0</sup> (1:1) สามารถจำแนกได้เป็น:

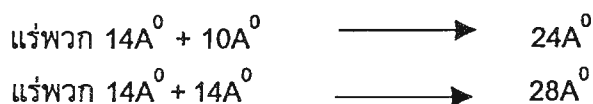
- Diocahedral คือ เป็นการเกาะกันระหว่าง Gibbsite sheet และ Silica sheet แร่ในกลุ่มนี้ได้แก่ Kaolinite, Dickite, Nacrite และ Halloysite เป็นต้น Kaolinite เป็นแร่ดินเหนียวที่พบมากกว่าแร่ชนิดอื่น มีค่า CEC เท่ากับ 3-15 meq/100g. โดยที่ Charge Deficiency เกิดจาก  $Al^{3+}$  แทนที่  $Si^{4+}$  หรือ แร่ที่มี valency บวกสองแทนที่  $Al^{3+}$  ใน Gibbsite sheet
- Triocahedral คือ เป็นการเกาะกันระหว่าง Brucite sheet และ Silica sheet ได้แก่ แร่ Serpentine ซึ่งแร่ดินเหนียวประเภทนี้จะไม่ค่อยพบในมวลดิน

2 แร่พวก  $10 \text{ \AA} (2:1)$  : เช่นเดียวกับแร่พวกความหนาของ layer เท่ากับ  $7 \text{ \AA}$  คือ ในธรรมชาติจะพบแร่ Diocahedral เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะ Montmorillonite และ Illite ซึ่งระหว่าง unit cell ของ Illite จะมีประจุ  $K^+$  แทรกตัวอยู่ก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นที่ค่อนข้างแข็งแรงขึ้น ทำให้ความหนาของ unit cell มีค่าคงที่ คือ  $10 \text{ \AA}$  ในขณะที่ Montmorillonite จะมีโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่ระหว่าง unit cell ทำให้ความหนาเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำที่แทรกอยู่จาก  $10\text{-}22 \text{ \AA}$

3. แร่พวก  $14 \text{ \AA} (2:1:1)$  : ตัวอย่างของแร่ชนิดนี้คือ Chlorite ซึ่งเกิดจากการเกาะกันระหว่างแร่พวก  $10 \text{ \AA}$  กับ Brucite sheet โดยมีความหนาของ layer ประมาณ  $14 \text{ \AA}$  และ Silica sheet จะถูกทำให้สมดุลประจุด้วยการที่  $Al^{3+}$  แทนที่  $Mg^{2+}$  ใน Brucite sheet

4. Mixed layer clays : ในดินเหนียวธรรมชาติอาจพบการซ้อนทับกันของแร่ชนิดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น คือ พวก  $7 \text{ \AA}$ ,  $10 \text{ \AA}$  และ  $14 \text{ \AA}$  อยู่ในผลึกอันเดียวกัน ซึ่งสามารถแยกการเกาะซ้อนกันออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

- แบบเป็นระเบียบ: คือการเกาะซ้อนกันเองของ layer ต่างๆในผลึกจะเป็นไปเป็นลำดับและมีระเบียบ ยังผลให้ความหนาของ layer เมื่อวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction มีค่าเท่ากับผลรวมของความหนาของ layer ที่มาเกาะกัน เช่น



- แบบไม่เป็นระเบียบ: ซึ่งการเกาะซ้อนกันแบบนี้จะทำให้ความหนาของ layer เท่ากับค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความหนา, d ของ layer ทั้งสองที่มาเกาะซ้อนกัน ตามปริมาณความมากน้อย เช่น

$$\frac{1}{4} \text{ ของ } \text{แร่พวก } 14\text{A}^0 + \frac{3}{4} \text{ ของ } \text{แร่พวก } 10\text{A}^0 \longrightarrow 11\text{A}^0$$

## 2.6.2 Isomorphous Substitution

คือการแทนที่ของประจุชนิดหนึ่งด้วยประจุกชนิดหนึ่งโดยที่ประจุนั้นอาจจะมีความใกล้เคียงหรือต่างกันก็ได้ โดยไม่ทำให้โครงสร้างผลึกเสียรูปไป ซึ่งขนาดของประจุต้องมีรัศมีต่างกันไม่เกิน 15% และมีวาเลนซ์ต่างกันไม่เกิน 1 การเกิด Isomorphous Substitution จะเป็นผลให้อนุภาคดินมีประจุบวกลดลง (Charge deficiency) ซึ่งทำให้มีการดูดประจุบวกไว้ตามผิวหรือขอบของอนุภาคดิน และในแร่ดินเหนียวบางชนิดอาจเข้าไปแทรกอยู่ใน unit cell เพื่อให้เกิดการสมดุลของประจุ ประจุบวกตามผิวเหล่านี้เรียกว่า Exchangeable Cations ปริมาณของ Exchangeable Cations นี้จะวัดออกมาในเทอมของ Cation Exchange Capacity (CEC) โดยมีหน่วยเป็น milliequivalents ต่อ 100 กรัม ของดินเหนียวแห้ง (meg / 100g. of dry clay) ซึ่งค่า CEC นี้จะใช้เป็นดัชนีในการพิจารณาระดับของการเกิดการแทนที่ (Degree of Substitution) ของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด ค่า CEC นี้ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างแต่องค์ประกอบที่สำคัญคือพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ของอนุภาคดิน กล่าวคือ แร่ดินเหนียวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะทำให้ค่า CEC มากตามไปด้วย

การแลกเปลี่ยนประจุระหว่างประจุบวกที่ดูดยึดอยู่ตามผิวอนุภาคดินเหนียว กับประจุบวกภายนอก (Replacing Cation) จะเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้คือ

- ชนิดของ Exchangeable Cation และ Replacing Cation: ประจุบวกบางชนิดอาจถูกแทนที่ด้วยประจุกชนิดอื่นได้ง่ายยากต่างกัน กล่าวคือ มีความสามารถในการแทนที่ (Replacing Power) ต่างกันนั่นเองซึ่ง Yong and Warkentin, 1975 ได้เสนอ replacing power ของประจุกชนิดต่างๆ ไว้ ตามลำดับจากน้อยไปหามาก ดังนี้คือ  $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{NH}_4^+ < \text{Al}^{3+}$  นั่นคือ  $\text{Na}^+$  สามารถแทนที่  $\text{Li}^+$  ได้ง่ายกว่าการที่  $\text{Li}^+$  จะแทนที่  $\text{Na}^+$  แต่น้อยกว่า  $\text{K}^+$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  เป็นต้น

องค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อค่า Replacing Power ได้แก่ ขนาดของประจุบวก ซึ่งรวมชั้นน้ำที่หุ้มโดยรอบอยู่ด้วย ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกกับโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของโมเลกุลน้ำ ซึ่งประจุบวกที่มีขนาดเล็กจะสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำไว้ได้หลายชั้น ในกรณีระหว่างประจุบวกที่มีวาเลนซ์เท่ากัน แต่ขนาดต่างกัน จะได้ว่า ประจุบวกที่มีชั้นน้ำหุ้มอยู่นานกว่า (ขนาดเล็กกว่า) จะเกาะยึดกับผิวของอนุภาคดินเหนียวด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่ต่ำกว่า ทำให้มีแนวโน้มในการถูกแทนที่ได้ง่ายกว่า

- ความเข้มข้นของ Replacing Cation โดยทั่วไปอำนาจในการแทนที่ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุบวกนั้นด้วย เช่น  $\text{Na}^{2+}$  มีอำนาจในการแทนที่ต่ำกว่า  $\text{Ca}^{2+}$  แต่ถ้ามีปริมาณ  $\text{Na}^{2+}$  เป็นจำนวนมากก็จะสามารถที่จะแทนที่  $\text{Ca}^{2+}$  ได้

### 2.6.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของดิน

การศึกษาถึงส่วนประกอบทางด้านแร่และทางเคมีของดินจะช่วยทำให้เข้าใจถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ดียิ่งขึ้น สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ และสารประกอบต่างๆในดิน สามารถใช้วิธีการต่างๆ ตั้งแต่วิธีพื้นฐานทางเคมี การใช้ X-ray Diffraction, การใช้หลักการด้านความร้อน หรือแม้แต่การใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายมากๆ

1. การวิเคราะห์ทางด้านเคมี: เป็นวิธีที่ยอมรับว่าให้ผลได้ละเอียด อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้อาจแสดงถึงชนิดและปริมาณของสารประกอบ แต่ไม่สามารถบอกถึงการจัดเรียงตัวของสารที่เป็นผลึกและไม่ใช้ผลึกได้ การวิเคราะห์ทางเคมีที่กระทำกันมีดังนี้

- Pore fluid electrolyte : เป็นการวัดความเข้มข้นของ Soluble salt ทั้งหมดโดยพิจารณาจาก electrical conductivity ของของเหลวในช่องว่างภายในมวลดิน
- ค่า pH : เป็นค่าดัชนีที่ใช้ในการวัดความเป็นกรดหรือด่างของดิน โดยใช้ pH meter ค่า pH จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมระหว่างตัวอย่างดินกับน้ำ โดยทั่วไปจะผสมด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก
- Organic matter : ปริมาณอินทรีย์สารในมวลดินจะมีคุณสมบัติประการหนึ่ง คือทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างอนุภาคดิน ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในการวิเคราะห์ทางด้านส่วนประกอบของแร่ได้ การกำจัดพวกอินทรีย์สาร

โดยทั่วไปจะใช้สารละลาย hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) 15% ในขณะเดียวกันก็อาจสามารถหาปริมาณอินทรีย์สารในมวลดินได้โดยการวัดการสูญเสียน้ำหนักก่อนและหลังทำการทดลอง

- ปริมาณสาร Carbonates : คาร์บอเนตที่พบในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ Calcite ( $CaCO_3$ ) และ Dolomite ( $CaMg(CO_3)_2$ ) การวิเคราะห์หา คาร์บอเนตอาจใช้วิธี DTA สำหรับพวกที่มีผลึกสมบูรณ์ชัดเจน เพื่อวัดการสูญเสียน้ำหนัก หรืออาจวัดปริมาณ  $CO_2$  ที่เกิดขึ้นเมื่อเติมกรด HCl (2N) เข้าไป

- Exchange complex : คือ การหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ของดินซึ่งสามารถทำได้โดยการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยประจุบวกที่รู้ค่าและวัดปริมาณของประจุบวกที่ต้องใช้

2. การวิเคราะห์โดยวิธี X-ray Diffraction : เป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์ส่วนประกอบแร่ที่เป็นผลึกเท่านั้น โดยใช้รังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ  $0.01-100 \text{ \AA}$  ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์จะมีค่าประมาณ  $0.5$  ถึง  $2.5 \text{ \AA}$  เพราะมีขนาดใกล้เคียงกับระยะห่างของ atomic plane นอกจากการใช้วิธี X-ray diffraction ในการวิเคราะห์เอชชนิดของแร่ที่เป็นส่วนประกอบในดินแล้ว ยังสามารถใช้วิธี X-ray diffraction ในการประเมินหาปริมาณของแร่นั้นได้ด้วย โดยใช้หลักการที่ว่า ความเข้ม (ความสูง) หรือพื้นที่ใต้ Diffraction peak จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของแร่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบของแร่ดินเหนียวมาตรฐาน

#### 2.6.4 ทฤษฎีวงน้ำ (Double layer Theory)

โดยทั่วไปตามบริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียวจะเป็นประจุลบเนื่องจากการเกิด Isomorphous Substitution เมื่ออนุภาคดินอยู่ในสภาพเปียก กล่าวคือในน้ำจะมีประจุบวกมายึดเกาะล้อมรอบอนุภาคดินภายใต้สนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2.3 โดยประจุเหล่านี้จะเคลื่อนตัวหนีห่างออกไปจากผิวอนุภาคดินออกไปทางสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลที่ระยะหนึ่งซึ่งเรียกว่า "double layer" หรือ Gouy layer

นั่นคือประจุในวงน้ำ double layer จะมีพฤติกรรม 2 อย่างคือ จะถูกดูดจากประจุที่ผิวของอนุภาคดิน ในขณะที่เดียวกันก็พยายามจะเคลื่อนตัวเองไปในทางตรงข้ามเพื่อหาสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า การพิจารณาเกี่ยวกับวงน้ำ double layer ได้มีผู้ศึกษาไว้ 3 กรณีด้วยกัน คือ

- Helmholtz's electric double layer
- Gouy double layer
- Stern double layer

ในการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อมาอธิบายความสัมพันธ์เกี่ยวกับวงน้ำ (double layer) รอบอนุภาคดินเหนียวนั้นได้มีการกำหนดสมมติฐานเพื่อใช้ในการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ การกำหนดให้ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นแผ่นเรียบ และกำหนดให้เป็นรูปทรงกลม ซึ่งที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นแผ่นเรียบในลักษณะ 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งสมมติฐานดังกล่าวมีดังนี้

1. อีออนในวงน้ำ double layer จะถือว่าเป็นจุดของประจุ และแต่ละอีออนจะไม่มีแรงกระทำต่อกัน
2. ประจุบนผิวของอนุภาคจะแผ่กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ
3. ผิวของอนุภาคจะเป็นแผ่นเรียบที่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความหนาของวงน้ำ
4. Static dielectric constant,  $\epsilon$  ของตัวกลางจะไม่ขึ้นกับทิศทาง

การหาขนาดของ double layer เมื่อพิจารณาว่า double layer อยู่ตามลำพัง (Single double layer) โดยสามารถใช้สมการของ Boltzman ได้ดังนี้ คือ

$$x = \sqrt{\frac{\epsilon KT}{8\pi n e^2 v^2}} \quad (27.)$$

เมื่อ

- X = ความหนาหรือขนาดของ double layer
- $\epsilon$  = dielectric constant of pore fluid
- K = Boltzman constant
- =  $1.38 \times 10^{-16}$  (erg / K)

T	= Temperature (K)
n	= Ion concentration (ion / cm <sup>3</sup> )
e	= หน่วยประจุ = $16.0 \times 16^{-20}$
v	= ionic valence

### 2.6.5 เสถียรภาพของคอลลอยด์กับดินเหนียว

จากทฤษฎีของ Gouy – Chapman สามารถสรุปสาเหตุที่ทำให้ดินมีการจัดเรียงตัวแตกต่างกัน ซึ่งการจัดเรียงตัวนี้จะมีผลต่อค่าการไหลซึมผ่านของดิน นั่นคือ ดินจะมีการจัดเรียงตัวแบบกระเกาะกระกะ (flocculate) เมื่อความหนาของวงน้ำ (double layer thickness) ลดลง โดยอาจเกิดจากปรากฏการณ์อย่างหนึ่งอย่างใดหรือหลายอย่างดังนี้ คือ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของประจุไฟฟ้า หรือ ion valence, การลดลงของอุณหภูมิ, ค่า Dielectric constant, ขนาดของ Hydrated ion, และค่า pH รวมถึงการเกิด Anion absorption เมื่อความเข้มข้นของประจุไฟฟ้ามีค่ามากจะทำให้ความหนาของวงน้ำ double layer ลดลง ส่งผลให้แรงผลักระยะห่างระหว่างอนุภาคดินจึงลดลง ทำให้เกิดช่องว่างในมวลดินมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าการไหลซึมผ่านได้ (Hydraulic Conductivity, k) เพิ่มขึ้นด้วย รวมถึง ค่า Diffusion Coefficient ก็เพิ่มขึ้นด้วย ในทางกลับกันหาก double layer มีการขยายตัว ก็จะทำให้ช่องว่างในมวลดินลดลง ทำให้ค่าการไหลซึมผ่านลดลงด้วย

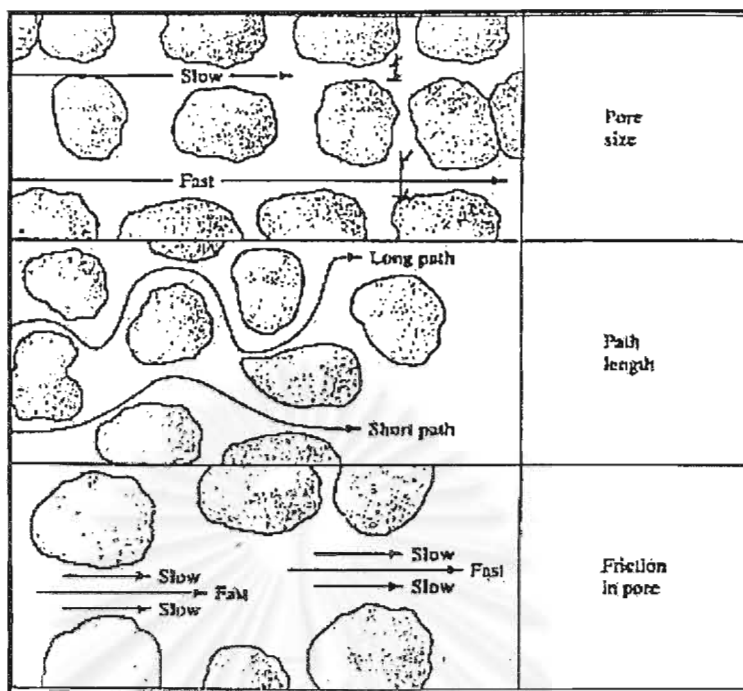
### 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านกับลักษณะการบดอัด

โดย Lambe, 1958, 1960 และ Mitchell, Hoop and Campanella, 1965 ได้ทดสอบการหาความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ กับลักษณะของการบดอัด (Compaction Characteristic) ไว้ดังรูป 2.4 โดยเสนอไว้ว่า ค่าความหนาแน่นแห้ง (dry unit weight) ของดิน จะเปลี่ยนไปตามปริมาณความชื้นในดินบดอัด ปริมาณความชื้น ณ จุดที่มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เรียกว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content,  $w_{opt}$ ) จากรูป แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน กับ ค่าปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัด ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจะลดลงเมื่อปริมาณความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจากฝั่งดินแห้ง (dry side) จนถึงจุด  $w_{opt}$  การลดลงของค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านนี้มีผลเนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน โดยทั่วไปดินที่บดอัดทางด้านแห้ง โครงสร้างของดินจะจัดเรียงตัวแบบกระเกาะกระกะ (Flocculate) เนื่องจากที่ปริมาณความชื้นในดินที่ต่ำ ค่าความเข้มข้นของประจุจะสูง ยังผลให้ความหนาของวงน้ำ (double layer) ลดลง แรงผลักระหว่าง

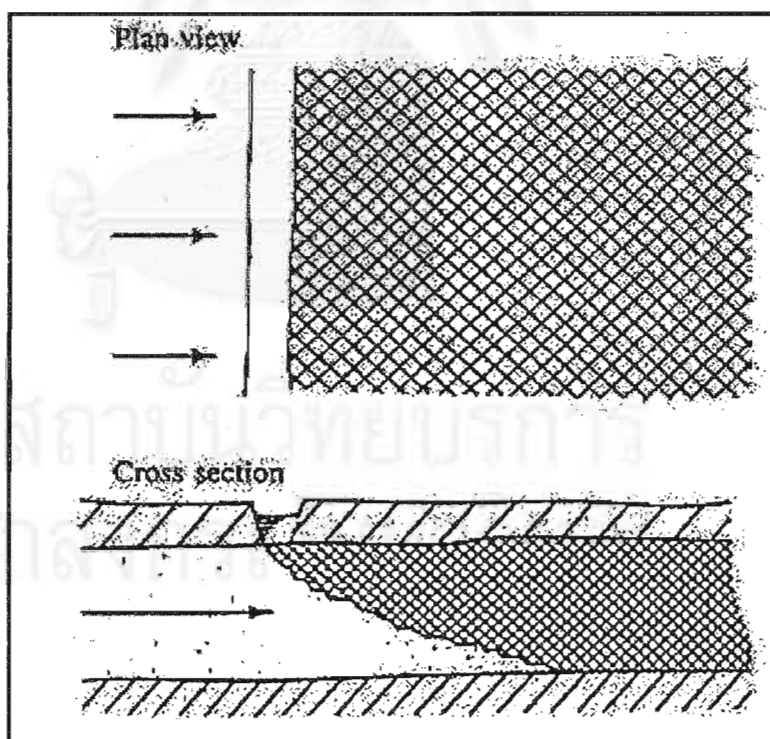
อนุภาคก็ลดลงด้วยทำให้อนุภาคของดินมีแนวโน้มจัดเรียงตัวแบบระเกะระกะ เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจนถึงจุด  $w_{opt}$  ขนาดของวงน้ำ (double layer) ก็จะขยายขึ้น และสำหรับดินบดอัดทางด้านเปียกโครงสร้างของดินจะจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ (Disperse) ค่าความเข้มข้นของประจุก็จะลดลง ยังผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น รวมถึงค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของ pore fluid ผ่านดินก็ลดลงด้วย แต่เมื่อปริมาณน้ำเลยจากจุด  $w_{opt}$  ไปทางด้านเปียกมากขึ้น ปริมาณน้ำจะไปแทนที่ช่องว่างในมวลดินมากขึ้นเรื่อยจนเต็มช่องว่างในมวลดินมากขึ้น ระดับความอิ่มตัวในมวลดินก็สูงขึ้น และระดับน้ำส่วนเกินนั้นนอกจากไปแทนที่ช่องว่างในมวลดินแล้วยังทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคของดินเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินบดอัดกลับเพิ่มขึ้นมาอีกครั้ง แต่ที่ระดับปริมาณนี้เมื่อมีการบดอัดจะทำให้เกิดการยุบตัวมากและค่าความหนาแน่นแห้งก็จะลดลง

นอกจากปริมาณความชื้นในดินบดอัด ที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ผลจากความเค้นที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation stress) ก็มีผลทำให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเปลี่ยนไปด้วย โดย Bowders et al., 1986 ได้แสดงถึงผลของความเค้นที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำที่มีต่อค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านไว้ว่า เมื่อมีความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างดินมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนช่องว่างในดิน (void ratio) ลดลงทำให้ความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ของดินลดลงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงถึงผลของความเค้นที่ใช้ในการอัดตัวคายน้ำที่มีต่อค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน

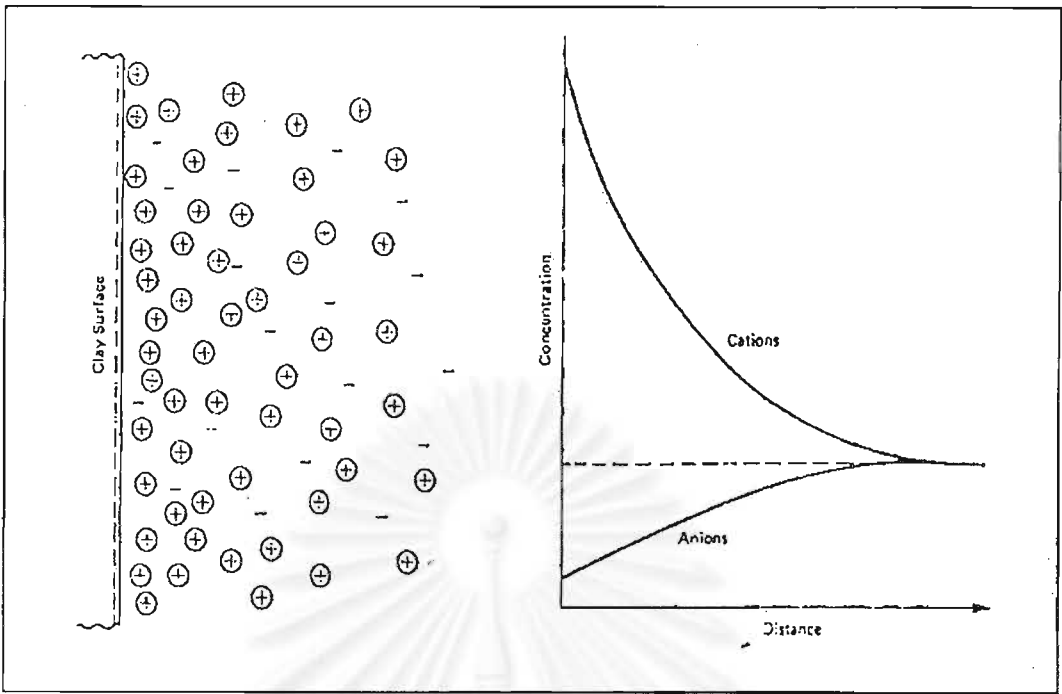




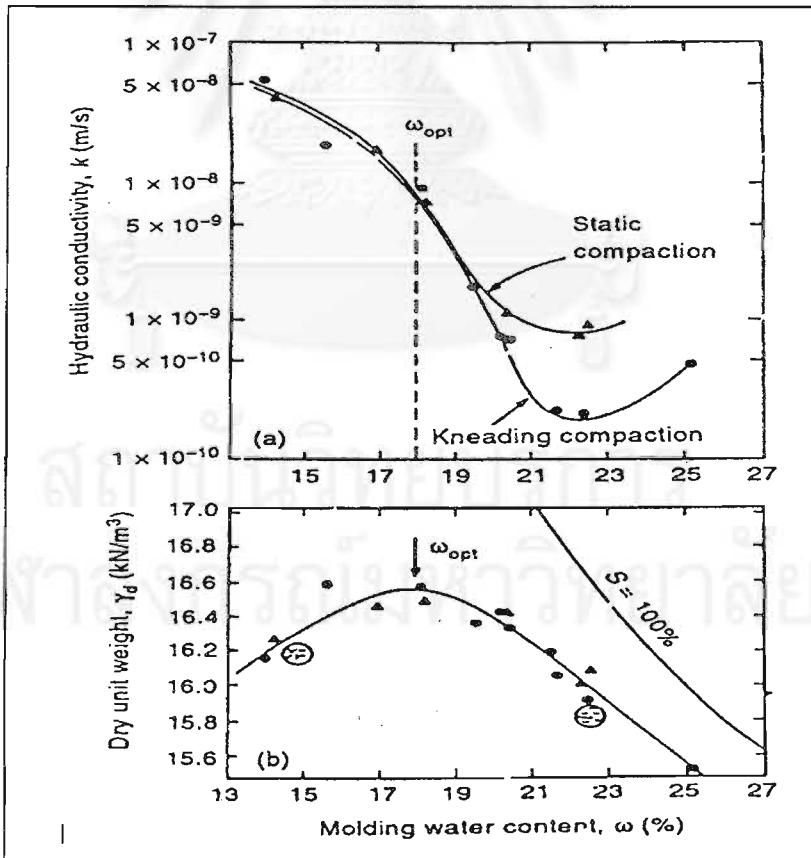
รูปที่ 2.1 สาเหตุของการเกิดขบวนการเคลื่อนตัวแบบ Mechanical Dispersion



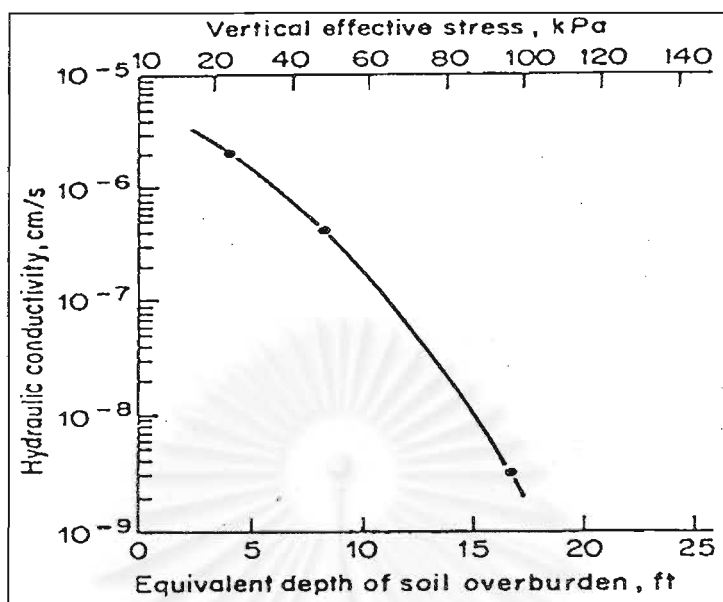
รูปที่ 2.2 การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจากลำคลองเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินเป็น Line Source



รูปที่ 2.3 ประจุบวกที่มายึดเกาะล้อมรอบอนุภาคดินภายใต้สนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเหนียวบดอัดที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ กัน (Mitchell, Hooper and Campanella, 1965; Lambe, 1960)



รูปที่ 2.5 ผลของความเค้นกดทับแนวตั้งที่มีต่อค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน  
(Bowders et al., 1986)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ตารางค่า  $\text{erfc}(x)$  ของฟังก์ชัน Complementary Error Function เพื่อใช้แก่สมการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อน

VALUES OF THE ERROR FUNCTION,  $\text{erf}(x)$ , AND THE COMPLEMENTARY ERROR FUNCTION,  $\text{erfc}(x)$ , FOR POSITIVE VALUES OF  $x$

$x$	$\text{erf}(x)$	$\text{erfc}(x)$	$x$	$\text{erf}(x)$	$\text{erfc}(x)$
0	0	1.0	1.1	0.880205	0.119795
0.05	0.056372	0.943628	1.2	0.910314	0.089686
0.1	0.112463	0.887537	1.3	0.934008	0.065992
0.15	0.167996	0.832004	1.4	0.952285	0.047715
0.2	0.222703	0.777297	1.5	0.966105	0.033895
0.25	0.276326	0.723674	1.6	0.976348	0.023652
0.3	0.328627	0.671373	1.7	0.983790	0.016210
0.35	0.379382	0.620618	1.8	0.989091	0.010909
0.4	0.428392	0.571608	1.9	0.992790	0.007210
0.45	0.475482	0.524518	2.0	0.995322	0.004678
0.5	0.520500	0.479500	2.1	0.997021	0.002979
0.55	0.563323	0.436677	2.2	0.998137	0.001863
0.6	0.603856	0.396144	2.3	0.998857	0.001143
0.65	0.642029	0.357971	2.4	0.999311	0.000689
0.7	0.677801	0.322199	2.5	0.999593	0.000407
0.75	0.711156	0.288844	2.6	0.999764	0.000236
0.8	0.742101	0.257899	2.7	0.999866	0.000134
0.85	0.770668	0.229332	2.8	0.999925	0.000075
0.9	0.796908	0.203092	2.9	0.999959	0.000041
0.95	0.820891	0.179109	3.0	0.999978	0.000022
1.0	0.842701	0.157299			

### บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดสอบ

#### 3.1 ที่มาของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ เป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบ Disturbed sample ซึ่งทำการเก็บมาจากบริเวณ กระทรวงสาธารณสุข จังหวัดนนทบุรี ที่ระดับความลึกจากผิวดิน ประมาณ 1-3 เมตร โดยใช้รถตักดินทำการเปิดหน้าดินเป็นบริเวณกว้างแล้ว เก็บตัวอย่างดินขึ้นมา หลังจากเก็บตัวอย่างดินมาแล้วจะนำดินมาทำการอบแห้ง และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 (ขนาดรูเปิด 0.02 นิ้ว) เพื่อจะได้นำไปบดอัด หรือผสมกับสารทดสอบเพื่อใช้ทดสอบหาความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบส ต่อไป ซึ่งคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินที่ได้เก็บมานั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างดินก่อนทำการทดสอบ

คุณสมบัติทางกายภาพ : ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Disturbed Sample)

- สีเทาถึงเทาเข้ม (Grey to Dark grey)
- ปริมาณความชื้นในธรรมชาติ (Natural Moisture Content) : 54-60 %
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) : 2.58-2.63
- ชีตจำกัดเหลว (Liquid Limit) : 84-92 %
- ชีตจำกัดพลาสติก (Plastic Limit) : 38-45 %

คุณสมบัติทางเคมี :

- ค่า pH ของดินผสมน้ำในอัตราส่วน 1:5 โดยน้ำหนัก: 7.5 - 8.0
- ปริมาณคลอไรด์ (Soluble Chloride, Cl<sup>-</sup>) : 5.0 mg/l
- ปริมาณไบคาร์บอเนต (Bicarbonate, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) : 64 meq/100 g.dry soil

### 3.2 ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ

ของเหลวที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ จะนำมาใช้ผสมกับดินตัวอย่างก่อนการบดอัดและนำมาใช้เป็นสาร pore fluid ในการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านและการแพร่กระจายได้ ซึ่งของเหลวที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้แก่

1. น้ำประปา ซึ่งจะนำมาใช้ผสมกับดินอบแห้งก่อนนำไปบดอัด หรือใช้เตรียมตัวอย่างเพื่อวัดค่า pH ของดินในกรณีที่ไม่ทำการบดอัด ซึ่งน้ำประปาที่ใช้นี้มีค่า pH ประมาณ 7.2 - 7.6
2. น้ำกลั่น ซึ่งจะนำมาใช้ผสมกับกรด หรือ เบส เพื่อให้ได้ pore fluid ที่มีความเข้มข้นตามที่ได้ค่า pH ตามที่ได้กำหนดไว้ ได้แก่ pH เท่ากับ 1.0 และ 13.0 ตามลำดับ โดยค่า pH ของน้ำกลั่นนี้มีค่าประมาณ 7.5 - 8.0
3. กรด (Acid) ซึ่งกรดที่ใช้ในการทดสอบนี้คือ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl) ชนิดเข้มข้น ซึ่งจะนำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ค่า pH เท่ากับ 1.0
4. เบส (Base) ซึ่งเบสที่ใช้ในการทดสอบนี้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) ซึ่งจะนำไปผสมกับน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ค่า pH เท่ากับ 13.0

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ จะเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการไหลซึมผ่าน และการแพร่กระจายได้ของดินเป็นหลัก ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้กรด และเบสที่มีค่าความเป็นกรด-เบสที่สูง ไม่สามารถใช้เครื่องทดสอบที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการได้ เพราะอาจเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์บางส่วนได้ เช่น อาจเกิดการกัดกร่อนของโลหะ หรือยางกันซึม ทำให้ไม่สามารถทดสอบต่อไปได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นใหม่โดยเลียนแบบเครื่องมือในห้องปฏิบัติการและปรับปรุงบางส่วนเพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบ เช่น สามารถทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน และสามารถทำการวัดอัตราการทรุดตัวจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ได้ นอกจากนั้นยังได้ทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นมาใหม่ เพื่อทำการทดสอบการแพร่กระจายได้ของดิน โดยใช้กรด-เบส เป็น pore fluid ซึ่งจะเรียกเครื่องมือทดสอบนี้ว่า "Long-Column Box"

### 3.3.1 เครื่องมือทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Rigid Boundary

เป็นเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถวัดความสามารถในการไหลซึมผ่าน และวัดอัตราการทรุดตัวระหว่างการทดสอบได้ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมือทดสอบมีดังนี้

1. กระบอกลู่ว่างดิน เป็นกระบอกลู่ว่างใช้สำหรับบรรจุดินเพื่อทำการบดอัดซึ่งมีลักษณะ และขนาดใกล้เคียงกับ Standard Proctor mold ในการทดสอบ Compaction Test เพื่อให้ได้พลังงานในการบดอัดใกล้เคียงกัน คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 ซม. สูง 20 ซม. มีฝาโลหะปิดตัวกระบอกลู่ว่างทั้งด้านบนและด้านล่าง โดยที่ฝาปิดด้านบนจะต่อเข้ากับระบบอัดแรงดันน้ำสองระบบด้วยกัน ระบบแรกจะเป็นระบบสำหรับการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ส่วนระบบที่สองจะเป็นระบบที่ใช้สำหรับการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยการอัดแรงดันอากาศเข้าไปเพื่อดันให้ของเหลวทดสอบ (pore fluid) ไหลผ่านตัวอย่างดิน ซึ่งจะเชื่อมต่อกับ ฝา cap ที่ปิดตัวอย่างดินอยู่ ดังรูปที่ 3.1 ส่วนฝาปิดด้านล่างจะมีรูให้สารทดสอบที่ไหลซึมผ่านตัวอย่างดินออกมา (effluent) ไหลมาสู่กระบอกลู่ว่างของเหลว เพื่อนำมาวัดและเก็บบันทึกค่าปริมาณของเหลวที่ไหลผ่านในช่วงเวลาหนึ่ง
2. ฝา cap สำหรับปิดตัวอย่างดิน เป็นแผ่นโลหะกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9.8 ซม. หนาประมาณ 1 ซม. เซาะร่องตรงกลางตามแนวแผ่น กว้างประมาณ 0.5 ซม. เพื่อสวมเส้นยางกันรั่ว (O-ring) ในขณะที่ทำการทดสอบ โดยที่ระบบอัดแรงดันน้ำที่ใช้ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ จะอัดแรงดันผ่านฝาปิดด้านบนลงมาเพื่อกดฝา cap ให้ไปดันตัวอย่างดินในกระบอกลู่ว่าง และตรงกลางฝา cap จะเชื่อมติดกับก้านโลหะขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.8 ซม. ผ่านฝาปิดด้านบนขึ้นมา เพื่อใช้วัดระยะการทรุดตัว โดยต่อเข้ากับ Dial Gauge เพื่อใช้วัดระยะการทรุดตัว นอกจากนั้นฝา cap ยังได้เจาะรูแล้วต่อเข้ากับระบบอัดแรงดันระบบที่สองเพื่อให้อัตราของเหลวทดสอบ (pore fluid) เข้าสู่ตัวอย่างดินด้วย
3. กระบอกลู่ว่างพลาสติก เพื่อใช้บรรจุของเหลวทดสอบซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความทนทานต่อกรด-เบสสูง ด้านบนของกระบอกลู่ว่างเชื่อมต่อกับระบบอัดแรงดันอากาศ (Air Compressor) เพื่ออัดของเหลวทดสอบในกระบอกลู่ว่างเข้าสู่ตัวอย่างดิน ส่วนด้านล่างของกระบอกลู่ว่างต่อเข้ากับฝาปิดด้านบนของกระบอกลู่ว่างดิน ดังรูปที่ 3.2

4. ระบบอัดแรงดัน ประกอบด้วยปั๊มอัดแรงดันลม และ เกจ์ควบคุมแรงดันอากาศ (Air Pressure Gauge) ซึ่งต่อเข้ากับแผงควบคุมแรงดัน (Control Panel) ที่ประกอบด้วย Regulator ที่ใช้สำหรับควบคุมแรงดันตามต้องการ และวาล์วปรับเปลี่ยนทิศทางของแรงดัน ดังรูปที่ 3.3 โดยแรงดันอากาศจากปั๊มจะถูกแบ่งออกเป็นสองระบบตามประเภทของการทดสอบดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คือ ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบเฮดคงที่ (Constant Head Method)

### 3.3.2 เครื่องมือทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Flexible Boundary

เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบอัดแรงตามแนวแกน 3 ทิศทาง (Triaxial Compression Test) ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี แต่จะทำการทดสอบโดยใช้น้ำเป็นของเหลวทดสอบเท่านั้น เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากเครื่องมือแบบ Rigid Boundary เพราะหากใช้กรดหรือเบส เป็นสารทดสอบอาจเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์บางส่วนได้

### 3.3.3 เครื่องมือทดสอบความสามารถในการแพร่กระจายได้

เครื่องมือทดสอบนี้เป็นการพัฒนาเครื่องมือขึ้นใหม่หมด เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบเตรียมขึ้นมา รายละเอียดอุปกรณ์ทดสอบที่สำคัญมีดังนี้

1. ชุดกล่องทดสอบ (Long-Column Box) มีลักษณะเป็นกล่องโลหะสี่เหลี่ยมขนาด 5x5x15 ซม. ส่วนปลายทั้งสองด้านของกล่องจะเจาะรูไว้ ซึ่งปลายแต่ละด้านจะเชื่อมต่อกับถังบรรจุของเหลวทดสอบ (Feed Tank) ที่ใส่ไว้ โดยต่อเชื่อมกับท่อพลาสติกที่ทนต่อกรด-เบส ดังรูปที่ 3.4
2. ถังบรรจุของเหลวทดสอบ (Feed Tank) เป็นถังพลาสติกใช้สำหรับใส่สารทดสอบได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปลายข้างหนึ่งของกล่องทดสอบจะต่อกับถังที่บรรจุสารทดสอบไว้ ส่วนปลายอีกข้างจะต่อไว้กับถังซึ่งบรรจุน้ำกลั่น เพื่อให้สารทดสอบเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดินในทิศทางเดียว โดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) คือให้ของเหลวมีการเคลื่อนที่จากถังที่บรรจุสารทดสอบผ่านตัวอย่างดินไปยังถังที่บรรจุน้ำกลั่น ดังรูปที่ 3.4



3. เครื่องมือวัดค่า pH เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่า pH ของสารทดสอบ รวมถึงตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบทั้งการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน และการแพร่กระจายของดิน โดยนำตัวอย่างดินมาผสมกับน้ำกลั่นให้เป็นเนื้อเดียวกัน (soil suspension) ก่อนนำไปวัดค่า pH ดังรูปที่ 3.5
4. เครื่องผสมดินแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเครื่องมือสำหรับผสมดินกับน้ำกลั่นให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน โดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กสองอัน ออกแรงผลักระหว่างกันพร้อมกับหมุนอยู่ในภาชนะ ทำให้ดินและน้ำถูกผสมเข้าด้วยกัน ก่อนที่จะนำไปวัดค่า pH
5. ชุดเครื่องมือไตเตรต เป็นเครื่องมือที่ใช้หาความเข้มข้นของสาร ซึ่งในการทดสอบนี้จะนำเครื่องมือไตเตรต นี้มาหาความเข้มข้นของ สารไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) และ คลอไรด์ที่ละลายน้ำ (Soluble Chloride) ภายหลังการทดสอบแต่ละชนิดแล้วเสร็จ เพื่อนำมาคำนวณหาค่า Diffusion Coefficient ต่อไป ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่ละลายอยู่ในตัวอย่างดินจากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวอย่างดินกับสารทดสอบ ชุดเครื่องมือไตเตรตแสดงไว้

### 3.4 วิธีการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน

เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาเป็นหลัก ซึ่งวิธีการทดสอบจะคล้ายกับการทดสอบโดยใช้ Oedometer ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ Rigid Boundary ภายใต้สภาวะความเค้นแบบ 1 มิติ ซึ่งเป็นสภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในชั้นดินตามธรรมชาติ นอกจากนั้นในตัวอย่างดินเดียวกันยังสามารถที่จะทำการทดสอบภายใต้สภาวะความเค้นที่ต่างกันได้อีก ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการไหลซึมผ่านกับสภาวะความเค้นได้ ซึ่งวิธีการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านในการศึกษาวิจัยนี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินเหนียวบดอัด

ก่อนที่จะทำการทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน จำเป็นที่จะต้องหาความหนาแน่นแห้งที่ระดับความชื้นต่างๆ กันของดินที่ได้ทำการเก็บมาเสียก่อน เนื่องจากที่แต่ละระดับความชื้นในดินบดอัดที่ต่างกันย่อมส่งผลให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านต่างกัน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องทำการบดอัดดินเพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดิน (Maximum Dry Density,  $\gamma_{d, max}$ ) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

(Optimum Moisture Content, OMC) โดยการบดอัดดินตามมาตรฐาน ASTM D698 ด้วย Standard Compaction Mold ซึ่งวิธีการทดสอบนี้จะเริ่มจากการนำดินที่ได้อบแห้งและบดให้ละเอียดไว้แล้วมาผสมกับน้ำที่ปริมาณต่างๆกัน หลังจากทำการบดอัดแล้ว ก็จะมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักที่ชั่งได้ในแต่ละค่าปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป รวมถึงน้ำหนักของดินที่ใช้ผสม จากนั้นจะนำค่าน้ำหนักดินและปริมาณความชื้นในดินไปคำนวณหาความหนาแน่นแห้ง (Dry Density,  $\gamma_d$ ) แล้วทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในดินบดอัด ซึ่งเรียกว่า 'Compaction Curve' ณ จุดสูงสุดของกราฟ คือค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณความชื้นในดินบดอัดที่เหมาะสม ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะได้นำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน และการแพร่กระจายไ้ของดินต่อไป

### 3.4.2 การทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้น้ำเป็น pore fluid

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่าน กับปริมาณความชื้นในดินบดอัด, สภาวะความเค้นที่เปลี่ยนแปลง รวมถึงการนำไปใช้เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อใช้ สารทดสอบอันได้แก่ กรวด และ เบสเป็น pore fluid ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างดินและการทดสอบ มีดังนี้

1. บดอัดดินลงในกระบอกโลหะ โดยผสมดินแห้งที่บดละเอียดแล้วกับน้ำที่ปริมาณต่างๆ โดยพิจารณาจาก Compaction Curve ในหัวข้อ 3.4.1 ซึ่งจะเลือกปริมาณความชื้นที่จะนำมาใช้ทดสอบขึ้นมาค่าหนึ่ง แล้วหาค่าความหนาแน่นแห้งที่ปริมาณความชื้นนั้น จาก Compaction Curve โดยในการทดสอบนี้จะเลือกทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นในดินดังต่อไปนี้ คือ 11%, 18%, 23% และ 26% ตามลำดับ หลังจากทำการผสมดินกับน้ำจน ดินและน้ำรวมเข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน และได้ปริมาณน้ำถูกต้องตามที่ทำการทดสอบแล้ว จะทำการบดอัดดินนั้นลงในกระบอก โดยก่อนจะทำการบดอัดดินลงไป จะต้องวางแผ่นรองซึ่งเป็นแผ่นกระดาษหรือผ้า (Geotextile) ไว้ที่ส่วนล่างของกระบอก ซึ่งแผ่นรองนี้จะต้องมีรูพรุนที่เล็กพอที่จะกันไม่ให้ดินหลุดออกมาได้ขณะทดสอบ แต่สามารถหรือยอมให้น้ำหรือของเหลวผ่านได้ เมื่อบดอัดดินลงในกระบอกตามมาตรฐาน ASTM ข้างต้นแล้ว ก็จะต้องปาดผิวหน้าดินให้เรียบ ทำการวัดความสูงของตัวอย่างดินและพื้นที่หน้า

ตัด เพื่อจะได้นำไปใช้ในการคำนวณค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านต่อไป หลังจากนั้นก็จะวางแผ่น Geotextile ไว้บนตัวอย่างดินอีก เพื่อป้องกันตัวอย่างดินหลุดเข้าไปในระบบอัดแรงดัน แล้วปิดตัวอย่างดินด้วยฝา cap และ ประกอบเครื่องมือทดสอบตามแผนภูมิในรูปที่ 3.6

2. ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ หลังจากบดอัดดินลงในกระบอกและประกอบเครื่องมือทดสอบแล้วเสร็จ ก็จะต้องทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) โดยค่าความเค้นที่ใช้ในการทดสอบนี้ ได้แก่ 20, 40, และ 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) โดยหลังจากทำการอัดตัวคายน้ำที่ค่าความเค้นค่าหนึ่งก็จะทำการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านไปด้วย จนครบค่าความเค้นทั้งสามค่า
3. ทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน หลังจากทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำที่ค่าความเค้นค่าหนึ่ง จนตัวอย่างดินมีการทรุดตัวค่อนข้างคงที่แล้ว จะทำการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน ด้วยวิธีเฮดแรงดันคงที่ (Constant Head Method) โดยการอัดแรงดันระบบที่สองผ่านฝาปิดกระบอกด้านบนและ ฝา cap ปิดตัวอย่างดิน เข้าสู่ด้านบนของตัวอย่างทดสอบ และปล่อยให้ของเหลวไหลผ่านตัวอย่างดิน ด้วยความดันประมาณ 10-20 psi แล้วทำการวัดปริมาณน้ำที่ไหลเข้า และไหลออกผ่านตัวอย่างดินทางด้านล่างของตัวอย่าง จนเมื่อปริมาณน้ำเข้าและออกในช่วงเวลาหนึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ก็จะทำการบันทึกค่าปริมาณน้ำในช่วงเวลานั้นเพื่อนำไปคำนวณหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$k = q.L/A.H$$

เมื่อ

k	=	ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน (เมตรต่อวินาที)
q	=	อัตราการไหลของของเหลวผ่านดินในช่วงเวลาหนึ่ง (เมตร <sup>3</sup> ต่อ วินาที)
L	=	ความสูงของตัวอย่างดิน (เมตร)
A	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (เมตร <sup>2</sup> )
H	=	เฮดแรงดัน (เมตร)

### 3.4.3 การทดสอบเพื่อหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้สารทดสอบเป็น pore fluid

โดยการทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน เมื่อชนิดของ pore fluid เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบด้วยน้ำ สารทดสอบอันได้แก่ กรดและเบส ซึ่งจากการเลือกใช้สารทดสอบดังกล่าว อาจทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลซึมผ่านกับค่า pH ของสารที่เปลี่ยนไปได้ ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะเหมือนกับการทดสอบโดยใช้น้ำเป็น pore fluid ในหัวข้อ 3.4.2 เพียงแต่จะทำการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินบดอัดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม หรือให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพียงค่าเดียวนั่นเอง หลังจากขั้นตอนการประกอบเครื่องมือแล้วเสร็จ จะทำการบรรจุสารทดสอบลงในกระบอกพลาสติกใส แล้วต่อเข้ากับระบบอัดแรงดันเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้น้ำเป็น pore fluid ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำและหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน ซึ่งจะยังคงใช้ความสัมพันธ์เดียวกันในการหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน

ในการทดสอบโดยใช้สารทดสอบอันได้แก่ กรด และเบส นี้มีการทดสอบที่แตกต่างจากการใช้น้ำเป็น pore fluid ตรงที่มีการพิจารณาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากผลของเวลาที่ทำการทดสอบ โดยการบันทึกอัตราการไหลของสารทดสอบผ่านดินออกไปอีกกระยะหนึ่ง ซึ่งวิธีการทดสอบมีดังนี้คือ หลังจากทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านที่ความเค้นเท่ากับ 80 psi แล้วเสร็จจะลดความเค้นลงมาเหลือ 40 psi ใหม่ แล้วทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านต่อไป ประมาณ 60-70 วัน และทุกครั้งที่มีการวัดปริมาณสารทดสอบที่ไหลผ่านตัวอย่างดินสู่ด้านล่างของกระบอกนั้น จะได้มีการนำสารที่ไหลออกมา (effluent) ไปวัดค่า pH และในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านนี้ เมื่อทำการทดสอบแล้วเสร็จและได้ถอดเครื่องมือหรืออุปกรณ์ออกแล้ว จะได้นำตัวอย่างดินในกระบอกออกมาตัดเป็นแผ่นตามขวางหนาประมาณ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งจะได้หน้าตัดตัวอย่างดินประมาณ 6-7 หน้าตัด เพื่อจะได้นำไปทำการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของดิน, วิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์และไฮเดียมที่คาดว่าดินจะมีการดูดซับไว้ และปริมาณไบคาร์บอเนตในดินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารทดสอบกับดิน ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีข้างต้นจะได้กล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

### 3.4.4 การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบ Flexible Boundary

โดยในการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินโดยใช้หน้าเป็น pore fluid เท่านั้น เนื่องจากการทดสอบประเภทนี้จะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบอัดแรงดันตามแนวแกนสามทิศทาง (Triaxial Compression Test) ซึ่งหากทดสอบโดยใช้สารทดสอบที่เป็นกรดหรือเบส อย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ อาจทำให้เกิดความเสียหายทั้งกับเครื่องมือทดสอบ และยางเมมเบรน (membrane) ทำให้เกิดการรั่วซึมได้ ซึ่งหากต้องการพิจารณาหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของสารทดสอบแบบ Flexible Boundary นี้ อาจใช้ผลการทดสอบโดยใช้หน้าเป็น pore fluid แบบ Rigid Boundary มาประยุกต์หาความสัมพันธ์เมื่อ pore fluid ที่ใช้เปลี่ยนแปลงไปได้

วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบจะคล้ายกับการเตรียมแบบ Rigid Boundary คือ ทำการบดอัดดินลงใน Standard Proctor Mold ที่ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นตามที่เลือกไว้ หลังจากทำการบดอัดแล้วเสร็จ จะนำตัวอย่างดินนั้นออกมาตัดแต่ง (trim) ให้เป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องมือ Triaxial Test แต่ทั้งนี้ความสูงของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านอาจลดขนาดลงมาเพื่อความรวดเร็วในการทดสอบได้ ส่วนวิธีการทดสอบนั้นจะเหมือนกับการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน คือจะมีการทำให้ตัวอย่างดินเกิดการอัดตัวคายน้ำก่อน แล้วจึงจะปล่อยแรงดันน้ำผ่านตัวอย่างดิน วัดปริมาณน้ำที่ไหลเข้า-ออก ตัวอย่างดินเช่นเดียวกับแบบ Rigid Boundary ทั้งนี้จะไม่มีการกดตัวอย่างดินภายหลังการอัดตัวคายน้ำเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือน ซึ่งวิธีการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Flexible Boundary มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ หลังจากเตรียมตัวอย่างดิน และประกอบเครื่องมือทดสอบแล้ว จะต้องทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) โดยการใช้ลมดูดอากาศในตัวอย่างดินออกมา (Suction) ซึ่งจะใช้เวลาในการดูดอากาศประมาณ 6-8 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการอัดแรงดันน้ำเข้าเซลล์ (Cell Pressure) พร้อมกับอัดแรงดันน้ำเข้าตัวอย่างดิน (Back Pressure) ด้วยแรงดันประมาณ 20 psi โดยในทางปฏิบัติควรใส่ Cell pressure มากกว่า Back pressure ประมาณ 2-3 psi เพื่อให้ตัวอย่างดินสามารถคงรูปอยู่ได้ โดยจะใช้เวลาในการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำในขั้นตอนนี้ประมาณ 2-3 วัน เพื่อให้ตัว

อย่างดินมีค่าระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) ใกล้เคียง 100% มากที่สุด

2. ทดสอบการอัดตัวคายน้ำ หลังจากทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว จะทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบอัดแรงดันเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Consolidation) ซึ่งจะทำการทดสอบที่ Confining Stress เท่ากับ 20,40 และ 80 psi ตามลำดับ เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Rigid Boundary หลังจากสิ้นสุดขบวนการอัดตัวคายน้ำในแต่ละค่า Confining Stress แล้ว ก็จะมีการทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านต่อไป
3. ทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยการทำให้ตัวอย่างดินเกิด Hydraulic Gradient จากการเพิ่มแรงดันน้ำเข้าตัวอย่างดินที่ด้านใดด้านหนึ่ง มากกว่าอีกด้านหนึ่ง ประมาณ 10 psi วัดปริมาณน้ำที่ไหลเข้า-ออก ตัวอย่างจนปริมาณน้ำไหลเข้า-ออกค่อนข้างคงที่แล้ว ก็จะมีการบันทึกค่าปริมาณน้ำในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านต่อไป เมื่อทดสอบที่ปริมาณความชื้นในดินค่าหนึ่งแล้วเสร็จก็จะทดสอบที่ปริมาณความชื้นอื่น ต่อไป เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Flexible Boundary กับปริมาณความชื้นในดินต่อไป

ในหัวข้อ 3.4 ซึ่งได้กล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านทั้งแบบ Rigid Boundary และ Flexible Boundary โดยสารทดสอบที่นำมาใช้เป็น pore fluid ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบนี้สามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิ (Flow chart) ดังรูปที่ 3.7

### 3.5 วิธีการทดสอบหาคคุณสมบัติการแพร่กระจายได้ของดิน

การทดสอบเพื่อประมาณค่าทางด้าน Dispersivity Characteristic ของดินนั้นจะต้องอาศัยความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหล ฉะนั้นจึงต้องทำการทดสอบและเก็บตัวอย่างดินไปทำการวิเคราะห์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน ซึ่งวิธีการทดสอบหาคคุณสมบัติการแพร่กระจายของสารทดสอบ (pore fluid) มีขั้นตอนดังนี้

### 3.5.1 การเตรียมตัวอย่างดิน และเครื่องมือทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างดินของการทดสอบนี้ คือการบดอัดตัวอย่างดินลงในเครื่องมือทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมา แต่ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือทดสอบดังกล่าวมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ทำให้ไม่สามารถบดอัดแบบทั่วไปได้ จึงต้องควบคุมปัจจัยทางด้านพลังงานในการบดอัดไว้ให้เท่ากับการบดอัดลงใน Standard Mold โดยการควบคุมการบดอัดให้ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบคุณสมบัติการแพร่กระจายมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมตรงกับกรทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างและเครื่องมือทดสอบมีดังนี้

1. ผสมดินแห้งกับน้ำ ตามปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้คำนวณไว้ โดยในการผสมนี้จะใช้เครื่องผสม (Mixer) เพื่อให้ส่วนผสมระหว่างดินกับน้ำเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น
2. บดอัดตัวอย่างดินลงในเครื่องมือทดสอบ โดยแบ่งการบดอัดดินซึ่งได้คำนวณน้ำหนักที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดไว้แล้วออกเป็นชั้นๆ จำนวน 4 ชั้น แต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 3-4 ซม.
3. ประกอบกล่องเครื่องมือทดสอบที่ได้ทำการบดอัดตัวอย่างดินไว้ในเครื่องมือทดสอบเรียบร้อยแล้วเป็นชุดๆ ดังแผนภูมิในรูปที่ 3.8 โดยแต่ละชุดจะประกอบด้วยกล่องเครื่องมือทดสอบประมาณ 4-5 กล่อง ซึ่งจะกำหนดไว้ให้สามารถทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่เวลาต่างๆกันได้
4. เมื่อประกอบเครื่องมือแต่ละชุดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการเริ่มปล่อยให้สารทดสอบจาก feed tank แพร่กระจายเข้าสู่ตัวอย่างดิน ทั้งนี้จะต้องให้สารทดสอบที่แพร่กระจายเข้าสู่ตัวอย่างดินมี Hydraulic Gradient เกิดขึ้นน้อยที่สุด และในขณะที่ปล่อยให้สารทดสอบนี้จะต้องควบคุมอุณหภูมิ ไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงมาก เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

### 3.5.2 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปวิเคราะห์

โดยการเก็บตัวอย่างนี้ จะเป็นการเก็บตัวอย่างดินจากกล่องเครื่องมือทดสอบทีละกล่องในแต่ละชุดเมื่อถึงกำหนดเวลา เช่น 10, 30 หรือ 60 วัน เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนใน

การเก็บตัวอย่างรวมถึงการเตรียมตัวอย่างดินที่เก็บมาแล้วไปทำการวิเคราะห์ทางเคมีต่อไป มีขั้นตอนดังนี้

1. เมื่อถึงกำหนดเวลาที่จะทำการเก็บตัวอย่าง จะทำการจดบันทึกอุณหภูมิห้องขณะนั้น และเก็บตัวอย่างสารทดสอบใน feed tank ไปวัดค่า pH เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่า pH จากนั้นจะทำการถอดกล่องเครื่องมือทดสอบที่ติดอยู่กับ feed tank ออกมาเพื่อที่จะเก็บตัวอย่างดินต่อไป
2. ตัดตัวอย่างดินในกล่องเครื่องมือตามขวาง ออกเป็น 5 ส่วน ซึ่งจะทำให้ได้ตัวอย่างดินมีลักษณะเป็น สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5x5x3 ซม. โดยตัวอย่างดินแต่ละส่วนนี้จะถูกแบ่งมาทำการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้คือ
  - หาปริมาณความชื้นในตัวอย่างดิน เพื่อเป็นการยืนยันว่าได้เกิดขบวนการแพร่กระจายของสารทดสอบในตัวอย่างดิน
  - หาค่า pH ของดิน เพื่อดูความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบส ของดินเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป พร้อมทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตามระยะทางที่สารทดสอบได้เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างดิน
  - หาปริมาณคลอไรด์ ( $Cl^-$ ) ที่ถูกดูดซับไว้บริเวณผิวดิน กรณีที่ทดสอบการแพร่กระจายด้วยกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีไตเตรต ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.6
  - หาปริมาณสารไบคาร์บอเนต ( $HCO_3^-$ ) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับสารทดสอบทั้งสองชนิด ด้วยวิธีไตเตรตเนื่องจากเชื่อว่าสารไบคาร์บอเนตนี้เป็นตัวการสำคัญในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบสในดิน ซึ่งวิธีการวิเคราะห์จะได้อีกกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.7

นอกจากการทดสอบเพื่อศึกษาการแพร่กระจายของดิน รวมถึงความสามารถในการปรับสภาพกรด-เบส ของดินที่บดอัดในเครื่องมือทดสอบ Long-Column Box แล้วในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ยังได้ทำการทดสอบหาความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบสของดินที่ไม่ได้ทำการบดอัดไว้ด้วย ซึ่งจะเรียกการทดสอบนี้ว่าเป็น "Batch-type Test" โดยทำการวัดค่า pH ของตัวอย่างดินที่ได้ผสมกับน้ำประปาที่ปริมาณความชื้นต่างๆกัน กับตัวอย่างดินที่ผสมด้วยกรดและผสมด้วยเบสที่ปริมาณต่างๆกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยขั้นตอนในการทดสอบมีดังนี้



1. นำตัวอย่างดินแห้งในปริมาณที่เหมาะสม ผสมกับน้ำประปาให้ได้ปริมาณความชื้นในดินเท่ากับ 20, 30 และ 40 % โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งจะได้ตัวอย่างดินทดสอบจากขั้นตอนนี้อันจำนวน 3 ชุดนำไปเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อไม่ให้ความชื้นในดินสูญเสียในระหว่างการเก็บเพื่อรอการทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆ
2. นำตัวอย่างดินแห้งในปริมาณที่เหมาะสม ผสมกับน้ำประปาที่ความชื้น 22% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่จุดความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) เมื่อได้ตัวอย่างดินที่ผสมน้ำประปาแล้วก็จะผสมกับสารทดสอบทั้งสองอีกครั้งที่ปริมาณสารทดสอบต่างๆกัน ดังนี้คือ 5, 10 และ 20 % โดยน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งจะทำให้สารทดสอบเมื่อรวมกับปริมาณน้ำเดิมที่มีอยู่ในตัวอย่างดินอยู่ 22% แล้วมีค่า pH เปลี่ยนแปลงไป (จากการคำนวณ) ดังนี้
  - กรณีเป็นกรด (pH เริ่มต้นเท่ากับ 1.0) เปลี่ยนไปเป็น 1.66, 1.45 และ 1.28 สำหรับการผสมตัวอย่างดินด้วยกรดปริมาณ 5, 10 และ 20 % โดยน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ
  - กรณีเป็นเบส (pH เริ่มต้นเท่ากับ 13.0) เปลี่ยนไปเป็น 12.34, 12.55 และ 12.74 สำหรับการผสมตัวอย่างดินด้วยกรดปริมาณ 5, 10 และ 20 % โดยน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ

หลังจากการผสมตัวอย่างดินกับสารทดสอบแล้วจะได้ตัวอย่างดินทดสอบจากขั้นตอนนี้อันจำนวนทั้งสิ้น 6 ชุด (จากที่ผสมด้วยกรด 3 ชุดและเบส 3 ชุด) ซึ่งจะนำไปเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อไม่ให้ความชื้นในดินสูญเสียในระหว่างการเก็บเพื่อรอการทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆ เช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างในข้อที่ 1.

3. นำตัวอย่างดินที่ผสมไว้สารทดสอบทั้งจากข้อ 1. และข้อ 2. ในแต่ละชุด ที่ระยะเวลาต่างๆ มาทำการวิเคราะห์หาค่า pH แล้วนำผลจากการวิเคราะห์หลายๆ ระยะเวลามาเปรียบเทียบความสามารถในการปรับสภาพกรด-เบส เช่นเดียวกับการทดสอบดินที่บดอัด

ขั้นตอนในหัวข้อ 3.5 ซึ่งได้กล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่าง และวิธีการทดสอบเพื่อหาการแพร่กระจายได้ของดิน รวมถึงการวัดค่า pH ของตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการบดอัด โดยสารทดสอบที่นำมาใช้เป็น pore fluid ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก และ

โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบนี้สามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิ (Flow chart) ดังรูปที่ 3.9

### 3.6 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในดิน

ในกรณีที่เป็นการศึกษาหาความสามารถในการไหลซึมผ่านและการทดสอบการแพร่โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารทดสอบ จะต้องทำการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินทั้งก่อนและหลังการทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์ในดิน เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายได้ (Coefficient of Diffusion) ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่ทำการวิเคราะห์นี้จะอยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ (Soluble salt) วิธีการวิเคราะห์คลอไรด์ในดินในการศึกษาวิจัยนี้ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำตัวอย่างดินแห้ง 10 กรัมผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร (เพื่อให้ได้อัตราส่วนของดินแห้งต่อน้ำเป็น 1:10) แล้วนำมาผสมให้เข้ากันเป็น soil suspension โดยใช้เครื่อง magnetic stirrer เพื่อให้คลอไรด์ในดินถูกชะออกมาละลายอยู่ในน้ำ
2. นำส่วนผสมของดินกับน้ำ (soil suspension) นั้นไปสกัดเอาส่วนที่เป็นดินออกโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.44 หรือกระดาษกรองที่มีขนาดรูเปิด (Opening size) เทียบเท่า หรืออาจนำไปทำการ centrifuge เพื่อแยกส่วนที่เป็นน้ำและดินออกจากกัน
3. นำน้ำส่วนที่ได้จากการสกัดในข้อ 2. มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่นเดียวกับวิธีหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำตามมาตรฐานของ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1995, Method 4500-CI C. Mercuric Nitrate Method. ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะเป็นการหาคลอไรด์โดยวิธีไตเตรตด้วยสารละลายปรอทไนเตรต (Mercuric Nitrate)

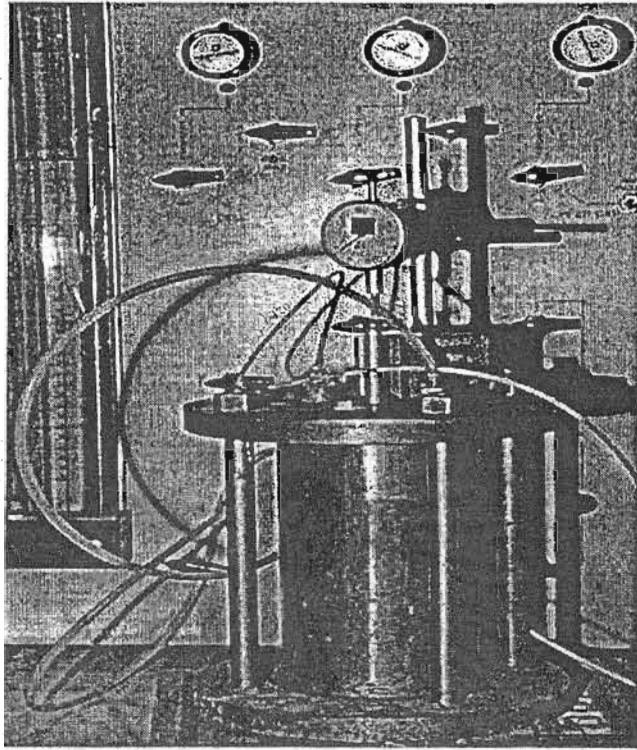
### 3.7 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไบคาร์บอเนตในดิน

โดยในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ปริมาณของสารไบคาร์บอเนต (Bicarbonate,  $\text{HCO}_3^-$ ) ซึ่งจะอยู่ในรูปของประจุไอออน ที่แตกตัวอยู่ในตัวอย่างดิน ทั้งที่เป็นตัวอย่างดินก่อนที่จะ

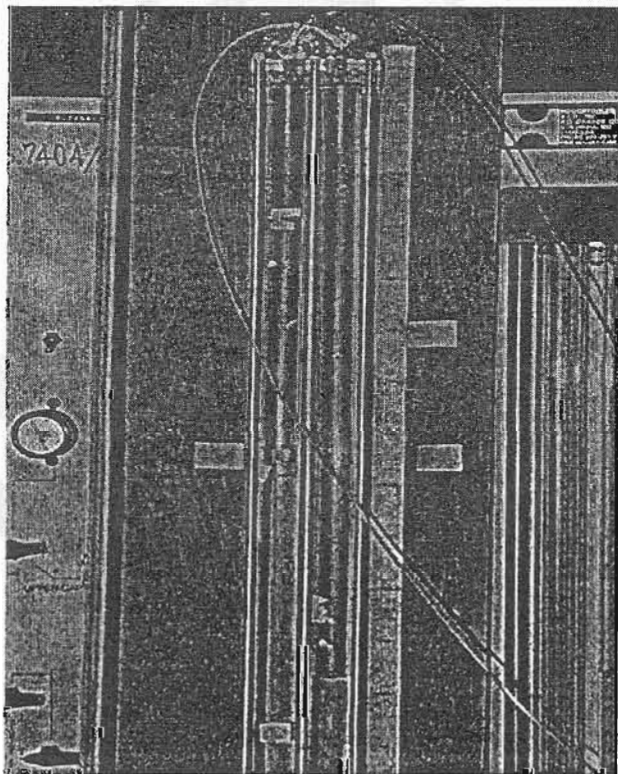
ทำการทดสอบใดๆ และตัวอย่างดินภายหลังจากการทดสอบ เพื่อดูปริมาณไบคาร์บอเนตที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารทดสอบ (กรดหรือเบส) กับตัวอย่างดิน ทั้งจากการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านและการแพร่กระจายได้ของดิน ซึ่งวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารไบคาร์บอเนตในการศึกษาวิจัยนี้ จะเป็นวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไตเตรต ด้วยกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid, 0.01 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตามมาตรฐานของ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1995, Method 2320 B. Titration Method. ซึ่งวิธีการเตรียมตัวอย่างดินก่อนนำไปไตเตรต เพื่อหาปริมาณไบคาร์บอเนตนั้นจะเตรียมลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.6 (ข้อ 1-2)



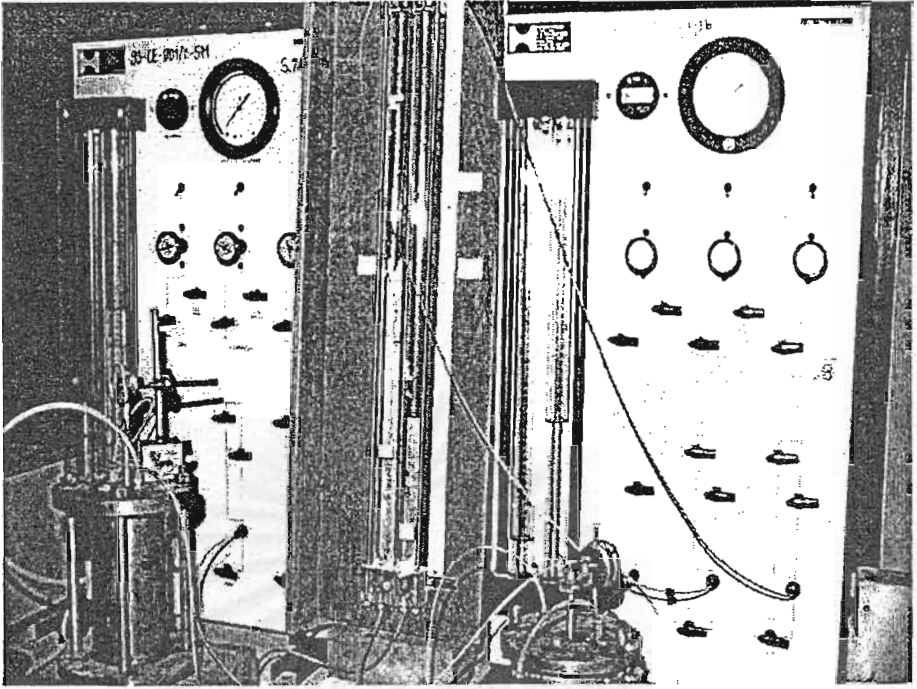
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



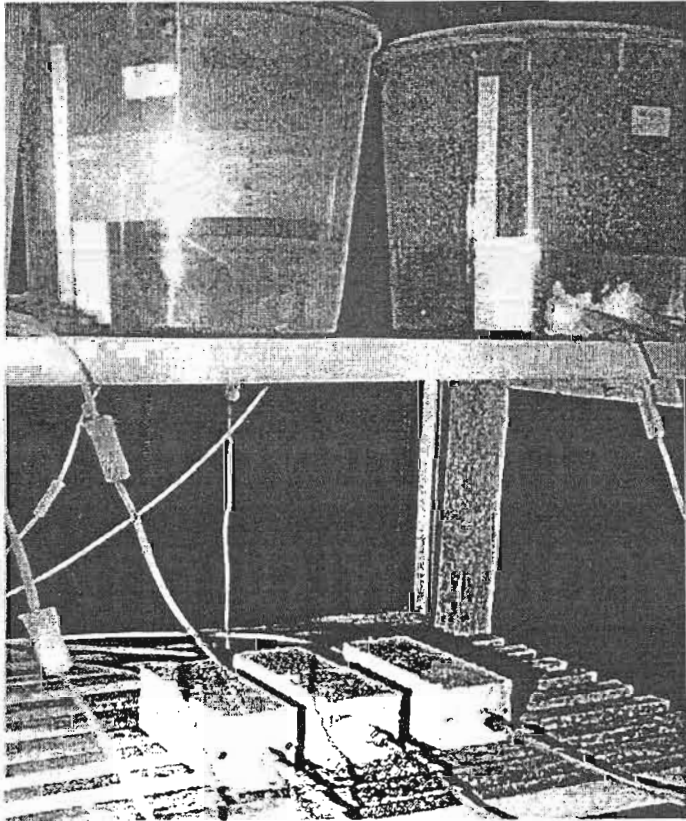
รูปที่ 3.1 ครอบอกเซลใช้บรรจุตัวอย่างดินทดสอบ เมื่อต่อเข้ากับระบบอัดแรงดัน



รูปที่ 3.2 ครอบอก Plexi-Glass ใช้บรรจุสารทดสอบเพื่อทดสอบ  
ความสามารถในการไหลซึมผ่าน



รูปที่ 3.3 ชุด Control Panel ที่ใช้ปรับแรงดันเข้าสู่ตัวอย่างดินทดสอบ

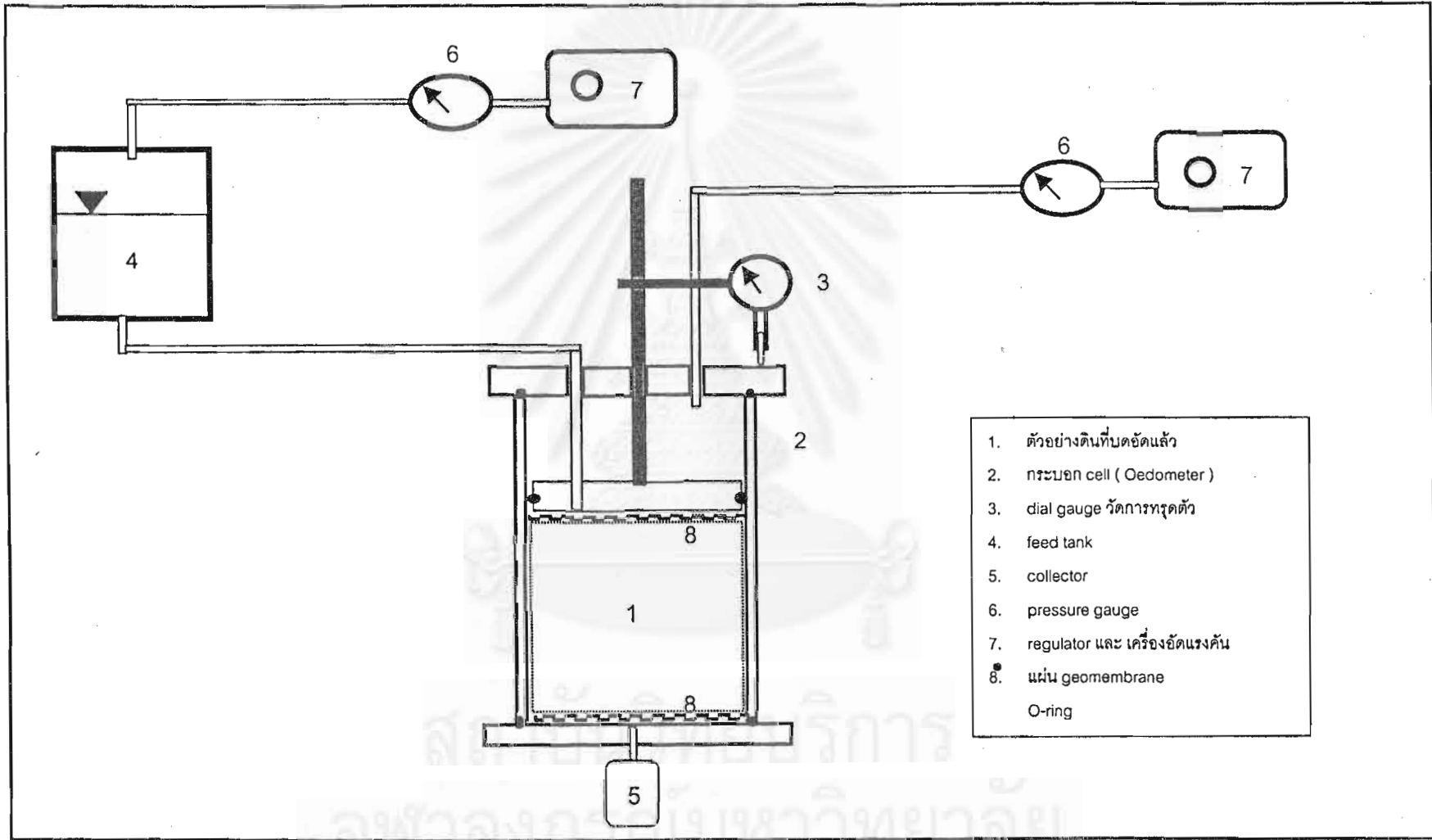


รูปที่ 3.4 Column Box และ Feed Tank ใช้บรรจุสารทดสอบ และ น้ำกลั่น

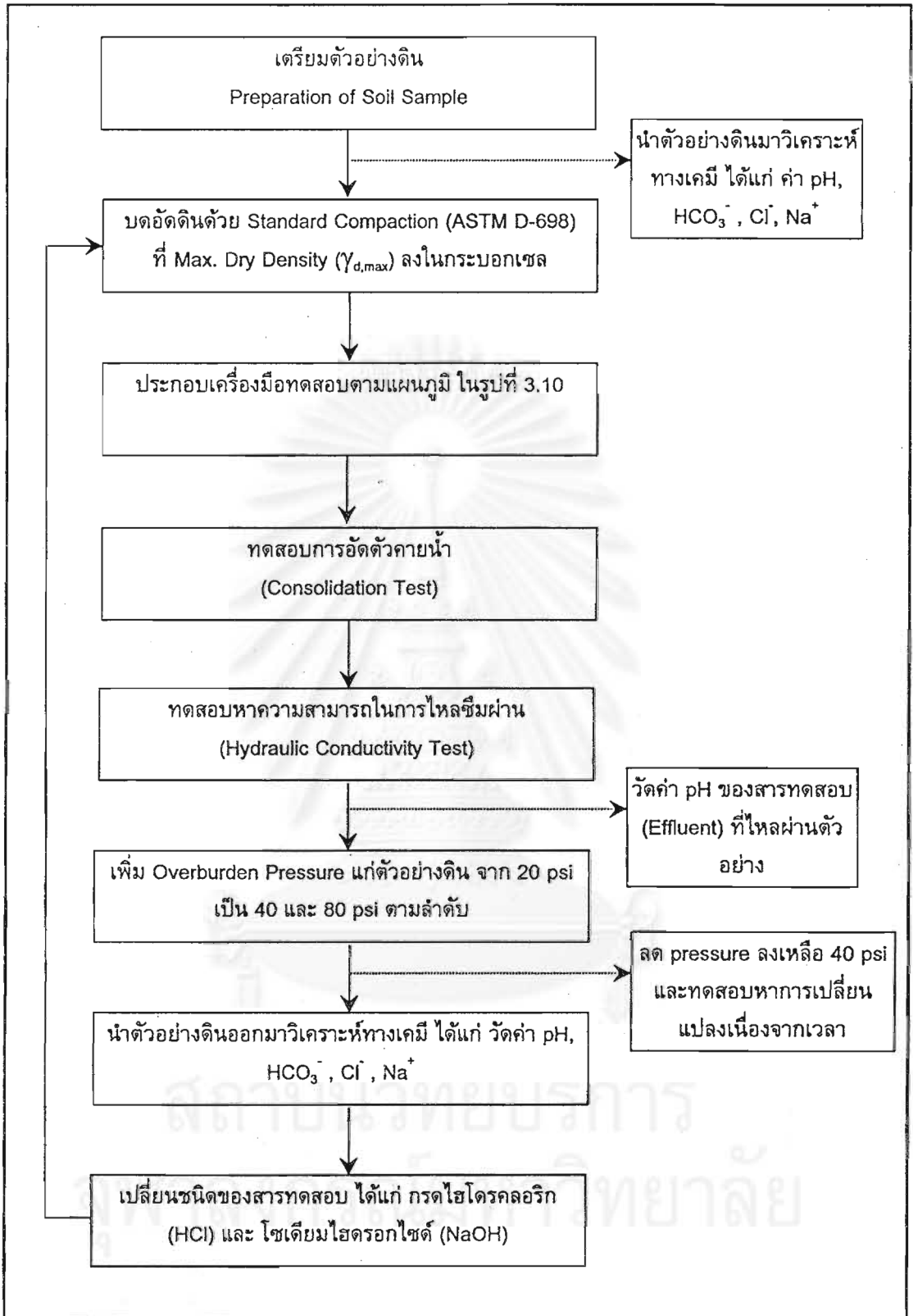


รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดค่า pH (pH - meter)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

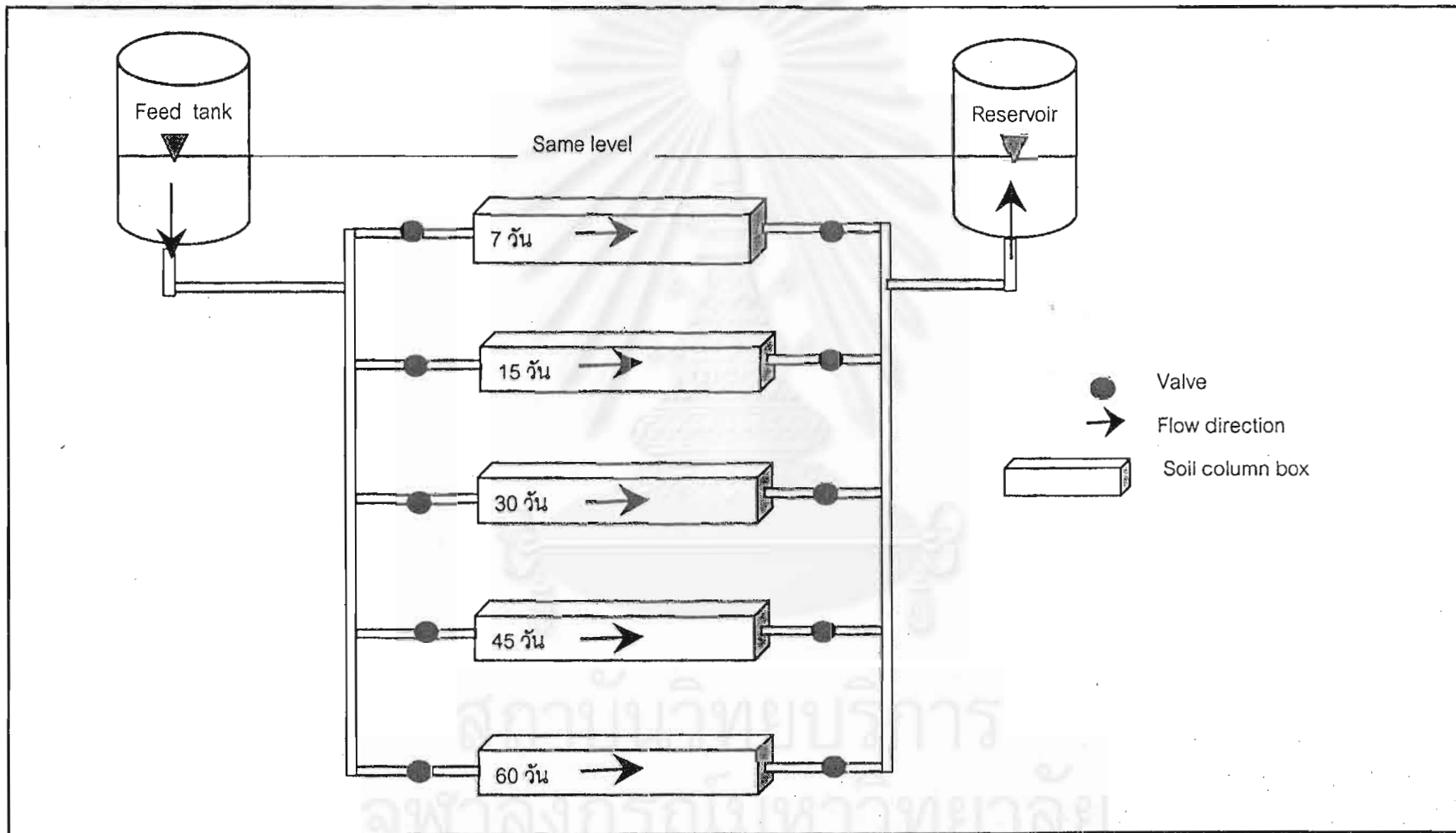


รูปที่ 3.6 ชุดเครื่องมือทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านเมื่อต่อเข้ากับอุปกรณ์ครบชุด

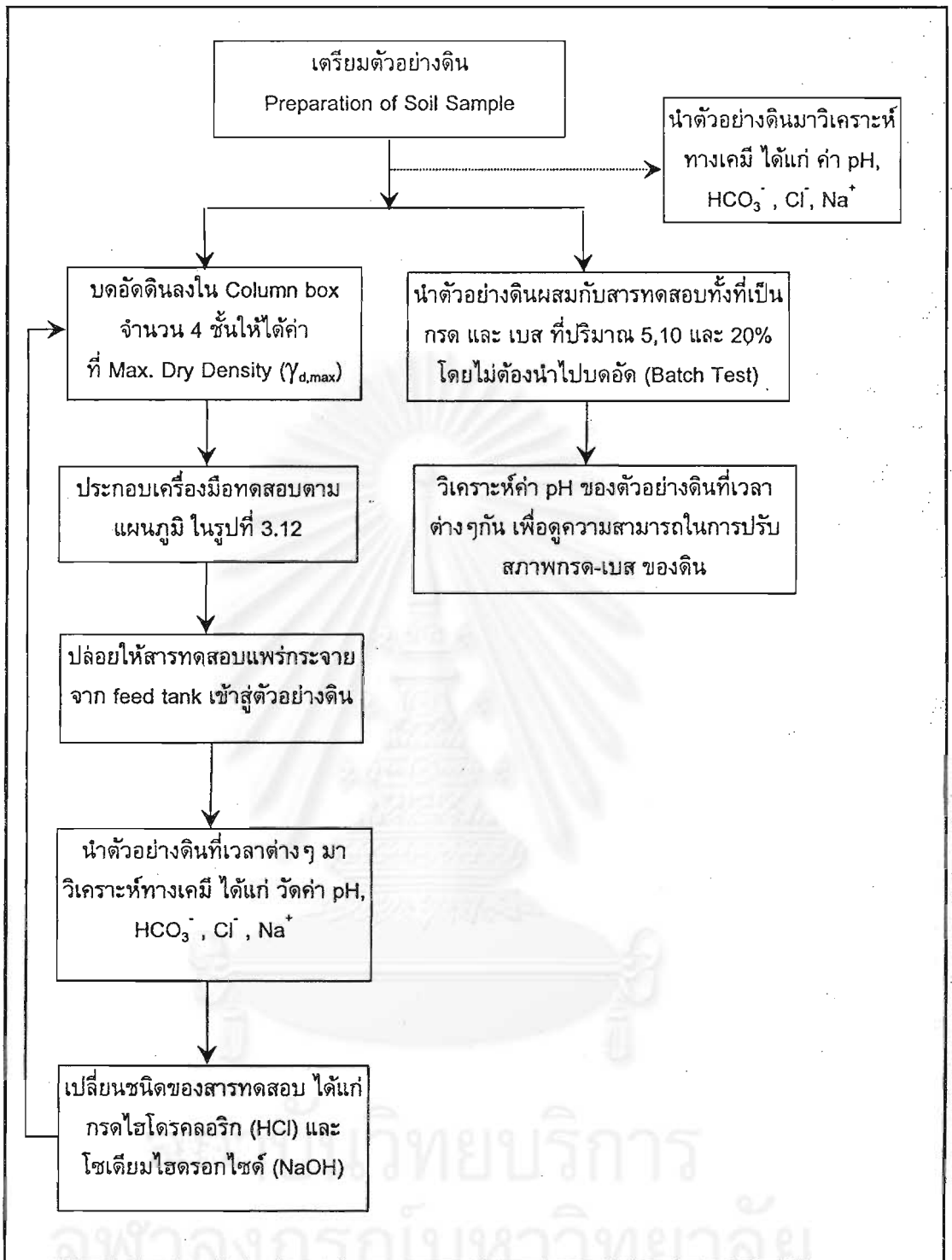


รูปที่ 3.7 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน





รูปที่ 3.8 ชุดเครื่องมือทดสอบ Column-box เมื่อต่อเข้ากับ Feed tank



รูปที่ 3.9 แผนภูมิแสดงขั้นตอนในการทดสอบหาการแพร่กระจายและความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบส ของดิน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

#### 4.1 ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในดินที่เหมาะสม

ก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านได้ของดิน (Hydraulic Conductivity,  $k$ ) ทั้งที่ใช้น้ำประปา และสารทดสอบ อันได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) เป็น pore fluid จะได้นำดินมาทำการทดสอบ Compaction Test แบบ Modified Procter Test ตามมาตรฐาน ASTM D-1557 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density,  $\gamma_{d,max}$ ) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content) ของดินนั้นก่อน โดยตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นในดินที่ได้ทำการบดอัด ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟ Compaction Curve ได้ดังรูปที่ 4.1 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินที่จะใช้เป็นตัวแทนของการทำการศึกษาวิจัยนี้ ซึ่งจุดสูงสุดของกราฟ คือค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในดินบดอัด

ปริมาณความชื้นในดินบดอัด (%)	ความหนาแน่นแห้ง (ตัน/ม <sup>3</sup> )
10.5	1.36
14.0	1.44
18.5	1.54
20.5	1.56
24.0	1.56
26.0	1.49

จากรูปที่ 4.1 ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1.57 ตัน/ม<sup>3</sup> และค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมประมาณ 22- 23 % ซึ่งจะได้นำค่าทั้งสองนี้ไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบอื่นๆต่อไป

## 4.2 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของตัวอย่างดินก่อนที่จะนำมาทดสอบ

เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด และเบส ก่อนและหลังการทดสอบที่เวลาต่างๆ รวมถึงการคำนวณหาค่า Diffusion Coefficient (D) จึงต้องทำการวัดปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในดินก่อน ซึ่งคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาในการทดสอบนี้ได้แก่ ค่า pH ของตัวอย่างดินบดอัด, ปริมาณของคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) ในดิน, ปริมาณของไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ในดินซึ่งคาดว่าจะน่าจะเป็นสารที่ทำหน้าที่ปรับสภาพให้กรด-เบสของดิน ซึ่งวิธีการทดสอบหาปริมาณดังกล่าวได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

จากการวิเคราะห์ปริมาณดังกล่าวในห้องปฏิบัติการทางเคมี ได้ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินก่อนทำการทดสอบต่างดังนี้

1. ค่า pH ของดินเริ่มต้นมีค่าประมาณ 7.5 ถึง 8.0
2. ปริมาณคลอไรด์ในดิน ซึ่งอยู่ในรูปของ soluble salt เท่ากับ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปริมาณสารไบคาร์บอเนต เท่ากับ 64 milliequivalent ต่อดินแห้ง 100 กรัม

นอกจากการวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยกรรมวิธีทางเคมีแล้วยังได้นำตัวอย่างดินไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่อยู่ในดินโดยวิธี X-ray Fluorescence Spectrometer โดยได้นำตัวอย่างดินทั้งก่อนและหลังการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะคำนวณปริมาณธาตุออกมาอยู่ในรูปของ oxide ของธาตุนั้นๆ ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่อยู่ในดินก่อนทำการทดสอบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่อยู่ในดินก่อนทำการทดสอบ  
โดยวิธี X-ray Fluorescence

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก)				
	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	Cl
ดินเหนียว	0.56	1.36	2.03	0.57	-

หมายเหตุ: ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปของ Oxide ของธาตุนั้น

### 4.3 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อนำน้ำเป็น Pore fluid

การทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน โดยมีน้ำประปาเป็น pore fluid นั้นจะทำการทดสอบทั้งแบบ Rigid Boundary และ Flexible Boundary เพื่อศึกษาผลอันเนื่องมาจากปัจจัยทางด้านวิธีทดสอบด้วย โดยวิธีการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบแบบเสถียรความดันคงที่ ดังที่ได้อธิบายใน บทที่ 3

#### 4.3.1 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Rigid Boundary

ซึ่งจะได้พิจารณาถึงผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นกดทับในแนวตั้ง (Overburden stress) ในการทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) และผลจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในดินบดอัดด้วย ผลการทดสอบที่ได้จะได้นำมาใช้เปรียบเทียบกับที่ได้จากการทดสอบโดยใช้ กรวดและเบส เป็น pore fluid ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

สำหรับการทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Rigid Boundary นี้ จะทำการทดสอบโดยที่แต่ละปริมาณความชื้นค่าหนึ่งๆ จะทำการเพิ่มความเค้นกดทับในแนวตั้งเพื่อทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดิน ก่อนที่จะทดสอบหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน ด้วยแรงดันจำนวนสามค่า คือ 20, 40, และ 80 psi ตามลำดับ และปริมาณความชื้นที่ใช้ทดสอบจะเลือกให้อยู่ในช่วงที่ได้ทำการทดสอบ Compaction Test ไว้ ซึ่งค่าปริมาณความชื้นที่เลือกใช้ได้แก่ 14, 18, 22, และ 26% ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นในดินบดอัดที่ค่าแรงดันทั้งสามค่า ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินบดอัดนี้จะอยู่ในช่วงตั้งแต่  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-9}$  ซม.ต่อวินาที และเมื่อพิจารณาผลของความสามารถในการไหลซึมผ่านอันเนื่องมาจากปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงนั้น จะเห็นได้ว่าทางฝั่งที่มีการบดอัดด้านแห้ง (dry side) ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อปริมาณความชื้นของดินบดอัดเพิ่มขึ้น จนถึงค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) แต่เมื่อเป็นการบดอัดทางด้านเปียก (wet side) ความสามารถในการไหลซึมผ่านได้จะมีแนวโน้มเพิ่มกลับขึ้นมาอีก และในกรณีที่พิจารณาผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในแนวตั้งพบว่าทุกๆ ปริมาณความชื้นในดินบดอัด เมื่อความเค้นแนวตั้งเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลซึมผ่านก็จะลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากอัตราส่วนช่องว่างลดลงเมื่อเพิ่มความเค้นแนวตั้ง

#### 4.3.2 ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Flexible Boundary

เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Rigid Boundary ก็จะเป็นการพิจารณาหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน อันเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นซึ่งในที่นี้จะ เป็น Confining stress ในขบวนการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งจะทำการใส่แรงดันในการอัดตัวคายน้ำนี้ ภายหลังจากขั้นตอนทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) แล้ว โดย Confining stress ที่ใช้ได้แก่ 20, 40 และ 80 psi รวมถึงผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินบดอัดด้วย ปริมาณความชื้นที่เลือกใช้ ได้แก่ 11, 16, 22 และ 26 % ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบ Flexible Boundary ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน แบบ Flexible Boundary โดยใช้น้ำประปาเป็น pore fluid ความสามารถในการไหลซึมผ่านจะมีค่าอยู่ในช่วง ระหว่าง  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-9}$  ซม.ต่อ วินาที ซึ่งค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจะลดลงเมื่อความเค้น (Confining Stress) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่ดินมีอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio) ลดลง จากรูปเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการไหลซึมผ่านอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในดิน พบว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยเฉพาะในช่วงที่ปริมาณความชื้นอยู่ทางฝั่งบดอัดด้านแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบ Rigid Boundary แต่เมื่อปริมาณความชื้นในดินเพิ่มสูงขึ้นทางด้านบดอัดเปียก ความสามารถในการไหลซึมผ่านมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น ทุกๆค่าความเค้น

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบทั้งแบบ Rigid Boundary และ Flexible Boundary แล้ว พบว่าที่ปริมาณความชื้นและความเค้นค่าหนึ่งๆ ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจากการทดสอบแบบ Rigid Boundary จะสูงกว่าแบบ Flexible Boundary ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก boundary condition กล่าวคือ ในการทดสอบแบบ Rigid Boundary มีโอกาสเกิดการไหลซึมผ่านบริเวณที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างดินกับกระบอกเซลได้มากกว่า การไหลซึมผ่านระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างดิน กับยาง membrane ในเครื่องมือแบบ Triaxial เพราะที่ภายนอกยาง membrane จะมีแรงดันโดยรอบกดตัวอย่างดินอยู่และยังมี confining stress สูงๆ โอกาสที่จะเกิดการไหลซึมผ่านเช่นนี้ยิ่งเกิดขึ้นได้ยาก

#### 4.4 ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อใช้กรด และ เบสเป็น Pore fluids

ในการทดสอบนี้สิ่งที่จะพิจารณา ได้แก่ ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อใช้ กรด และเบสเป็น pore fluids ซึ่งเป็นการพิจารณาผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของ pore fluid ที่มีต่อตัวอย่างดิน รวมถึงผลอันเนื่องมาจากความเค้นในแนวตั้งในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำก่อนทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยเปรียบเทียบกับ ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินโดยมีน้ำเป็น pore fluid ที่ปริมาณความชื้นในดินบดอัดเท่ากับ 22% หรือที่จุดความชื้นในดินเหมาะสม ซึ่งความเค้นกดทับแนวตั้งที่ใช้ในขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ จะใช้เท่ากับที่ใช้ในการทดสอบโดยมีน้ำเป็น pore fluid ได้แก่ที่ 20 ,40 และ 80 psi ปริมาณความชื้นที่ใช้ในการบดอัดดินก่อนการทดสอบเท่ากับ 22% โดยประมาณ

นอกจากพิจารณาความสามารถในการไหลซึมผ่านอันเนื่องจากผลของความเค้นแนวตั้งและชนิดของ pore fluid แล้วยังได้พิจารณาผลอันเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ทำการทดสอบด้วย โดยจะทดสอบภายหลังจากที่ทำการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านที่ความเค้นกดทับในแนวตั้งเท่ากับ 80 psi แล้วเสร็จ โดยจะลดความเค้นกดทับลงมาเหลือ 40 psi แล้วปล่อยให้สารทดสอบไหลผ่านตัวอย่างดินตลอดเวลา และเก็บสารทดสอบที่ไหลผ่านตัวอย่างดินแล้ว (effluent) ไปวัดค่า pH ทุกๆครั้งที่ทำการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน เพื่อที่จะได้นำค่า pH ที่ได้ ณ.เวลาต่างๆมาพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า pH อันเนื่องมาจากผลของเวลาซึ่งผลการทดสอบนี้ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4 , 4.5 , และ 4.6 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน โดยใช้กรด (HCl) และ เบส (NaOH) เป็น pore fluid ที่แปรเปลี่ยนไปเนื่องจากผลของความเค้นกดทับในแนวตั้ง

จากรูป จะเห็นว่า ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อชนิดของ pore fluid เปลี่ยนไป จะยังคงมีค่าใกล้เคียงกันทุกๆ ค่าความเค้นแนวตั้งที่ใช้ในการอัดตัวคาน้ำ โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-9}$  ซม.ต่อ วินาที และเมื่อพิจารณาผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในแนวตั้งแล้ว ค่าความสามารถในการไหลซึมของดิน เนื่องจากสารทดสอบทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นกดทับในแนวตั้งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้น้ำประปาเป็น pore fluid อย่างไรก็ดีเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อใช้น้ำประปาเป็น pore fluid กับการใช้ กรดหรือเบสเป็น pore fluid ณ. ค่าความเค้นในแนวตั้งเดียวกัน จะเห็นได้ว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อใช้กรดหรือเบสเป็น pore fluid จะค่อนข้างสูงกว่าที่ใช้น้ำประปาเป็น pore fluid และเมื่อลดความเค้นแนวตั้ง (unloading) ลงมาที่ 40 psi อีกครั้งหลังจากทดสอบที่ 80 psi แล้วเสร็จ พบว่าความสามารถในการไหลซึมผ่านเมื่อเทียบกับที่ความเค้นแนวตั้งที่ 40 psi ตอนแรกนั้นจะมีค่าต่ำกว่า

และเมื่อพิจารณาความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน โดยมีกรด และ เบสเป็น pore fluid เทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบนี้จะประมาณ 60 วันหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมที่ 80 psi แล้วเสร็จและลดความเค้นแนวตั้งลงมาเหลือ 40 psi ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นพบว่า ความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินทั้งที่ใช้ กรด และ เบสเป็น pore fluid มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย จนถึงจุดหนึ่งจะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งจุดที่มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านคงที่นั้นจะประมาณ 25 วันหลังจากทำการลดความเค้นแนวตั้งลงมาเหลือ 40 psi ก็จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ  $5 \times 10^{-9}$  ซม. ต่อ วินาที อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการไหลซึมผ่านอันเนื่องมาจากผลของเวลานั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเค้นในแนวตั้ง

#### 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน

ภายหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านเสร็จแล้ว ก็จะนำตัวอย่างดินออกจากกระบอกเซล แล้วนำมาตัดแบ่งเป็นส่วนๆ ตามขวาง ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมหนาประมาณ 1-1.5 ซม. และนำดินแต่ละส่วนที่ได้ตัดแบ่งนั้นไปหาปริมาณความชื้นในดินและทำการวิเคราะห์ทางเคมีต่อไป



#### 4.5.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินเมื่อทดสอบโดยใช้ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็น pore fluid

ปริมาณความชื้นตลอดความยาวของตัวอย่างดิน หลังจากตัดแบ่งตัวอย่างดินออกเป็นส่วนๆ จำนวนทั้งหมด 6 ส่วนตามความยาวของตัวอย่างดินแล้ว แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 จากรูปจะเห็นว่า ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินที่ระดับ 0.5, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, และ 7.5 ซม. จากด้านบนของตัวอย่าง ซึ่งค่าปริมาณความชื้นโดยประมาณมีค่าเป็นดังนี้คือ 28.3, 26.3, 25.5, 25.6, 26.6, และ 29.5% ตามลำดับ

#### 4.5.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินเมื่อโดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็น pore fluid

เช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้กรดเป็น pore fluid ปริมาณความชื้นตลอดความยาวของตัวอย่างดิน หลังจากตัดแบ่งตัวอย่างดินออกเป็นส่วนๆ จำนวนทั้งหมด 6 ส่วนตามความยาวของตัวอย่างดินแล้ว ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 จากรูปจะเห็นว่า ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินที่ระดับ 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ซม. จากด้านบนของตัวอย่าง จะมีค่าปริมาณความชื้นโดยประมาณ เป็นดังนี้คือ 30.5, 29.5, 29.3, 29.1, 30.7, และ 32.4% ตามลำดับ

จากการทดสอบทั้งสองชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ใช้บดอัด ตัวอย่างดินก่อนทำการทดสอบ ซึ่งเท่ากับ 22% แล้ว พบว่ามีปริมาณความชื้นในดินภายหลังทดสอบเพิ่มขึ้นเนื่องจาก pore fluid ได้ไหลซึมผ่านตัวอย่างและแทรกเข้าไปแทนที่อากาศที่อยู่ในช่องว่างของมวลดิน โดยเฉพาะส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่าง ปริมาณความชื้นภายหลังทดสอบจะเพิ่มมากกว่าส่วนกลางตัวอย่างดิน ทั้งนี้เนื่องจากทั้งส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่างจะเป็นส่วนที่ต้องสัมผัสกับของเหลวตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.6 ค่า pH ของสารทดสอบทั้งสองชนิด ที่ไหลผ่านตัวอย่างดินและ ค่า pH ของดินภายหลังการทดสอบแล้วเสร็จ

จากรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงถึงค่า pH ของสารทดสอบที่ใช้เป็น pore fluid ได้แก่ กรด และ เบส ซึ่งถูกปล่อยให้ไหลผ่านตัวอย่างดิน เพื่อใช้ในการหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดิน ทั้งนี้ ค่า pH ของสารทดสอบตอนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1 และ 13 สำหรับ กรด (HCl) และ เบส (NaOH) ตามลำดับ ซึ่งจัดได้ว่าเป็น pH ของกรดแก่ และ เบสแก่ แต่จากการวัดค่า pH ของสารทดสอบพบว่า ค่า pH ของสารทดสอบที่ไหลผ่านดินออกมาทั้งสองชนิด มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก กล่าวคือ เมื่อพิจารณากรณีที่ทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้กรด (HCl) เป็น pore fluid ค่า pH ของสารที่ไหลผ่านตัวอย่างดินจากที่เท่ากับ 1 ในตอนเริ่มต้นนั้น เมื่อนำ effluent ที่ไหลผ่านออกมาวัด ค่า pH จะเพิ่มขึ้นอย่างทันที จนอยู่ในช่วงระหว่างค่า pH เท่ากับ 7 ถึง 8 ส่วนกรณีที่ทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้เบส (NaOH) เป็น pore fluid นั้น ก็มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน คือ effluent ที่ไหลผ่านออกมามีค่า pH เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจากที่ค่า pH เดิมเท่ากับ 13 เปลี่ยนเป็น pH เท่ากับ 8 ถึง 9 และค่า pH นี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ในช่วง 7-8 ในสำหรับกรณีที่ใช้กรดเป็น pore fluid และเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 8-9 สำหรับกรณีที่ใช้เบสเป็น pore fluid ตลอดช่วงเวลาที่ได้ทำการทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านอันเนื่องมาจากผลของเวลา ซึ่งสาเหตุที่ effluent ของสารทดสอบที่ไหลผ่านดินออกมามีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH นั้นมีสาเหตุมาจากการที่ตัวอย่างดินมีปริมาณของไบคาร์บอเนต (Bicarbonate,  $\text{HCO}_3^-$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติในการ buffer ทั้งกรด และ เบสที่มีอยู่ในดิน ซึ่งจะได้กล่าวถึงความเป็นกรด-เบสของตัวอย่างดินในหัวข้อต่อไป

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้ กรดหรือเบสเป็น pore fluid แล้วเสร็จ จะนำตัวอย่างดินหลังจากทำการทดสอบไปหาความเป็นกรด-เบสของดิน โดยนำตัวอย่างดินออกจากกระบอกเซลล์อัดแรงดัน แล้วทำการตัดตัวอย่างดินออกเป็นส่วนๆ ตามความยาวของกระบอกจะได้ตัวอย่างดินมีลักษณะเป็น แผ่นวงกลมหนาประมาณ 1 – 1.5 ซม. ซึ่งจะได้นำตัวอย่างดินที่ได้ตัดแบ่งแล้วนี้มาทำการแบ่งเพื่อทำการหาปริมาณน้ำในดินหลังการทดสอบ และนำตัวอย่างดินบางส่วนนี้ไปทำการวัดค่า pH ของดินเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของดินก่อนและหลังทำการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน นอกจากนั้นยังได้นำตัวอย่างดินไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมีเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของประจุคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) และ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) ซึ่งแตกตัวออกมาจาก กรด และเบสที่ใช้ทดสอบ ซึ่งคาดว่าน่าจะถูกดูดซับไว้บริเวณผิวของอนุภาคดิน (clay particle) เพื่อนำไปประมาณค่า Diffusion Coefficient ต่อไป นอกจากนั้นยังได้นำ

ตัวอย่างดินไปวิเคราะห์หาปริมาณของไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นสารที่ทำหน้าที่ในการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างที่มีอยู่ในดิน โดยวิธีการหาปริมาณของสารต่างๆ เหล่านี้ ได้กล่าวเอาไว้ในบทที่ 3

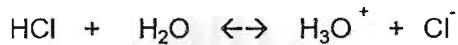
จากรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงถึงค่า pH ของดินหลังจากทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้กรดซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 1 เป็นสารทดสอบ พบว่าค่า pH ของดินเริ่มจากจุดที่อยู่ใกล้กับสารทดสอบจนถึงจุดที่สารทดสอบไหลออกสู่ภายนอก มีค่าดังนี้คือ 5.94, 5.99, 6.88, 7.30, 7.33 และ 7.35 ตามลำดับ ซึ่งค่า pH ณ.จุดที่ใกล้กับสารทดสอบมีค่าต่ำกว่าจุดอื่นเนื่องจากการสัมผัสกับสารทดสอบตลอดเวลา ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างดินจึงมากกว่าจุดอื่น อย่างไรก็ตามก็ดีเมื่อเปรียบเทียบค่า pH ที่วัดได้กับค่า pH เริ่มต้นของดินบดอัดก่อนทำการทดสอบ ซึ่งมีค่าประมาณ 7.5-8.0 นั้นพบว่ามีเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อันเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการ buffer กรด-เบส ของตัวอย่างดิน โดยเฉพาะสารไบคาร์บอเนตที่อยู่ในดินจะเป็นสาร buffer ให้ความเป็นกรดนั้นลดลง

จากรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงถึงค่า pH ของดินหลังจากทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยใช้เบสซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 13 เป็นสารทดสอบ พบว่าค่า pH ของดินเริ่มจากจุดที่อยู่ใกล้กับสารทดสอบจนถึงจุดที่สารทดสอบไหลออกสู่ภายนอก มีค่าดังนี้คือ 9.22, 9.15, 8.61, 8.47, 7.99 และ 7.95 ตามลำดับ ซึ่งค่า pH ณ.จุดที่ใกล้กับสารทดสอบมีค่าสูงกว่าจุดอื่นเนื่องจากการสัมผัสกับสารทดสอบตลอดเวลา และเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้กรดเป็น pore fluid เมื่อเปรียบเทียบกับค่า pH ของดินบดอัดก่อนทำการทดสอบก็พบว่ามีเปลี่ยนแปลงของค่า pH น้อยมาก ทั้งที่ค่า pH เริ่มต้นของสารทดสอบสูงถึง 13 ก็ตาม ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ไม่มากก็เนื่องจากในดินมีสารไบคาร์บอเนตอยู่ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับสภาพความเป็นกรด-เบส หรือ buffering นั้นเอง

#### 4.7 ปริมาณคลอไรด์ในดินหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน

หลังจากทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) เป็น pore fluid แล้วเสร็จ ก็จะได้น้ำตัวอย่างดินในกระบอกเซลออกมามาตัดแบ่งเป็นส่วนๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของคลอไรด์ในดิน ซึ่งคลอไรด์ที่ทำการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของ soluble salt ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินที่แต่ละระดับความห่างจากกรด ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11

จากรูปที่ 4.11 ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดิน เทียบกับระยะห่างจากจุดที่สัมผัสกับกรดมีค่า ดังนี้คือ 16.5, 15.0, 13.5, 11.5, 12, และ 15.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะ 0.5, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, และ 7.5 ซม. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปริมาณคลอไรด์ในดินเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีคลอไรด์อยู่ในดินอยู่ แล้วประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 11.5 ถึง 16.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่คลอไรด์ในส่วนที่ เพิ่มขึ้นนี้เกิดขึ้นจากการแตกตัวของกรดไฮโดรคลอริก ดังสมการ:



จากสมการดังกล่าวซึ่งกรดไฮโดรคลอริกเริ่มต้น 0.1 โมลต่อลิตร เมื่อแตกตัวหมดจะมี ปริมาณคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) เท่ากับ 3,550 มิลลิกรัม ต่อ ลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของคลอไรด์ในดินนั้นถือว่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ จะเห็นว่าปริมาณคลอไรด์จะมีปริมาณมากที่สุดตรงบริเวณที่ตัวอย่างดินสัมผัสกับกรด และจะลดลง จนถึงส่วนกลางของตัวอย่างก็จะมีปริมาณของคลอไรด์เพิ่มขึ้นมาอีก เนื่องจากบริเวณส่วนปลายของ ตัวอย่างก็เป็นอีกจุดหนึ่งที่สัมผัสกับสารทดสอบก่อนจะออกจากกระบอกเซล

#### 4.8 ปริมาณสารไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินหลังการทดสอบ ความสามารถในการไหลซึมผ่าน

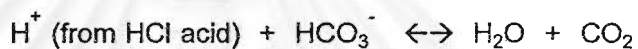
หลังจากทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินแล้วเสร็จ จะนำตัวอย่าง ดินมาทำการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาปริมาณสารไบคาร์บอเนตในดินที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำปฏิกิริยากับสารทดสอบที่ปล่อยให้มีการไหลซึมผ่านตัวอย่างดิน โดยจะแสดงผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในรูป ของปริมาณไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินตามระดับความลึกของตัวอย่าง

##### 4.8.1 ปริมาณไบคาร์บอเนตเมื่อทดสอบโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารทดสอบ

ปริมาณของไบคาร์บอเนตที่วิเคราะห์ได้ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งจากรูปพบว่า ปริมาณของไบคาร์บอเนตในดินมีปริมาณลดลง จากปริมาณเริ่มต้นก่อนที่จะทำการทดสอบ หาความสามารถในการไหลซึมผ่านซึ่งมีค่าเท่ากับ 64 milliequivalent ต่อดินแห้ง 100 กรัม ส่วนปริมาณไบคาร์บอเนตภายหลังจากทดสอบลดลงเหลือ 22, 26, 28, 34, 28 และ 34

milliequivalent ต่อดินแห้ง 100 กรัม ที่ระดับความลึกของตัวอย่างเท่ากับ 0.5, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, และ 7.5 ซม.ตามลำดับ

เมื่ออาศัยผลจากการวัดค่า pH ของ effluent ที่ไหลผ่านตัวอย่างดินออกมาขณะทำการทดสอบ ประกอบกับค่า pH ของตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน จัดได้ว่าตัวอย่างดินได้มีการ buffer กรดที่ใส่เข้าไปมากพอสมควร และกรณีที่ เป็นค่า pH ของตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย คือ ค่า pH ลดลงจากเริ่มต้นที่ 7.5 ถึง 8 ไปอยู่ที่ประมาณ 7-7.5 ทั้งนี้เนื่องจากสารไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ในดินทำหน้าที่เป็นตัวปรับสภาพ (buffering) ความ เป็นกรดและเบสให้อยู่ในสภาพสมดุล จึงน่าจะเชื่อได้ว่าตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบนี้มีสารไบคาร์บอเนตเป็นสารที่ทำหน้าที่ปรับสภาพความเป็นกรด-เบสอยู่ และปฏิกิริยาของการ buffer กรดเป็นไปดังสมการเคมี ดังนี้:



จากสมการปฏิกิริยาเคมีนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อกรดทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตในดินแล้วจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังทำปฏิกิริยา คือ น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเห็นว่าน้ำที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ความเข้มข้นของกรดลดลงได้ ค่า pH ของดินจึงไม่ลดลงไปมากนัก

#### 4.8.2 ปริมาณไบคาร์บอเนตเมื่อทดสอบโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อมีเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) เป็น pore fluid แล้วเสร็จ ได้นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาปริมาณสารไบคาร์บอเนตในดินเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ผลการแสดงไว้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจากรูปพบว่าปริมาณของไบคาร์บอเนตในดินมีปริมาณลดลงจาก ปริมาณเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน โดยที่ปริมาณไบคาร์บอเนตภายหลังการทดสอบลดลงเหลือ 32, 34, 43, 50, 47 และ 46 milliequivalent ต่อดินแห้ง 100 กรัม ที่ระดับความลึกของตัวอย่างเท่ากับ 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ซม. ตามลำดับ

การที่ปริมาณไบคาร์บอเนตในดินมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการทดสอบโดยใช้กรดนั้น น่าจะมาจากสาเหตุเดียวกัน และโดยอาศัยผลการวัดค่า pH ของ effluent ที่ไหลผ่านตัวอย่างดินออกมาขณะทำการทดสอบ และค่า pH ของตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้กรดทดสอบนั้น ก็จะเห็นว่าตัวอย่างดินได้มีการ buffer เบสที่ใส่เข้าไปได้เช่นกันเนื่องจากสารไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ซึ่งเป็นสารที่มีหน้าที่ในการปรับสภาพ (buffering) ทั้งกรดและเบส ให้อยู่ในสภาพสมดุล

#### 4.9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุภายหลังการทดสอบ โดยวิธี X-ray Fluorescence

ภายหลังทำการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของตัวอย่างดิน โดยทั้งที่ใช้กรดและเบสเป็นสารทดสอบแล้วเสร็จ ได้เก็บตัวอย่างดินที่ความลึกประมาณ 3 ซม. จากจุดที่สัมผัสกับสารทดสอบ ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่อยู่ในตัวอย่างดินนั้น โดยวิธี X-ray Fluorescence เช่นเดียวกับตอนก่อนเริ่มทำการทดสอบดังตารางที่ 4.2 ซึ่งปริมาณธาตุภายหลังการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 โดยจะนำผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุก่อนทำการทดสอบมาเปรียบเทียบด้วย

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างดินโดยวิธี X-ray Fluorescence ภายหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน

ตัวอย่างดิน	ปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก)				
	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{Cl}$
ก่อนทดสอบ	0.56	1.36	2.03	0.57	-
ทดสอบด้วย HCl	0.45	1.44	2.23	0.61	0.51
ทดสอบด้วย NaOH	0.94	1.57	2.04	0.65	-

หมายเหตุ: ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปของ Oxide ของธาตุนั้น

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่าปริมาณธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ได้แก่ โซเดียมและคลอไรด์ โดยที่ในการทดสอบโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารทดสอบนั้น ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินเพิ่มขึ้น จากที่ก่อนทำการทดสอบนั้นปริมาณที่วิเคราะห์ได้นั้นน้อยมากจนเครื่องมือทดสอบนี้ตรวจวัดไม่ได้ เพิ่มมาเป็น 0.51 % โดยน้ำหนัก ส่วนตัวอย่างดินที่ทดสอบโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารทดสอบนั้น จะเห็นว่าปริมาณธาตุโซเดียมเพิ่มขึ้นจากเดิมถึงเกือบเท่าตัว คือจาก 0.56 % เป็น 0.94 % โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณของธาตุอื่นๆที่วิเคราะห์ได้นั้น มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับธาตุคลอไรด์และโซเดียม ข้างต้น ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างดินที่ทดสอบมีการดูดซับสารที่ได้ไหลซึมผ่านไว้ในปริมาณหนึ่ง

#### 4.10 ผลการวัดค่า pH ของตัวอย่างดินที่ผสมสารทดสอบที่เป็นกรด และ เบส ( pH of soil mixture in Batch type test)

การทดสอบนี้เป็นการนำตัวอย่างดินมาผสมกับน้ำประปา กรด และ เบส ที่ปริมาณ moisture content ต่างๆกันแล้วนำตัวอย่างดิน (soil mixture) นั้นไปวัดค่า pH ที่เปลี่ยนไป ตามระยะเวลาหลังการผสม เพื่อยืนยันผลของการที่ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบมีความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรด และ เบส (buffering) ให้กลับมาจุดสมดุลหรือค่า pH เริ่มต้นของดิน

จากรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นผลการวัดค่า pH ของส่วนผสมระหว่าง ตัวอย่างดินและน้ำประปา ที่ปริมาณของน้ำประปา เท่ากับ 23% ซึ่งเป็นปริมาณที่เท่ากับค่า optimum moisture content ของตัวอย่างดินที่จะนำมาใช้ดัดเพื่อทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านและ การแพร่กระจายของสารทดสอบในดิน , นอกจากนั้นก็ทดสอบที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 33% และ 39% ตามลำดับ โดยระยะเวลาที่ทำการทดสอบใช้เวลาประมาณ 70 วัน

ผลการวัดค่า pH ที่ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากนั่นคือ ในช่วงวันที่เริ่มทำการผสมดินกับน้ำประปาแล้วนำตัวอย่างดินไปวัดค่า pH มีค่า ดังนี้คือ 7.54 , 7.66 , และ 7.72 สำหรับ ปริมาณน้ำที่ผสม 23% , 33% และ 39% ตามลำดับ นอกจากค่า pH ที่ใกล้เคียงกันแล้ว ค่า pH ของดินที่ระยะเวลาที่นำไปทดสอบต่างๆ ยังมีแนวโน้มที่มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันอีกด้วย กล่าวคือ มีการเพิ่มขึ้นของค่า pH เล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงที่ประมาณ 30 วัน ค่า pH จะลดลงเล็กน้อยและจะมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนถึงวันที่หยุดทำการวัด ซึ่งค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ค่า pH ตั้งแต่ 7.5 ถึง 8.0 เท่านั้น

นอกจากทำการวัดค่า pH ของส่วนผสมระหว่างดินกับน้ำประปาที่ปริมาณน้ำต่างกันแล้ว ยังได้ทำการวัดค่า pH ของตัวอย่างดินที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 23% ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่ใช้ บดอัดเพื่อทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านและการแพร่กระจายได้ของดิน เมื่อนำมาผสมกับ สารละลายกรดที่ปริมาณกรดต่างๆกัน และ สารละลายเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ที่ปริมาณเบส ต่างๆกันด้วย ซึ่งผลการวัดค่า pH ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และ 4.16

จากผลการวัดค่า pH ของส่วนผสมระหว่างดินที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 23% กับสารละลายกรด ดังรูปที่ 4.15 นั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรด ของดินได้อย่างชัดเจน คือจากการผสมดินกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีค่า pH เท่ากับ 1 เป็นปริมาณ 5%, 10%, และ 20% โดยน้ำหนักแห้งของดิน ที่วันแรกหลังจากทำการผสมดินกับกรด แล้วนำส่วนผสมดินกับกรดไปวัดค่า pH พบว่าค่า pH มีการเปลี่ยนแปลงลดลงตามปริมาณของกรดที่เพิ่มขึ้นดังนี้คือ ค่า pH เท่ากับ 7.29, 6.83, และ 6.32 ที่ปริมาณกรดเท่ากับ 5%, 10%, และ 20% ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า pH ของดินผสมน้ำประปาที่วันที่เริ่มต้น (pH เท่ากับ 7.50 ) เช่นเดียวกัน พบว่ามีค่า pH ลดลง และเมื่อนำตัวอย่างดินที่ประมาณ 18 วันหลังจากทำการผสมดินกับกรดมาวัดค่า pH อีกพบว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวันแรกที่ทำการวัด ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกับสารไบคาร์บอเนตในดินที่ทำให้ค่า pH ของดินผสมกรดนั้นก็กลับคืนสู่สภาวะเริ่มต้นก่อนการทดสอบ และค่า pH ของตัวอย่างทั้งสามปริมาณกรดที่ผสมกับดินนั้น ที่เวลาเพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มจะคงที่จนถึงวันที่ 45 ซึ่งเป็นวันที่หยุดทดสอบวัดค่า pH ของดิน

จากรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นผลการวัดค่า pH ของส่วนผสมระหว่างดินที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 23% กับสารละลายเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ซึ่งเป็นอีกการทดสอบหนึ่ง que แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดและเบส (buffering) ของดินที่นำมาใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน คือจากการผสมดินกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH เท่ากับ 13 เป็นปริมาณ 5%, 10%, และ 20% โดยน้ำหนักแห้งของดิน เช่นเดียวกับการทดลองผสมดินกับสารละลายกรด ผลการวัดค่า pH ที่วันแรกหลังจากทำการผสมดินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำส่วนผสมดินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปวัดค่า pH พบว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นดังนี้คือ ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 8.22, 8.43, และ 8.85 ที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5%, 10%, และ 20% ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า pH ของดินผสมน้ำประปาที่วันที่เริ่มต้น (pH เท่ากับ 7.50 ) เช่นเดียวกัน พบว่ามีค่า pH เพิ่มขึ้น และเมื่อนำตัวอย่างดินที่ประมาณ 18 วันหลังจากทำการผสมดินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการวัดค่า pH อีกพบว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวันแรกที่ทำการวัด ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารไบคาร์บอเนตในดินที่ทำให้ค่า pH ของดินผสมโซเดียมไฮดรอก



ไซต์นี้กลับคืนสู่สภาวะเริ่มต้นก่อนการทดสอบ และค่า pH ของตัวอย่างทั้งสามปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผสมกับดินนั้น ที่เวลาเพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มจะคงที่จนถึงวันที่ 45 ซึ่งเป็นวันที่หยุดทดสอบวัดค่า pH ของดิน

#### 4.11 ผลการทดสอบการแพร่กระจายของดินโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็น pore fluid

การทดสอบนี้จะทำการทดสอบโดยการปล่อยให้สารทดสอบไหลผ่านตัวอย่างดินภายใน column box จากฝั่งที่ติดกับแหล่งกำเนิด (source) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงไหลไปยังอีกฝั่งซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่าซึ่งในที่นี้เป็นน้ำกลั่น แล้วนำตัวอย่างดินที่ทดสอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ กันในแต่ละ column box มาตัดแบ่งออกเป็นส่วนๆ เพื่อมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ซึ่งแตกตัวออกจากกรดไฮโดรคลอริก โดยจะพิจารณาปริมาณคลอไรด์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน และที่ระยะทางตามความยาวของ column box ซึ่งในการทดสอบนี้ตัวอย่างดินที่ถูกบรรจุอยู่ใน column box มีความยาวประมาณ 15 ซม. ซึ่งผลการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในดินนี้จะได้นำไปคำนวณหาค่า Diffusion Coefficient ต่อไป นอกจากการนำตัวอย่างดินมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์แล้ว ยังได้นำตัวอย่างดินมาทำการวัดค่า pH เพื่อศึกษาความสามารถในการปรับสภาพกรด (buffering) ของตัวอย่างดินนี้โดยสารไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในตัวอย่างดิน ซึ่งผลการวิเคราะห์เกี่ยวกับการแพร่กระจายของดินมีดังนี้

##### 4.11.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ

ภายหลังการทดสอบที่เวลาต่าง ๆ จะทำการเก็บตัวอย่างดินที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในดิน โดยการตัดแบ่งตัวอย่างดินในแต่ละ Column box ออกเป็น 5 ส่วน ซึ่งจะได้ตัวอย่างดินขนาด กว้าง x ยาว x หนา ประมาณ 4 x 4 x 2.5 ซม. โดยที่ตัวอย่างดินแต่ละส่วนที่เก็บมานั้น จะนำไปหาปริมาณความชื้นในดิน (Moisture content) ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการทดสอบ และอีกส่วนมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ ซึ่งเป็นการหาปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในรูปของ soluble salt เช่นเดียวกับกรทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน ผลการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ และที่ระยะทางตามความยาวของ column box แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ระยะเวลาทดสอบต่างกัน ได้แก่ที่ 10, 17, 30 และ 60 วันหลังจากเริ่มปล่อยสารทดสอบเข้าสู่ตัวอย่างดินตามลำดับ โดยนำตัวอย่างดินที่แต่ละหน้าตัดคือที่ระยะ 1, 4.5, 8, 11.5, และ 14 ซม. มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ พบว่าในระยะแรกหลังจากปล่อยสารทดสอบเข้าสู่ตัวอย่างดิน คือช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงวันที่ 30 ปริมาณคลอไรด์ในดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (พิจารณาตัวอย่างดินที่ระยะ 1 ซม.จากแหล่งกำเนิด) และเมื่อระยะเวลาที่ 60 วันหลังการเริ่มทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในตัวอย่างดิน เริ่มคงที่

ส่วนรูปที่ 4.18 เป็นรูปที่แสดงถึงปริมาณคลอไรด์ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดของตัวอย่างดินภายหลังจากการทดสอบที่เวลาต่างๆแล้วเสร็จ ซึ่งปริมาณคลอไรด์จะมีปริมาณสูงที่ระยะที่ใกล้กับแหล่งกำเนิด และจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้น และปริมาณคลอไรด์ที่ระยะๆ หนึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทำการทดสอบเพิ่มมากขึ้นด้วย

#### 4.11.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินภายหลังจากการทดสอบ

ปริมาณไบคาร์บอเนตที่ทำการวิเคราะห์ได้หลังการทดสอบการแพร่กระจายของดิน โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารทดสอบ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าปริมาณไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินมีปริมาณลดลง (จากปริมาณไบคาร์บอเนตในดินเริ่มต้นเท่ากับ 64 milliequivalent ต่อน้ำหนักดินแห้ง 100 กรัม) เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างประจุไฮโดรเจน ( $H^+$ ) จากกรดกับไบคาร์บอเนตในดิน โดยที่ปริมาณไบคาร์บอเนตจะลดลงมากในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 30 วันหลังทำการปล่อยให้สารทดสอบแพร่กระจายเข้าสู่ตัวอย่างดิน โดยเฉพาะตัวอย่างดินที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดและเมื่อผ่านระยะ 30 วันนี้ไปแล้ว ปริมาณไบคาร์บอเนตที่อยู่ในตัวอย่างดินจะค่อนข้างคงที่

#### 4.11.3 ผลการวัดค่า pH ของตัวอย่างดินที่เวลาทดสอบต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงถึงค่า pH ของตัวอย่างดินหลังจากปล่อยให้สารทดสอบ (ในการทดลองนี้เป็นกรดไฮโดรคลอริก) แพร่เข้าสู่ตัวอย่างดินที่เวลาต่างกัน ได้แก่ 10, 17, 30 และ 60 วันตามลำดับ จากรูป เมื่อพิจารณาที่จุดที่ตัวอย่างดินมีการสัมผัสกับสารทดสอบ นั่นคือที่ 1 ซม. ห่างจากจุดที่ปล่อยสารทดสอบ ที่ระยะเวลา 10 วันหลังการทดสอบพบว่าค่า pH ของดินจะลดลงมาเหลือ 6.8 ซึ่งค่า pH ของดินเริ่มต้นนี้ประมาณ 7.5-8.0 แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ เป็น 17, 30, และ 60 วันตามลำดับ ค่า pH ของตัวอย่างดินที่ระยะห่างเดียว

กันจะสูงขึ้น ซึ่งการที่ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกับไบคาร์บอเนตในดินดังจะเห็นได้จากปริมาณไบคาร์บอเนตที่ลดลงในรูปที่ 4.19 ซึ่งที่ระยะเวลามากขึ้นการทำปฏิกิริยาก็มากขึ้น ปริมาณของไบคาร์บอเนตก็ลดลงตามไปด้วย และที่ระยะห่างจากสารทดสอบมากขึ้น ค่า pH ของดินก็จะสูงขึ้นตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสุดท้าย (14 ซม.) ซึ่งเป็นจุดที่ตัวอย่างดินสัมผัสกับน้ำกลั่น และ ณ จุดสุดท้ายนี้จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า pH มีไม่มากนัก

#### 4.11.4 ความเข้มข้นของสารทดสอบที่ระยะเวลาทดสอบมากขึ้น

ทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่างดินที่ทดสอบการแพร่กระจายของสารมาทดสอบต่างๆ ได้นำตัวอย่างของสารทดสอบใน Feed Tank มาวัดค่า pH เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งผลการวัดค่า pH ของสารทดสอบซึ่งในที่นี้เป็นกรดไฮโดรคลอริกเมื่อเวลาผ่านไปแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของสารทดสอบนั้นน้อยมากคือ จาก pH เริ่มต้นที่เท่ากับ 0.99 เพิ่มขึ้นมาจนถึง 1.04, 1.06, 1.07 และ 1.08 ที่ 10, 17, 30 และ 60 วันตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของสารทดสอบที่ใช้เมื่อเทียบกับตัวอย่างดินมีมากกว่า ซึ่งอาจถือได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารทดสอบที่เกิดขึ้นน้อยมาก

ตารางที่ 4.4 ค่า pH ของสารทดสอบใน Feed Tank ที่เวลาต่างๆ

สารทดสอบ	ค่า pH (pH เริ่มต้น = 0.99)			
	10 วัน	17 วัน	30 วัน	60 วัน
กรด	1.04	1.06	1.07	1.08

#### 4.11.5 ปริมาณความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทดสอบมากขึ้น

เพื่อเป็นการยืนยันว่ามีการแพร่กระจายของสารทดสอบเข้าสู่ตัวอย่างดินมากขึ้น สามารถดูได้จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดสอบมากขึ้น โดยที่รูปที่ 4.21 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบการแพร่กระจายที่ระยะเวลาทดสอบต่างๆกัน ได้แก่ 10, 17, 30 และ 60 วันตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาที่จุดที่ตัวอย่างดินมีการสัมผัสกับสารทดสอบนั้นเมื่อ

ระยะเวลาที่ทำการทดสอบมากขึ้นปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินก็เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นในส่วนที่สัมผัสกับน้ำกลั่นนั้น น่าจะเกิดจากการแพร่กระจายของน้ำกลั่นนั้นเข้าสู่ตัวอย่างดินด้วย

#### 4.12 ผลการวัดค่า pH ของดินใน column box โดยมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น pore fluid

การทดสอบนี้จะทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อ 4.11 โดยการปล่อยให้สารทดสอบไหลผ่านตัวอย่างดินภายใน Column box จากฝั่งที่ติดกับแหล่งกำเนิด (source) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงไหลไปยังอีกฝั่งซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่าซึ่งในที่นี้เป็นน้ำกลั่น โดยการทดสอบโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์นี้จะนำตัวอย่างดินที่ทดสอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ กันมาทำการวัดค่า pH เพื่อยืนยันความสามารถในการปรับสภาพ (buffering) ของตัวอย่างดินนี้โดยสารไบคาร์บอเนตที่มีอยู่ในตัวอย่างดิน ผลการวัดค่า pH ของตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งแสดงถึงค่า pH ของตัวอย่างดินหลังจากปล่อยให้สารแพร่เข้าสู่ตัวอย่างดินที่เวลาต่างกันได้แก่ 10, 17, 30 และ 60 วันตามลำดับเช่นเดียวกับที่ทดสอบโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจากรูป เมื่อพิจารณาที่จุดที่ตัวอย่างดินมีการสัมผัสกับสารทดสอบมากที่สุด นั่นคือที่ 1 ซม. ห่างจากจุดที่ปล่อยสารทดสอบ ที่ระยะเวลา 10 วันหลังการทดสอบพบว่าค่า pH ของดินจะเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย คือจากค่า pH ของดินเริ่มต้นนี้ประมาณ 7.5-7.8 เพิ่มขึ้นมาเป็น 8.05 ทั้งที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารทดสอบมีค่า pH สูงถึง 13 และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นคือ เป็น 17, 30, และ 60 วันตามลำดับ ค่า pH ของตัวอย่างดินที่ระยะห่างเดียวกันก็จะเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนั้นก็ยังอยู่ในช่วงของค่า pH เดิมของดินก่อนทำการทดสอบ

เมื่อพิจารณาค่า pH ของดินที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากสารทดสอบดังรูปที่ 4.22 พบว่าค่า pH ของดินที่สัมผัสกับสารมากที่สุดจะมีค่า pH สูงกว่าจุดที่อยู่ห่างออกมาจนถึงจุดที่ตัวอย่างดินสัมผัสกับน้ำกลั่น ซึ่งจุดนี้จะมีค่า pH ต่ำที่สุด แต่ก็ไม่เปลี่ยนแปลงจากค่า pH ของดินก่อนทำการทดสอบมากนัก

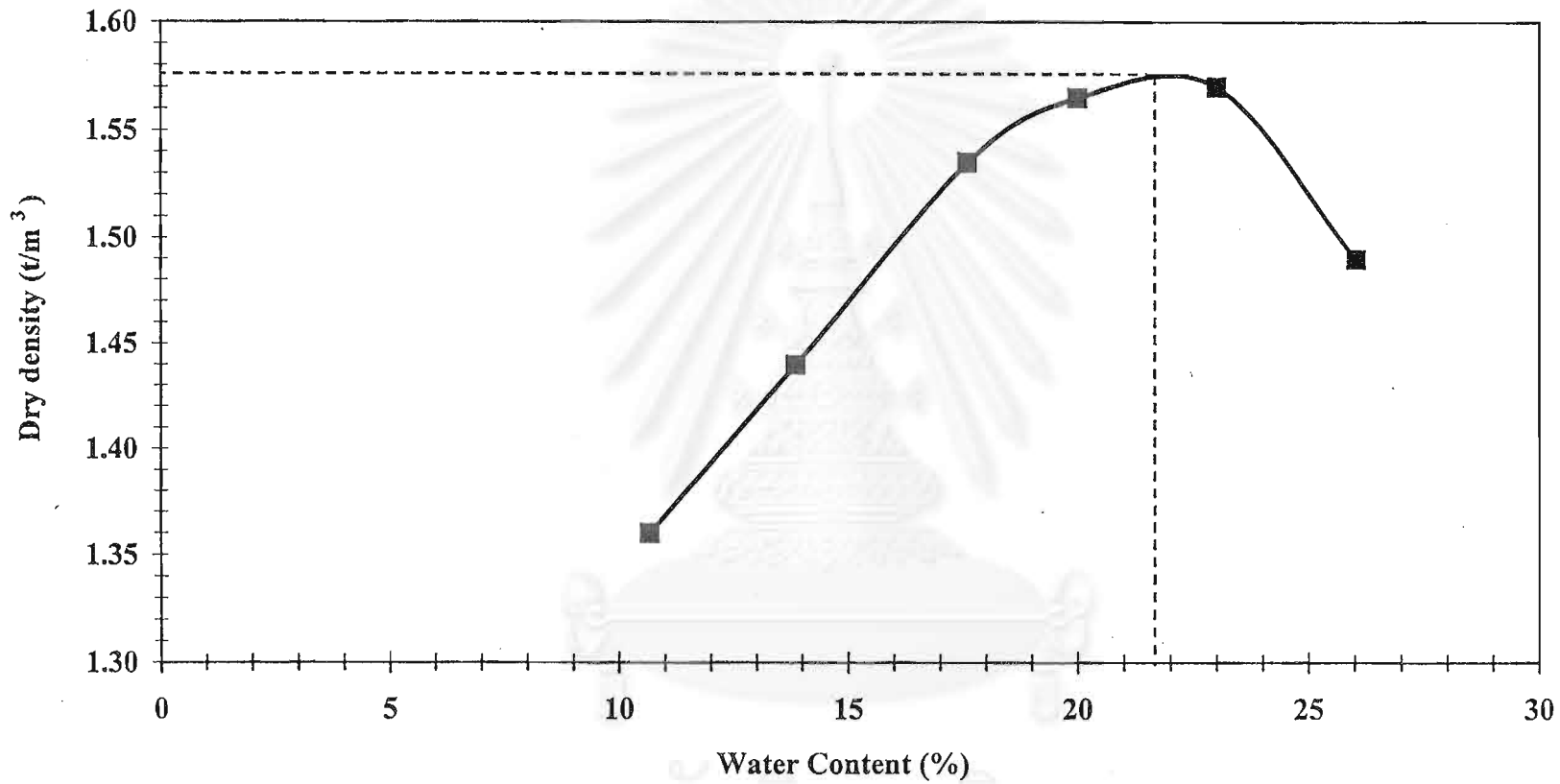
และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารทดสอบใน Feed tank ซึ่งในที่นี้เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น ซึ่งจะทำการวัดขณะที่เก็บตัวอย่างดินที่เวลาต่าง ๆ ไปทดสอบหรือวิเคราะห์ทางเคมี ค่า pH ของสารทดสอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ นี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ซึ่งจากผลการวัดค่า

pH ของสารทดสอบนี้จะเห็นได้ว่า ค่า pH ที่ระยะเวลาต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบโดยใช้กรด เนื่องจากปริมาณสารทดสอบนั้นมากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณตัวอย่างดินที่ทดสอบ

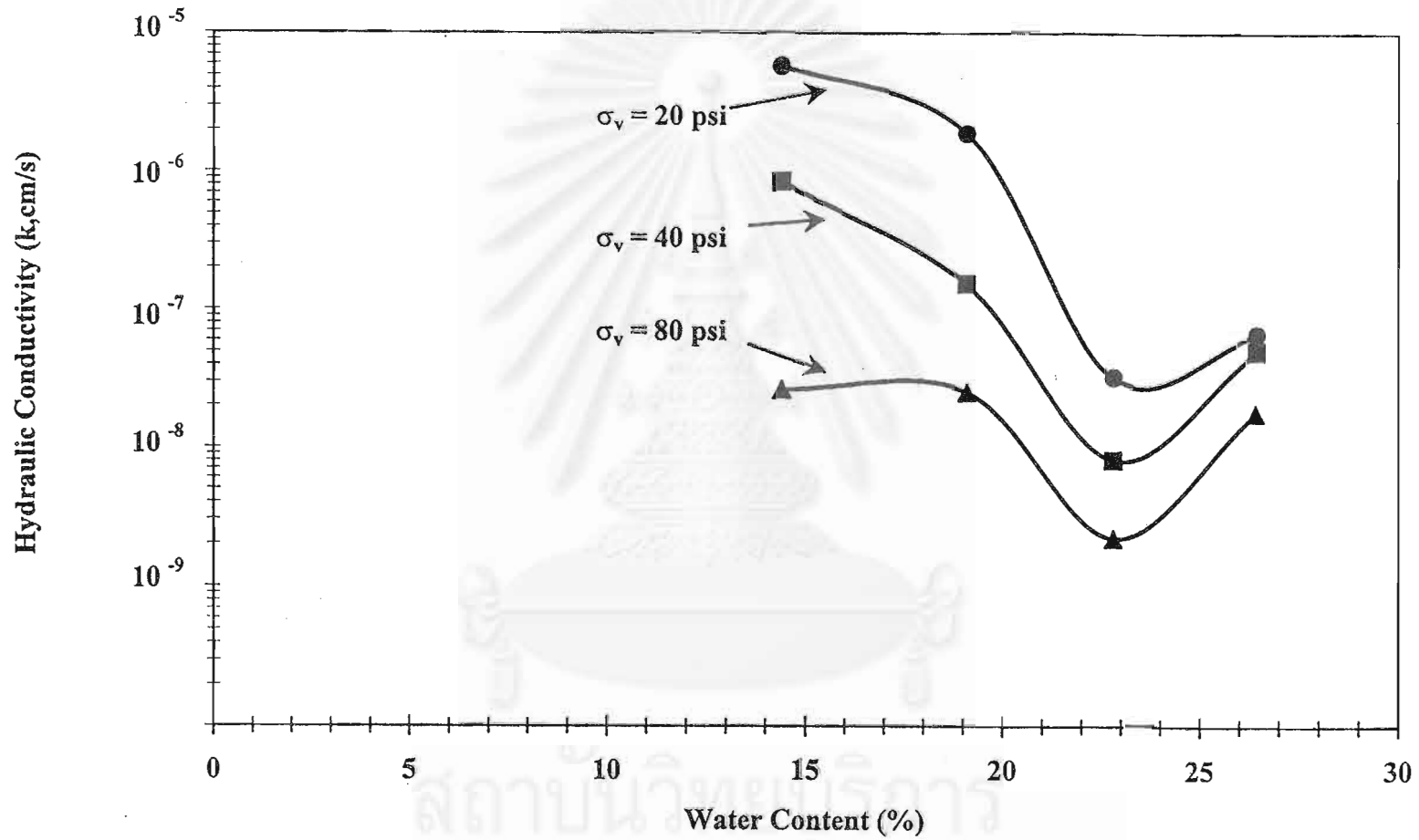
ตารางที่ 4.5 ค่า pH ของสารทดสอบที่เวลาต่างๆ

สารทดสอบ	ค่า pH (pH เริ่มต้น = 12.95)			
	10 วัน	17 วัน	30 วัน	60 วัน
เบส	12.90	12.75	12.70	12.65

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

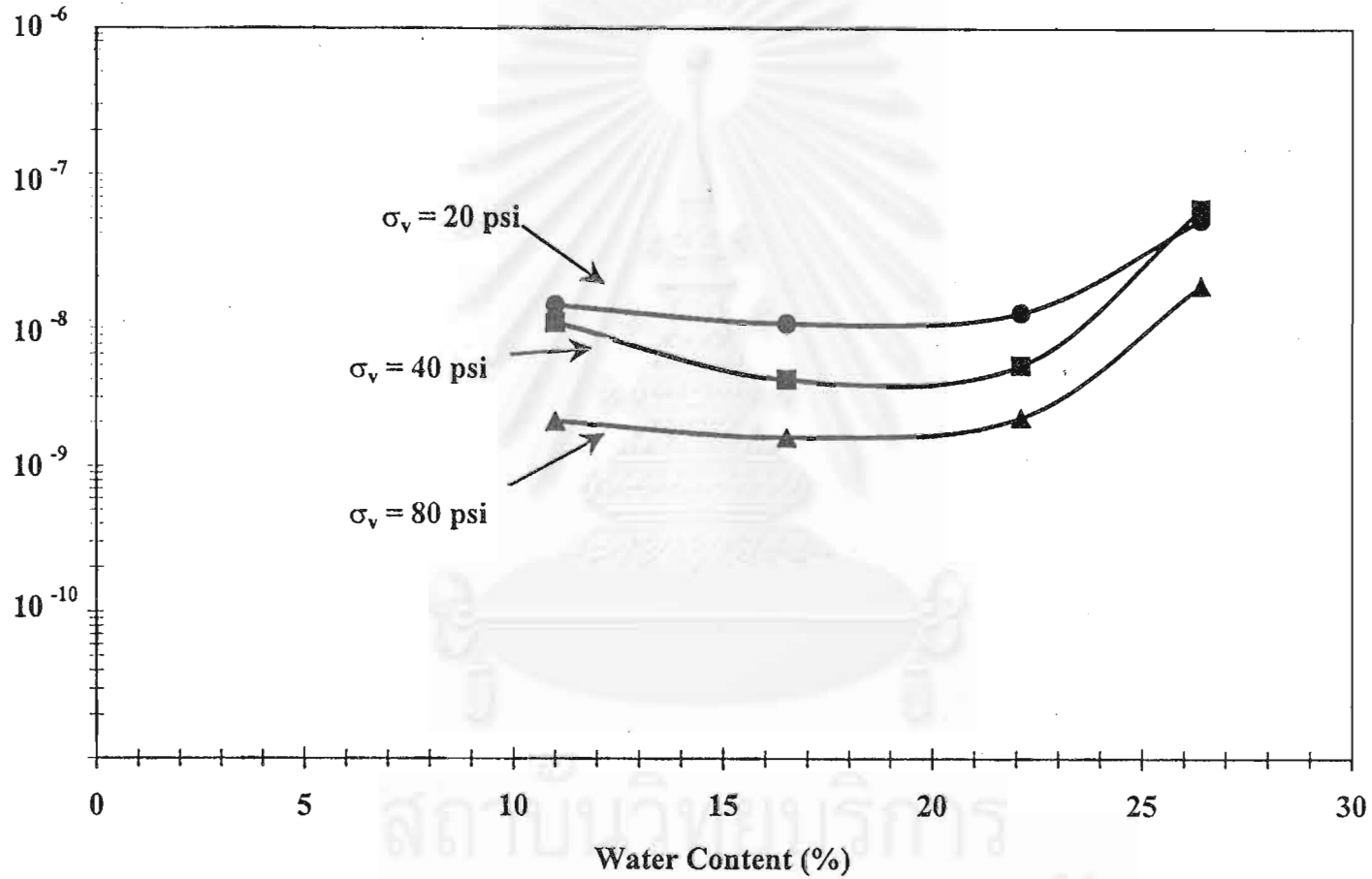


รูปที่ 4.1 : ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างดินทดสอบ



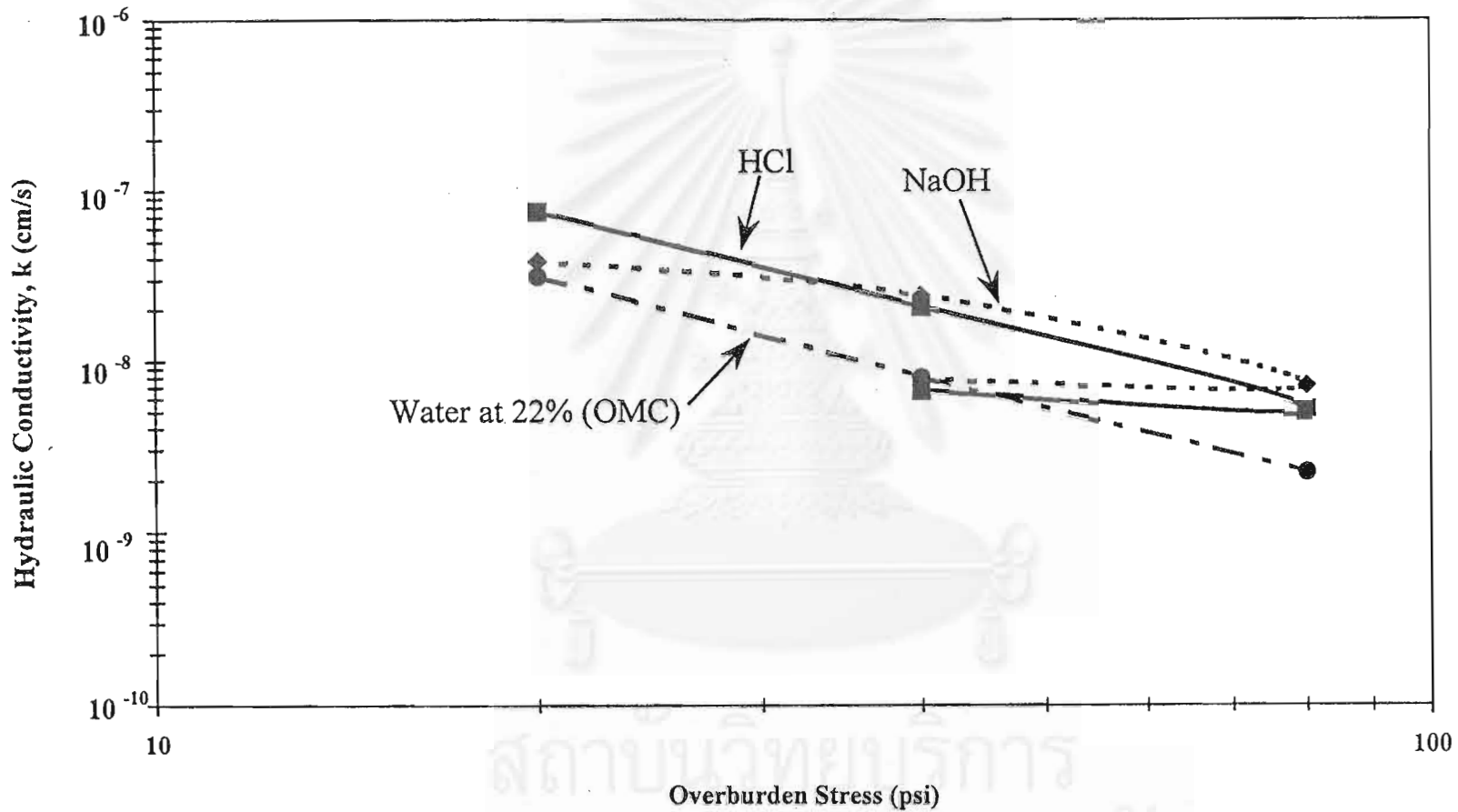
รูปที่ 4.2 : ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจากการทดสอบแบบ Rigid Boundary โดยใช้ น้ำประปาเป็น pore fluid

Hydraulic Conductivity ( $k, \text{cm/s}$ )

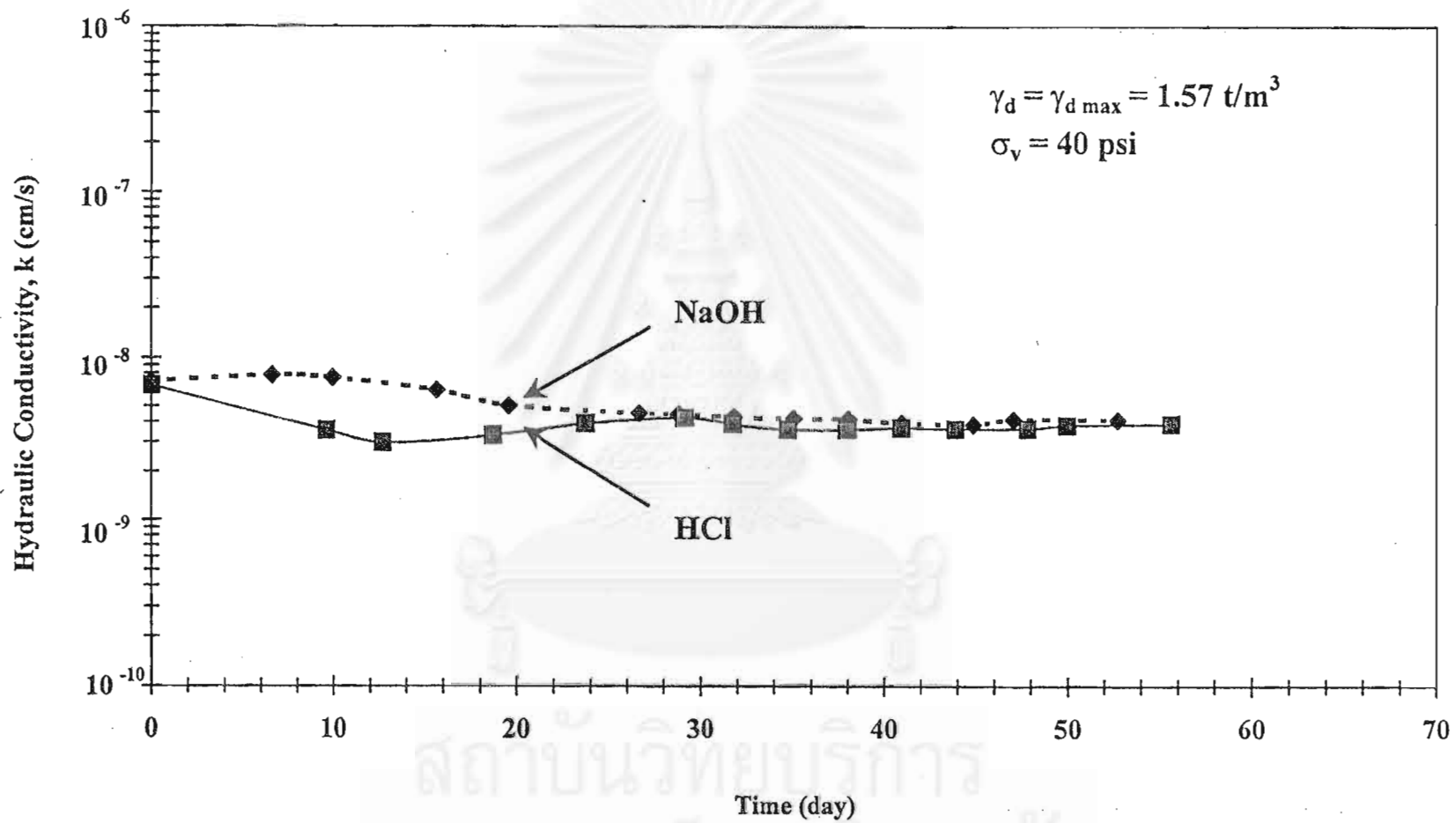


รูปที่ 4.3 : ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจากการทดสอบแบบ Flexible Boundary โดยใช้ น้ำประปาเป็น pore fluid

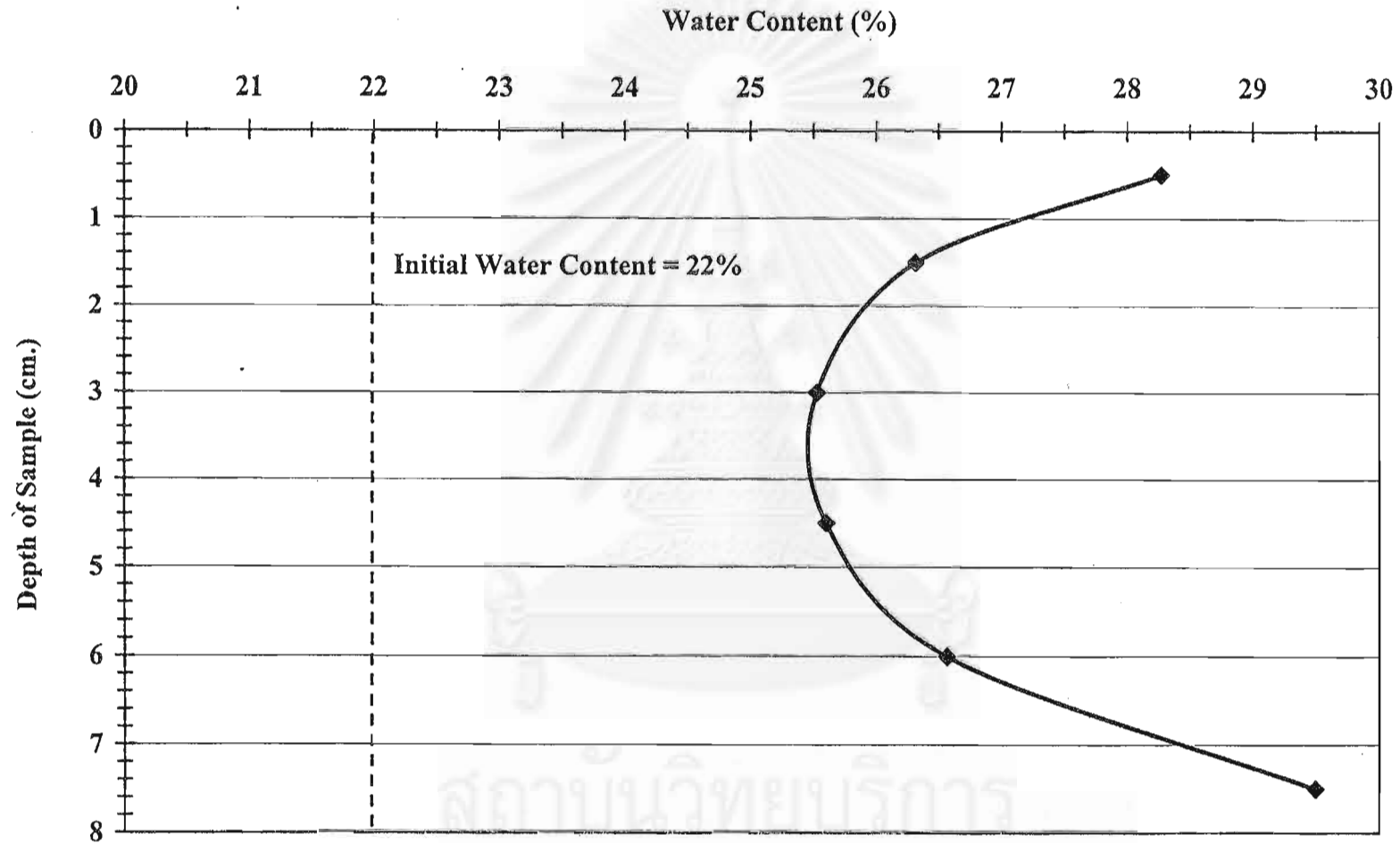




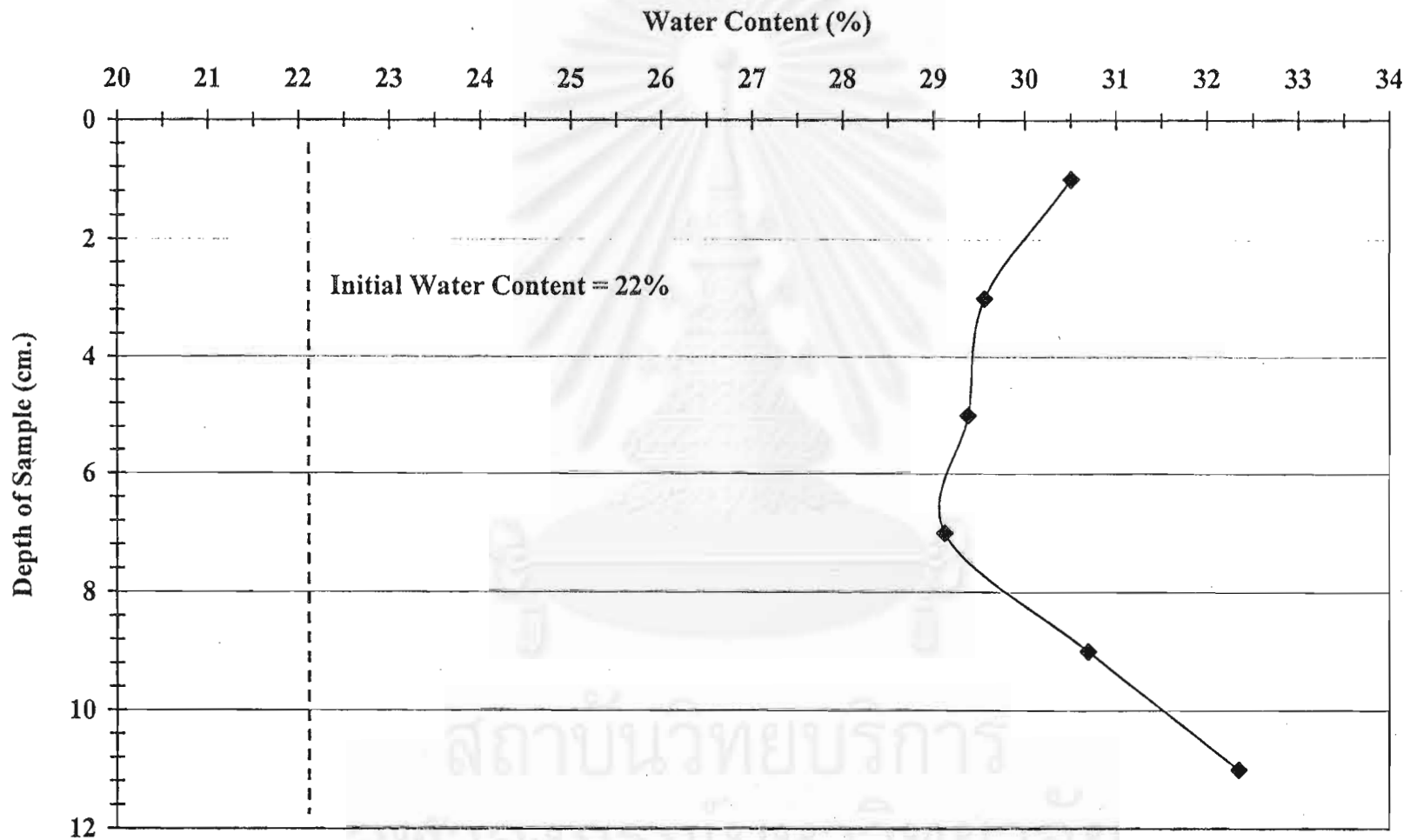
รูปที่ 4.4 : ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเนื่องจากผลของความตันทัดทับในแนวดิ่ง



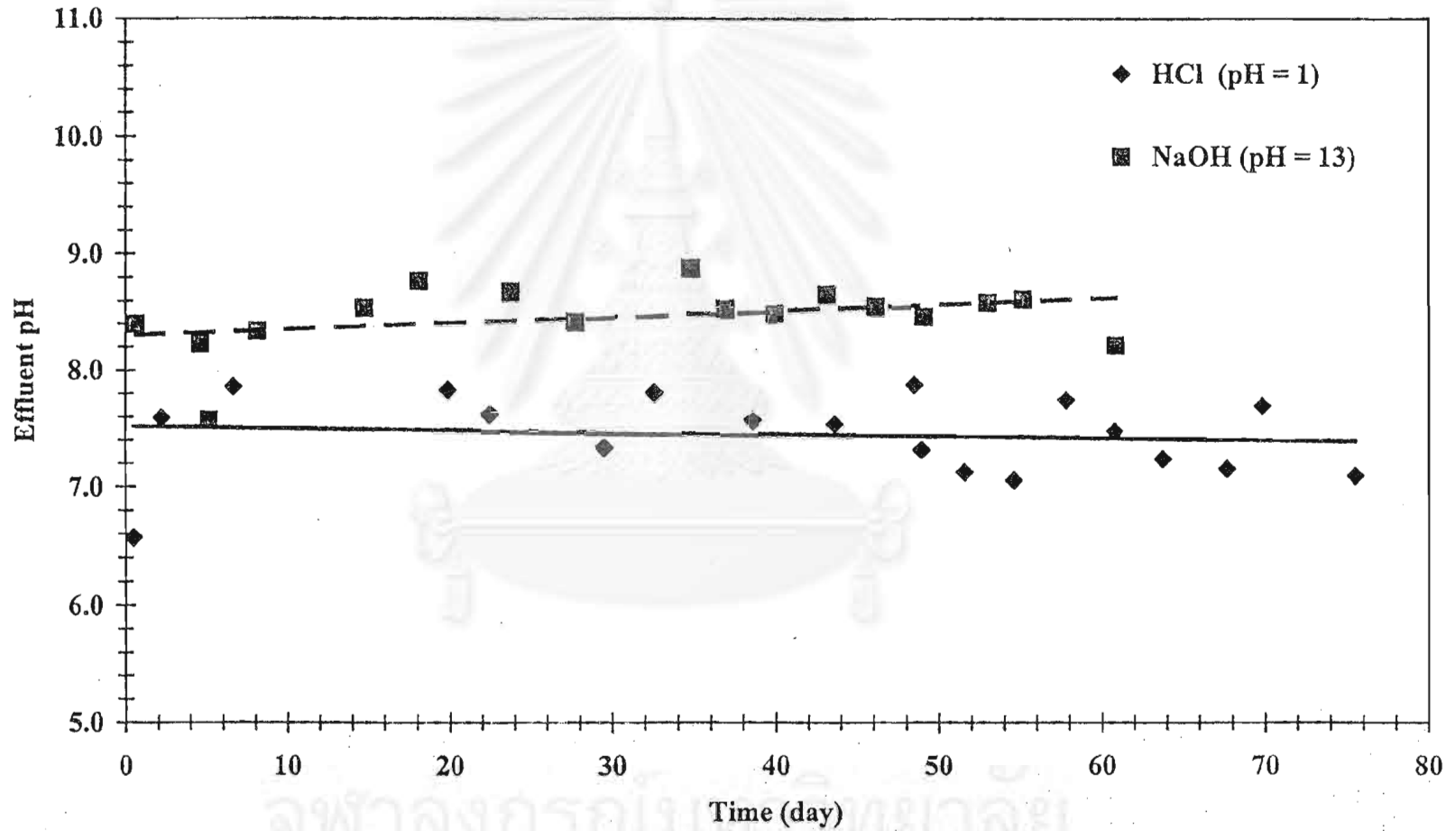
รูปที่ 4.5 : ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเมื่อเทียบกับเวลา



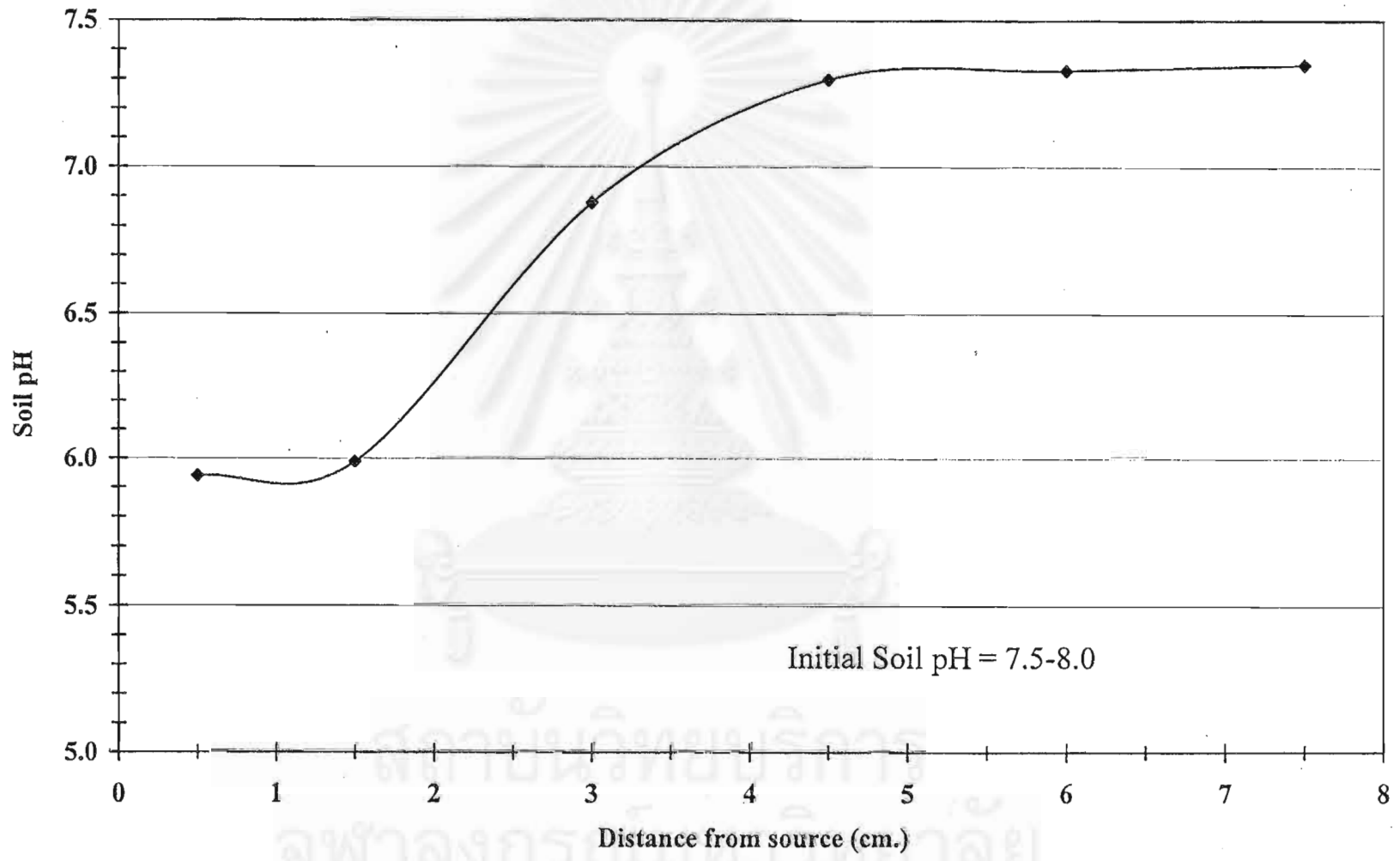
รูปที่ 4.6 : ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินเมื่อทดสอบโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ



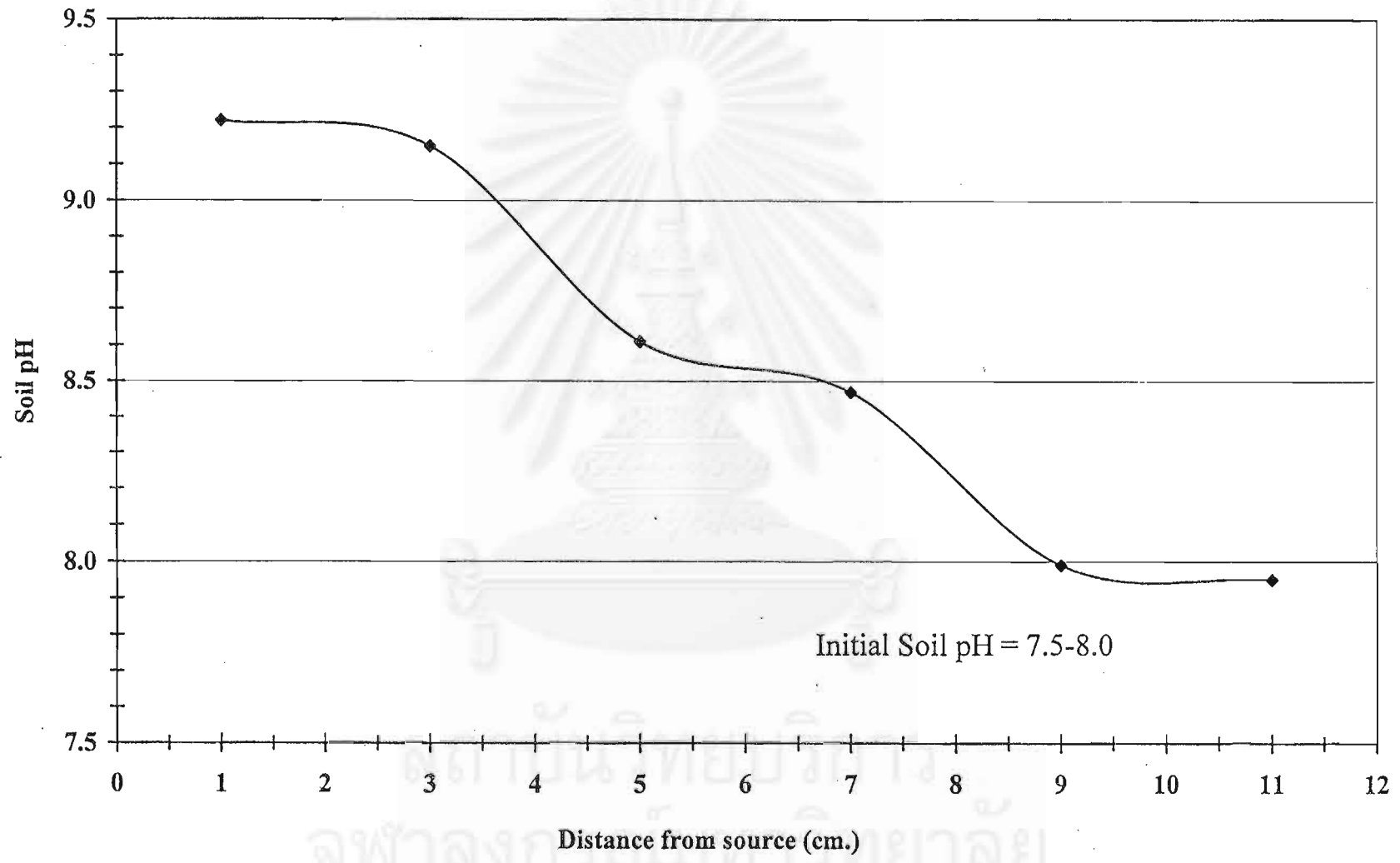
รูปที่ 4.7 : ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินเมื่อทดสอบโดยใช้เบสเป็นสารทดสอบ



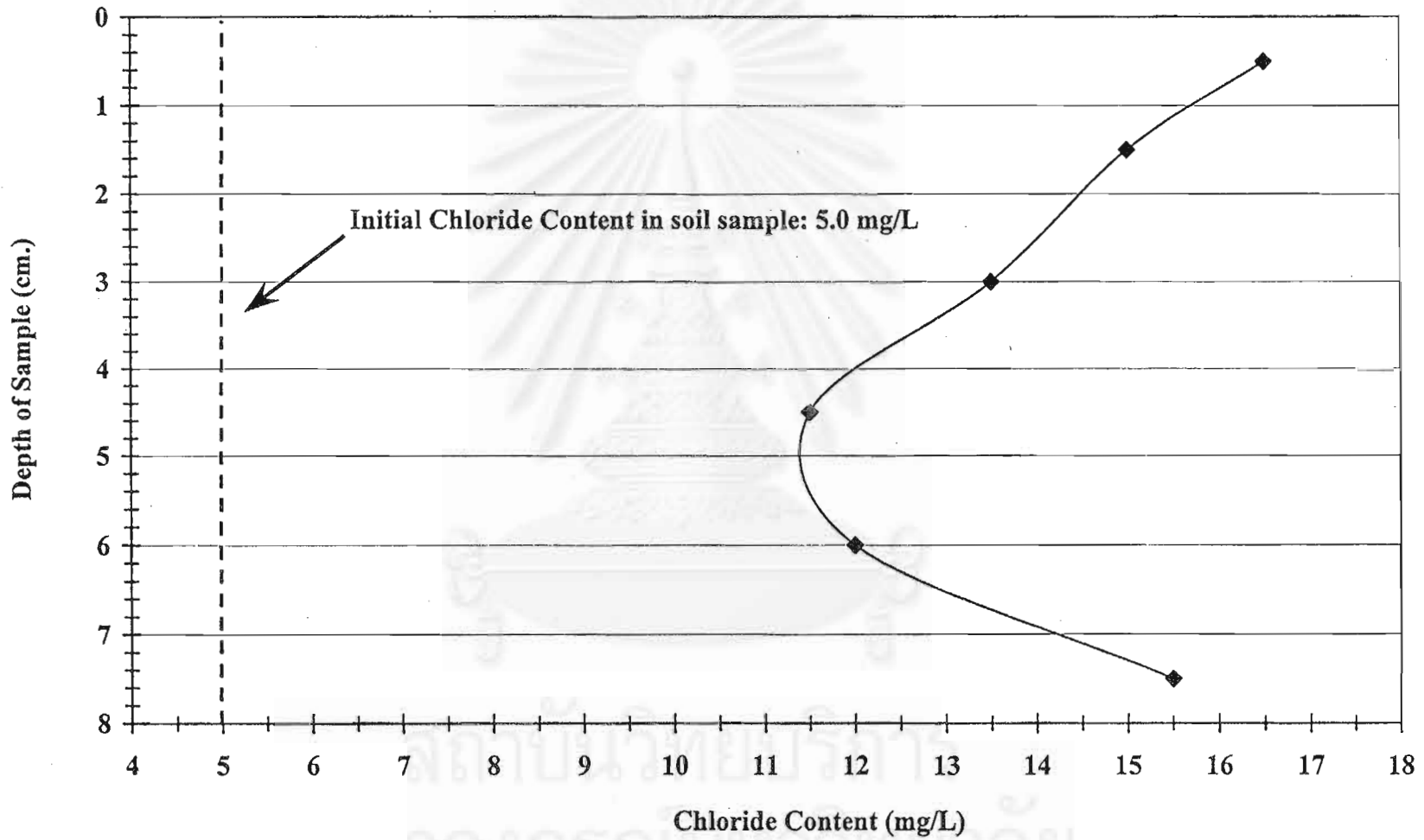
รูปที่ 4.8 : ค่า pH ของสารทดสอบหลังจากผ่านตัวอย่างดินเมื่อเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.9 : ค่า pH ของดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ

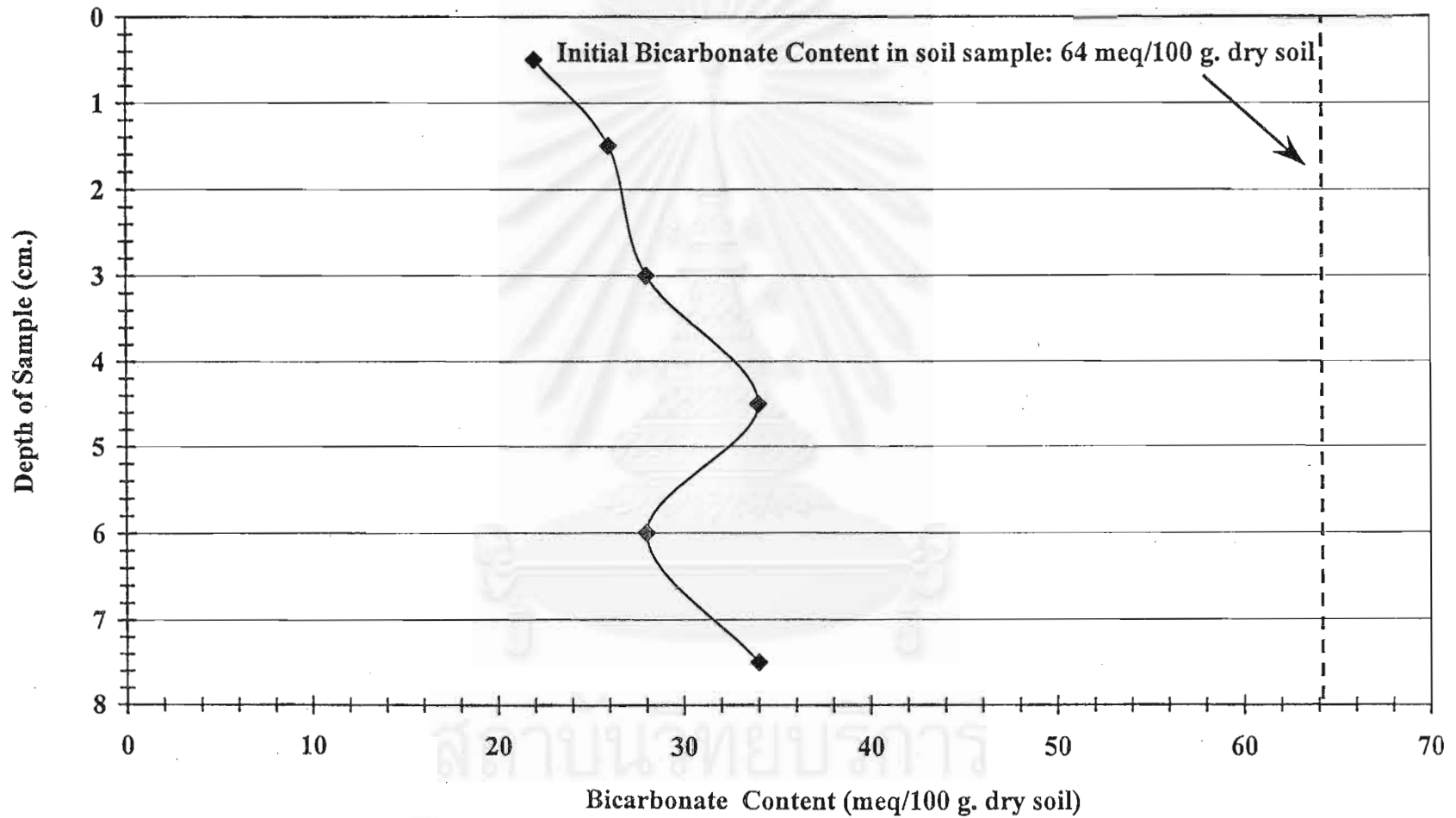


รูปที่ 4.10 : ค่า pH ของดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้เบสเป็นสารทดสอบ

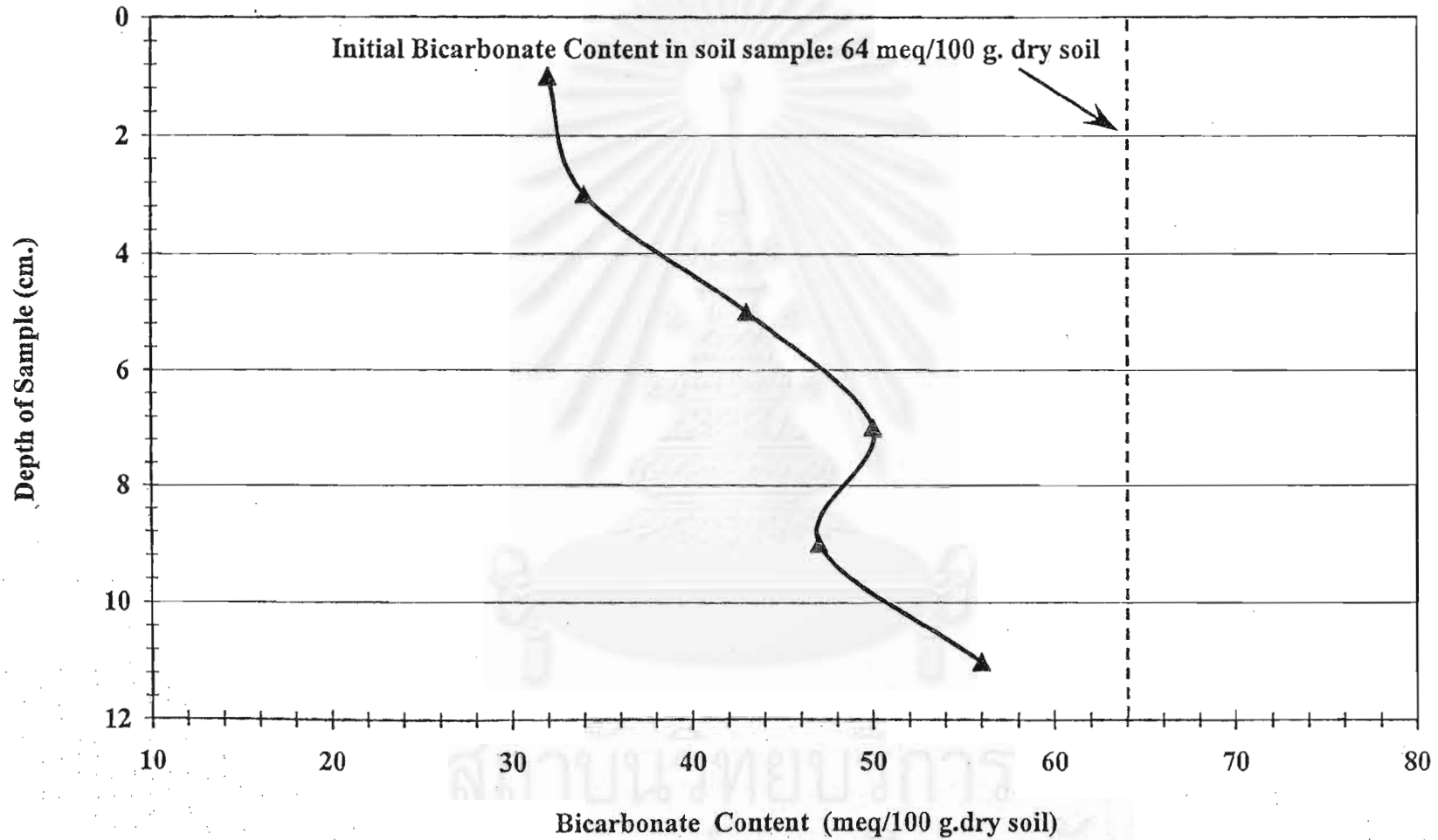


รูปที่ 4.11 : ปริมาณคลอไรด์ในดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ

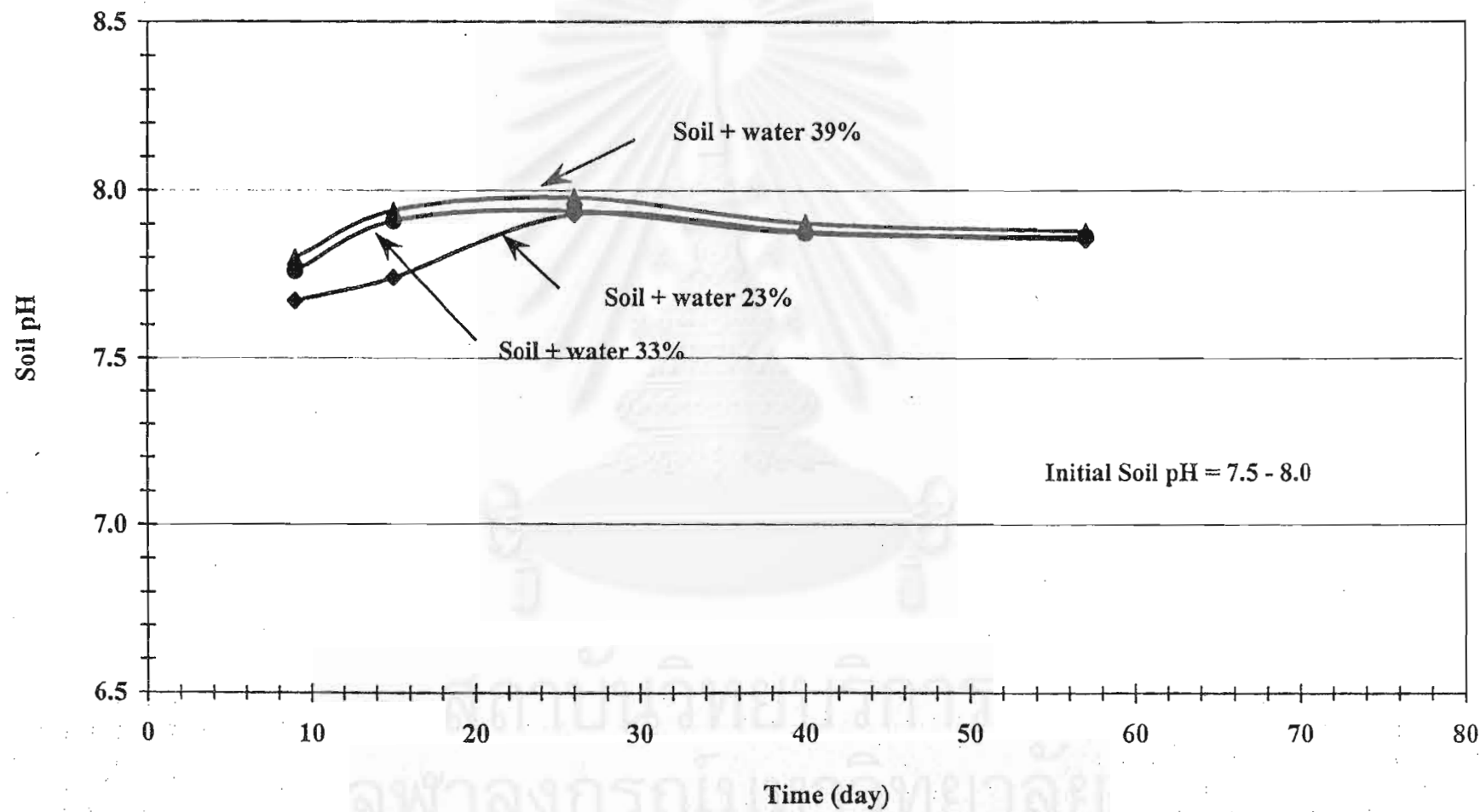




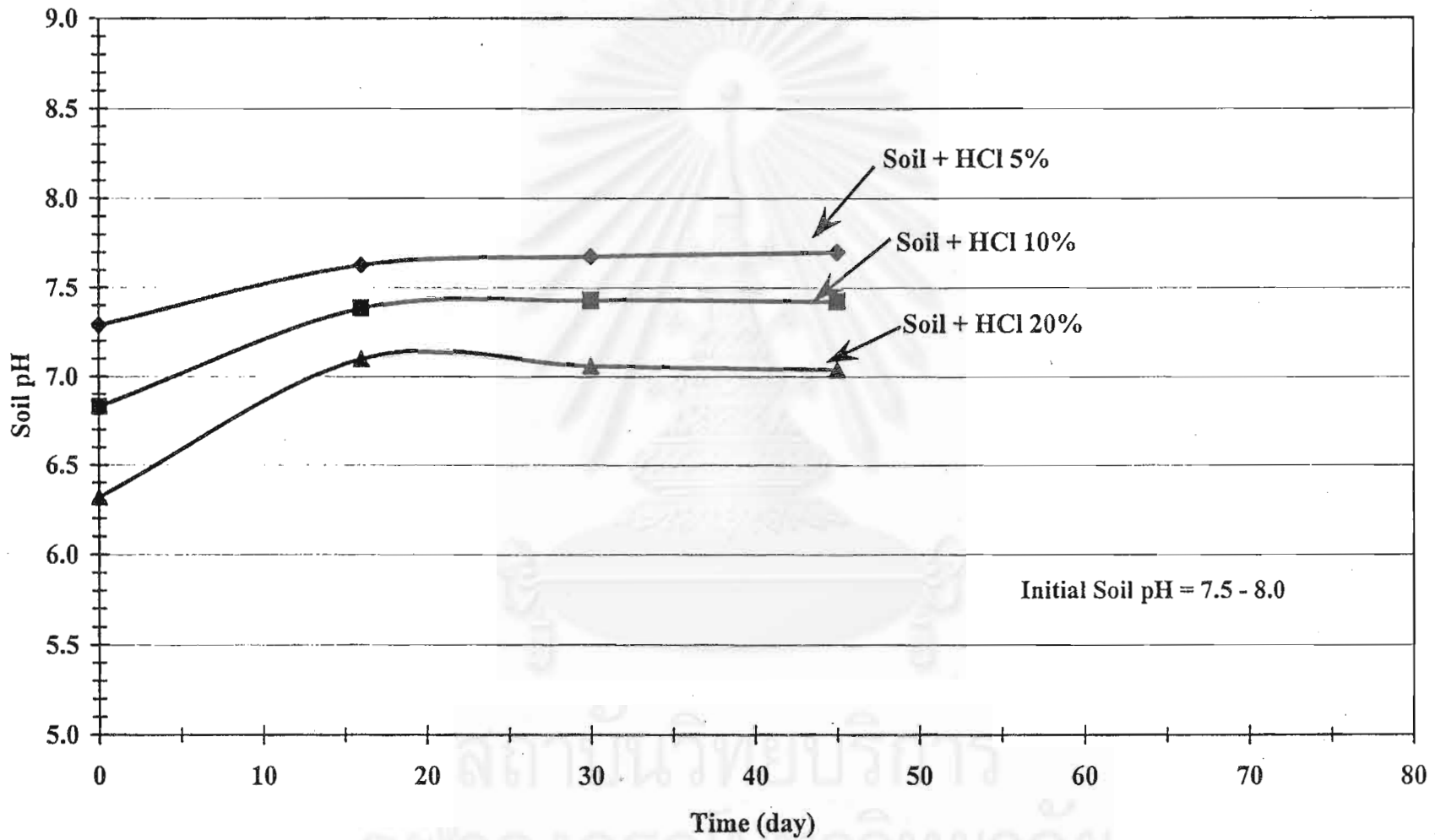
รูปที่ 4.12 : ปริมาณไบคาร์บอเนตในดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้กรดเป็นสาร



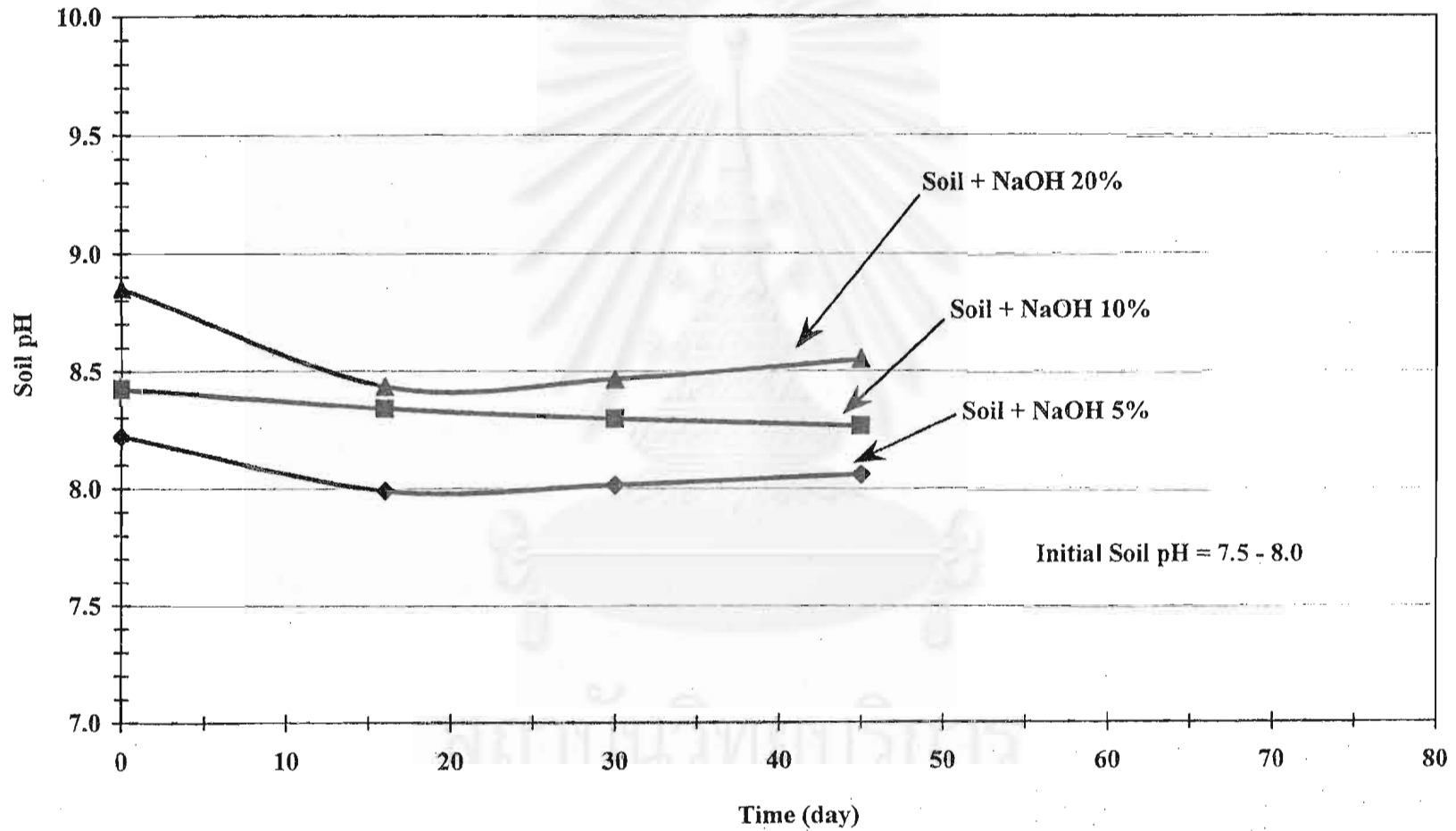
รูปที่ 4.13 : ปริมาณไบคาร์บอเนตในดินหลังจากทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้เบสเป็นสาร



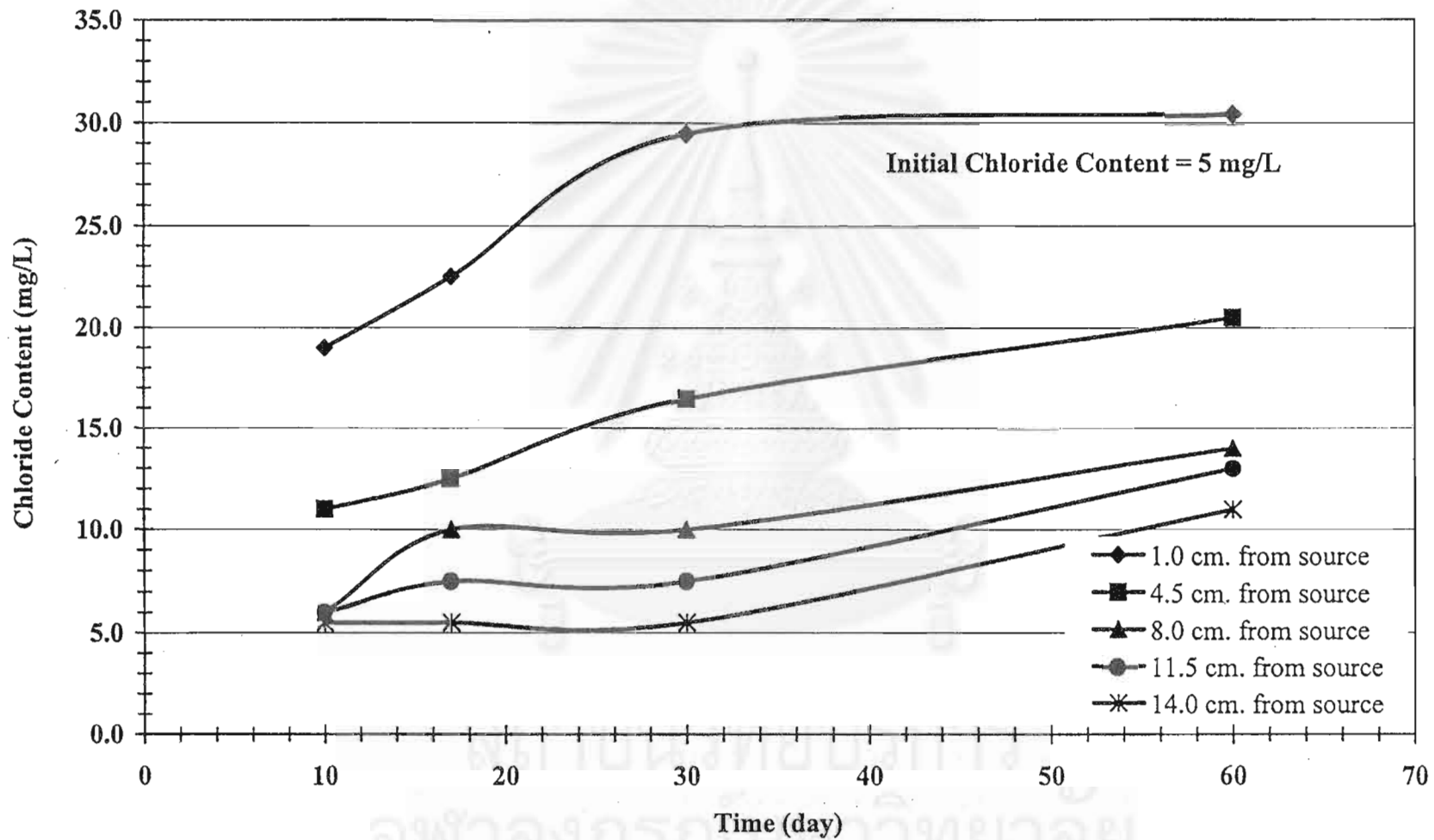
รูปที่ 4.14 ค่า pH ของตัวอย่างดินผสมน้ำที่ปริมาณ moisture content ต่าง ๆ กัน โดยไม่ผ่านขั้นตอนการบดอัด



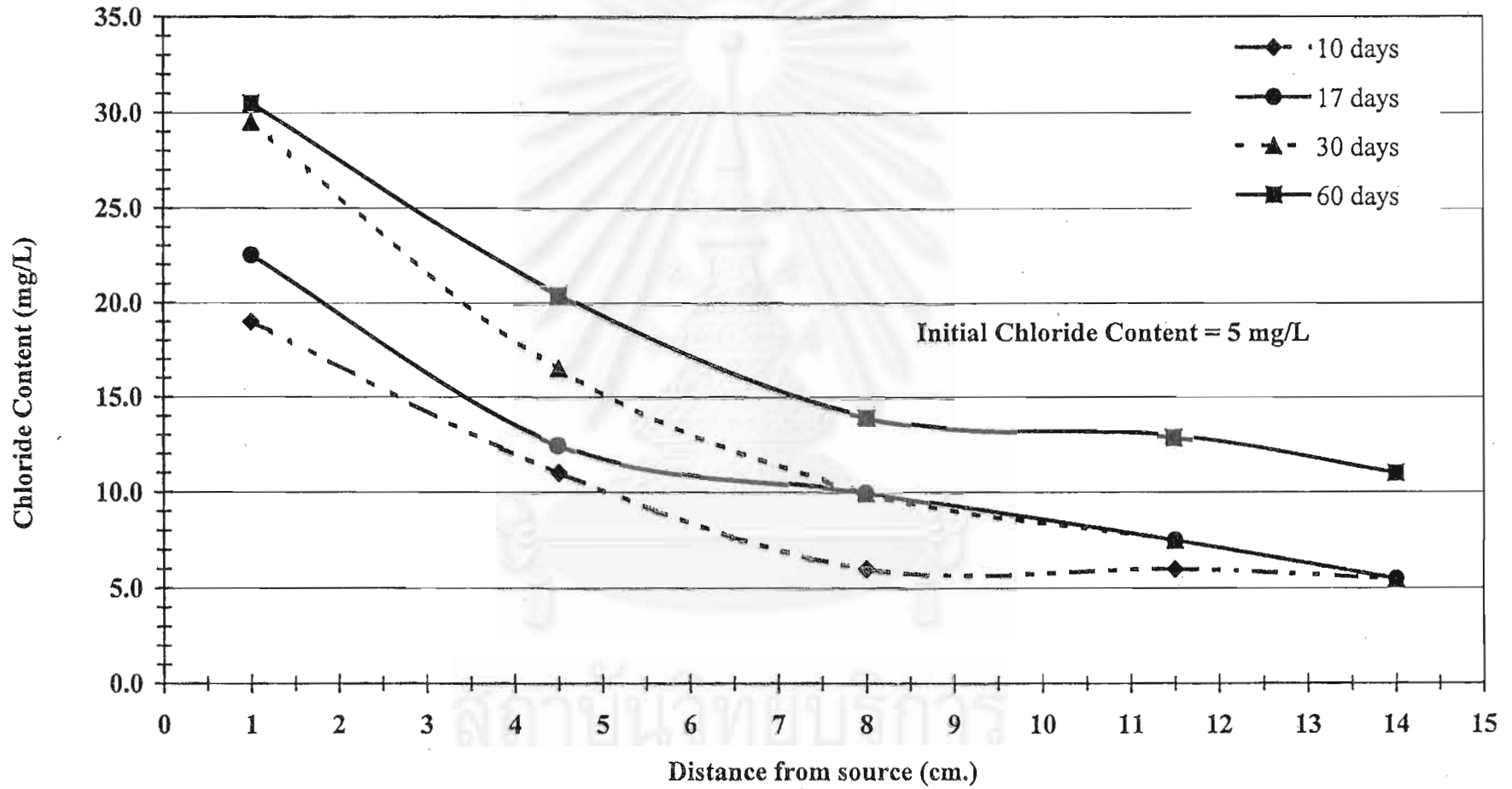
รูปที่ 4.15 ค่า pH ของตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการบดอัดผสมกรดที่ปริมาณกรดต่าง ๆ กัน



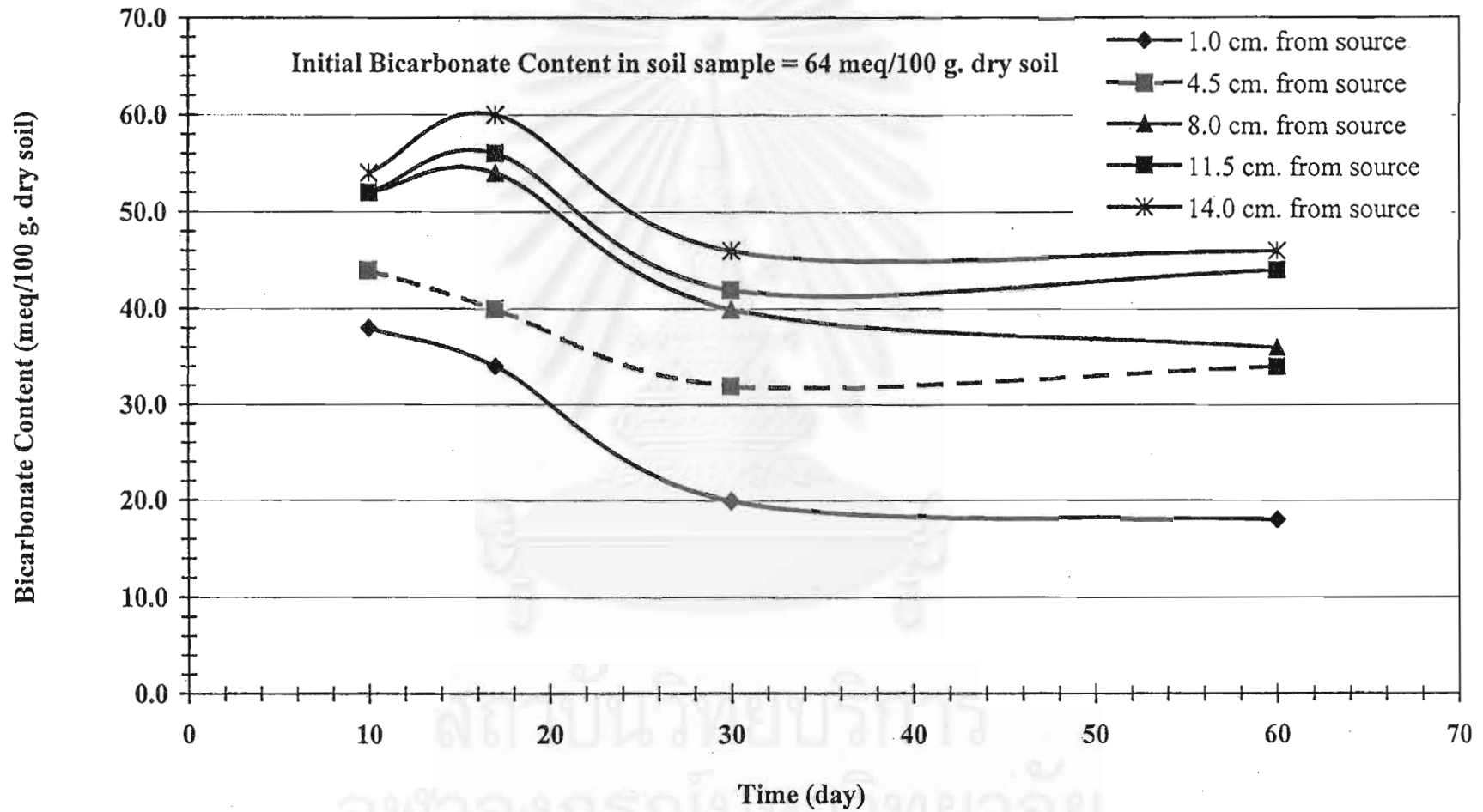
รูปที่ 4.16 ค่า pH ของตัวอย่างดินที่ไม่ผ่านการบดอัดผสมเบสที่ปริมาณเบสต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.17 ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

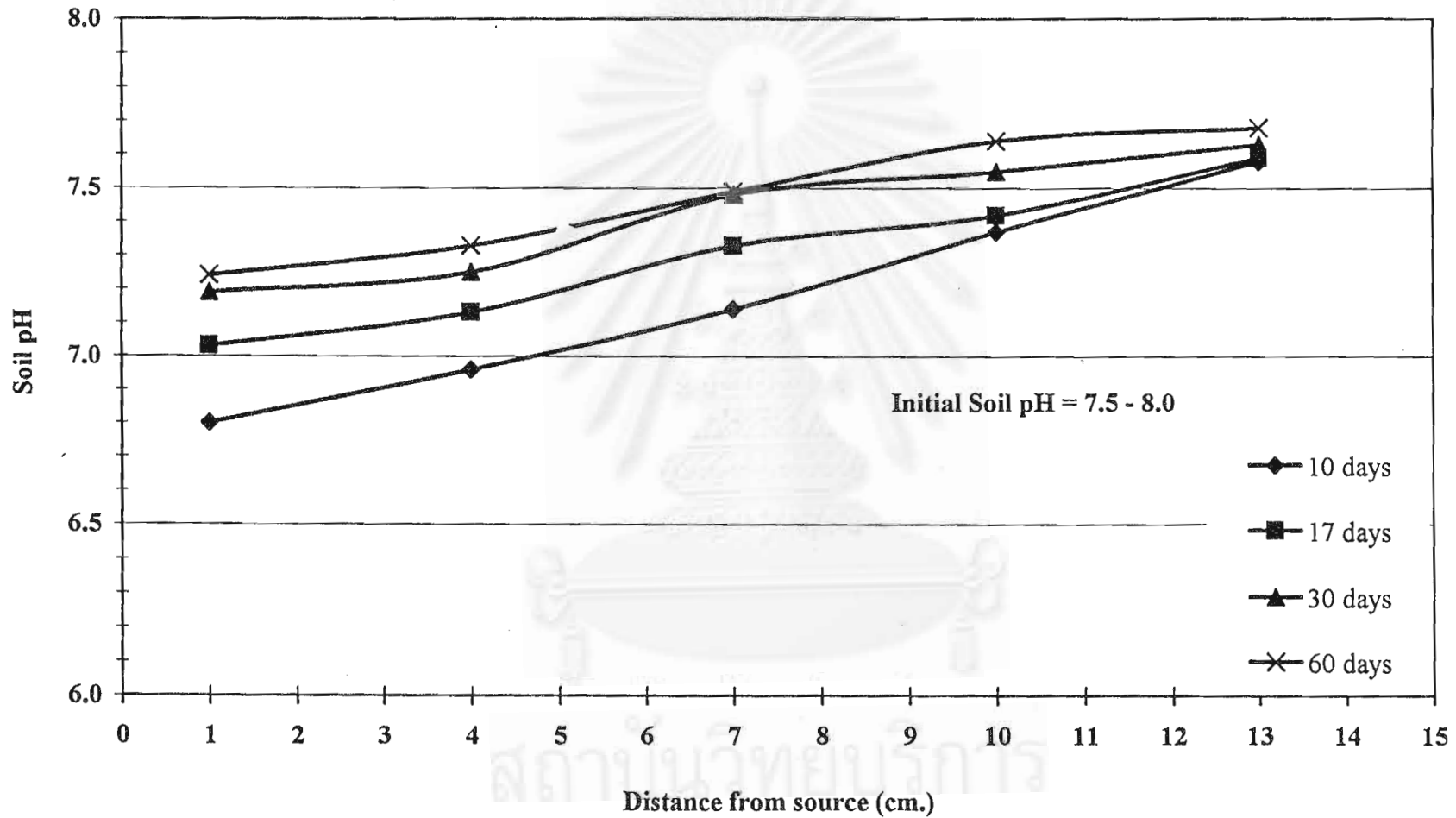


รูปที่ 4.18 ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด

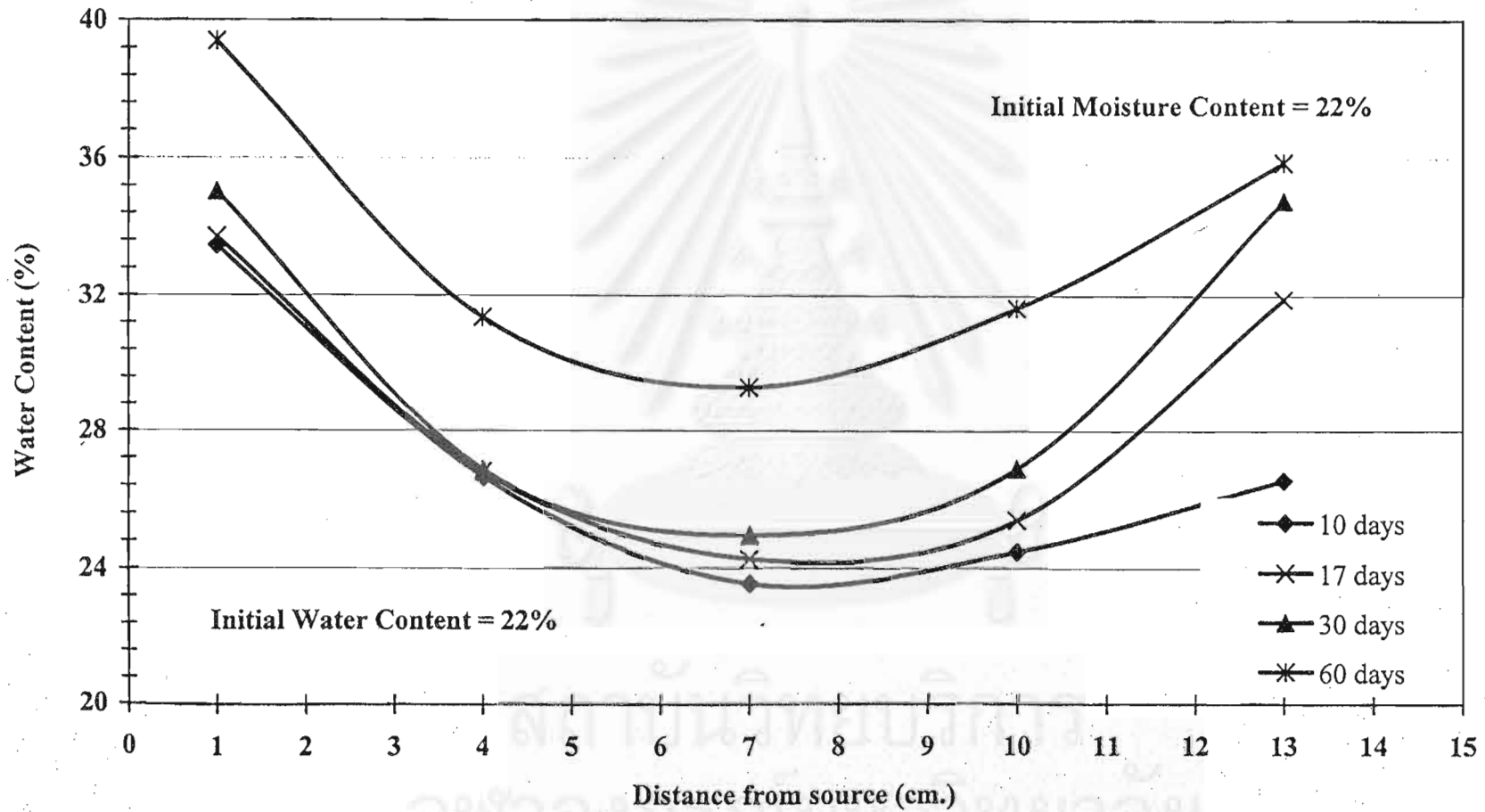


รูปที่ 4.19 ปริมาณไบคาร์บอเนตตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ

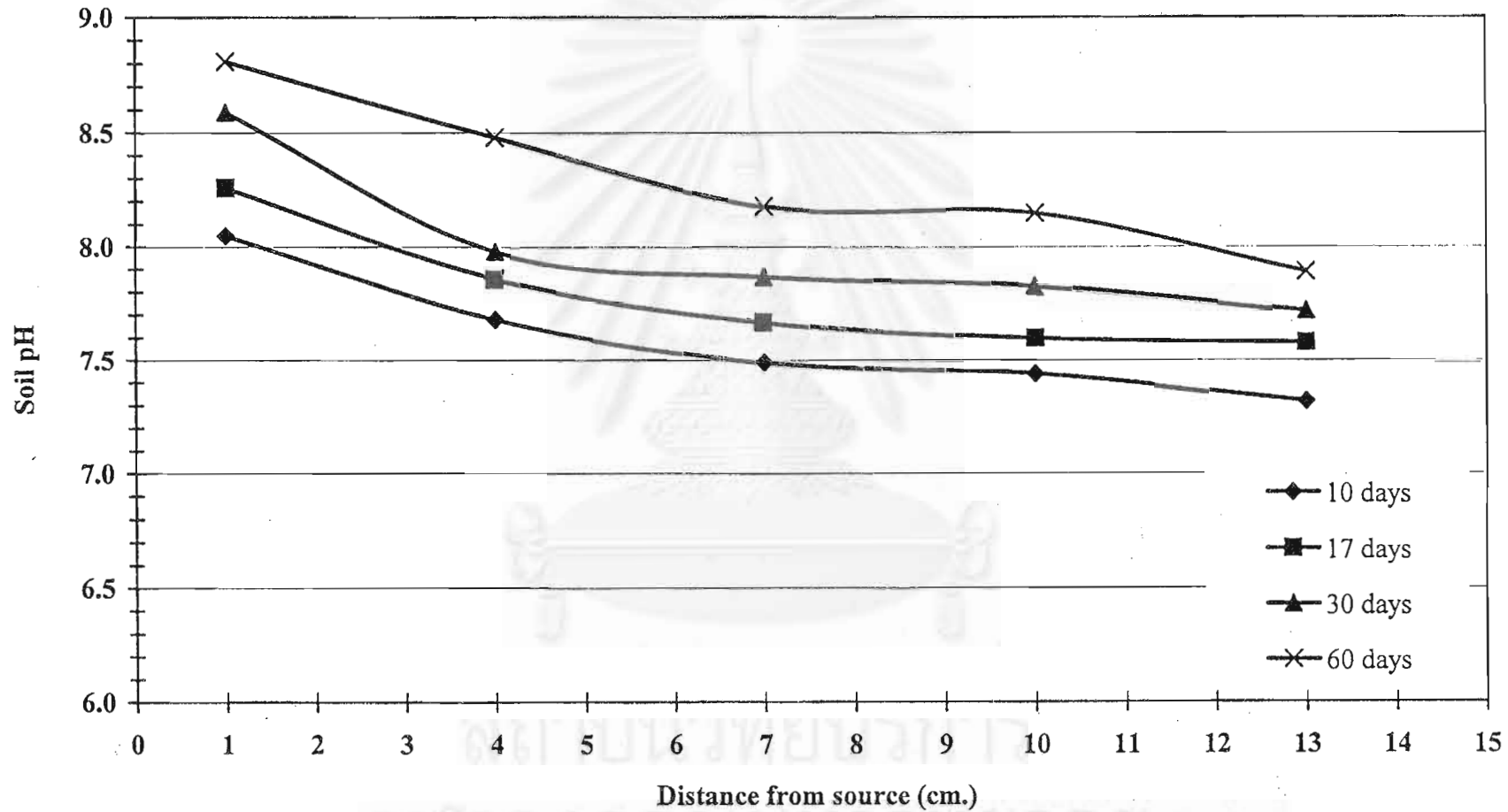




รูปที่ 4.20 ค่า pH ของตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบที่ระยะเวลาทดสอบต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.21: ปริมาณความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาทดสอบเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.22 ค่า pH ของตัวอย่างดินจากการทดสอบการแพร่กระจายโดยใช้เบสเป็นสารทดสอบที่ระยะเวลาทดสอบต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทำการศึกษาวิจัยความสามารถในการไหลซึมผ่านและการแพร่กระจายได้ของดินเหนียวบดอัด รวมถึงคุณสมบัติในการปรับสภาพกรด-เบสของดิน (Buffering) โดยสารทดสอบที่นำมาใช้เป็น pore fluid ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) มีค่า pH ประมาณ 1.0 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) มีค่า pH ประมาณ 13.0 ซึ่งการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อทำการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน และการแพร่กระจายได้นั้นจะทำได้โดยการบดอัดดินเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยที่หลังจากทำการทดสอบดังกล่าวแล้วเสร็จจะได้นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อวัดค่า pH ของดิน และของสารทดสอบที่ไหลผ่านตัวอย่างดิน รวมถึงปริมาณของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น และปริมาณไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับสารทดสอบทั้งสอง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นปัจจัยในการปรับสภาพความเป็นกรด-เบส ของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้ ในการสรุปผลการศึกษาวิจัยทั้งหมดนี้แบ่งสรุปออกเป็นข้อๆ ตามการทดสอบและผลการทดสอบที่ได้ดังนี้

##### 5.1.1 ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่า pH ของตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบ

จากการทดสอบ Compaction Test โดยใช้ Standard Proctor ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 1.56 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 22 ถึง 23 % ส่วนค่า pH ของตัวอย่างดินก่อนทำการทดสอบจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 7.5 ถึง 8.0

##### 5.1.2 ผลการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน

ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านของดินเหนียวบดอัด แยกตามปัจจัยที่ทำการศึกษาวิจัยได้ดังนี้

- ผลเนื่องมาจาก Boundary จากการทดสอบพบว่าค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านในกรณีที่เป็น Rigid Boundary มีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-8}$  ซม. ต่อวินาที ซึ่งสูงกว่าค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านกรณีที่เป็น Flexible Boundary โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-9}$  ซม. ต่อวินาที

- ผลเนื่องจาก Effective Overburden Stress หรือ Confining Stress จากการทดสอบทั้งแบบ Rigid Boundary และ Flexible Boundary พบว่าผลเนื่องจากความเค้น (stress) ทั้งที่เป็น Overburden Stress และ Confining Stress เมื่อค่าความเค้นที่ใช้ทดสอบสูงขึ้น ความสามารถในการไหลซึมผ่านก็จะลดลง
- ผลเนื่องจากชนิดของสารทดสอบ (Pore Fluid) ซึ่งสารทดสอบที่นำมาพิจารณาได้แก่ น้ำประปา กรดไฮโดรคลอริก และ โซเดียมไบคาร์บอเนต จากการทดสอบโดยใช้สารทดสอบทั้งสามชนิด ได้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านที่ใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงประมาณ  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-9}$  ซม. ต่อ วินาที
- ผลเนื่องจากเวลาที่ทำการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของเวลาจากการทดสอบโดยใช้สารทดสอบเป็นกรดและเบสเท่านั้น ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจากสารทดสอบทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเกือบคงที่ คือมีค่าอยู่ในช่วง  $3 \times 10^{-9}$  ถึง  $8 \times 10^{-9}$  ซม. ต่อ วินาที เท่านั้น
- ค่า pH ของสารทดสอบหลังจากที่ผ่านตัวอย่างดิน ในการวัดค่า pH ของสารทดสอบพบว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก คือในกรณีที่ใช้กรดเป็นสารทดสอบ ค่า pH ของสารทดสอบจะเปลี่ยนจาก 1.0 ไปเป็น 6.6-7.8 และเมื่อคำนวณเป็นความเข้มข้นแล้วจะเห็นว่าความเข้มข้นของกรดนั้นลดลงอย่างมาก ในกรณีที่ใช้เบส การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก คือ จาก pH เท่ากับ 13.0 เป็น 7.6-8.9 และความเข้มข้นของเบสจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดีหากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างสารทดสอบไปวัดค่า pH นั้น พบว่า ค่า pH จะเปลี่ยนแปลงอย่างขึ้นๆลงๆ ไม่คงที่ โดยอาจจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของค่า pH ได้ คือ กรณีทดสอบโดยใช้กรด ค่า pH ของสารที่ผ่านตัวอย่างดินแล้วเท่ากับ 7.5 ส่วนกรณีทดสอบโดยใช้เบส ค่า pH ของสารที่ผ่านตัวอย่างดินแล้วเท่ากับ 8.3
- ค่า pH ของตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ เมื่อนำตัวอย่างดินภายหลังการทำทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านแล้วเสร็จมาวัดค่า pH พบว่า ค่า pH ของตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่า pH เริ่มต้นของดินไม่มากนัก คือ ค่า pH ของตัวอย่างดินในกรณีที่ใช้กรดเป็นสารทดสอบจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5.94 ถึง 7.35 ซึ่งค่า pH ของตัวอย่างดินจะต่ำที่สุดบริเวณที่ตัวอย่างดินมีการสัมผัสกับสารทดสอบ ส่วนในกรณีที่ทดสอบโดยใช้

เบสเป็นสารทดสอบ ค่า pH ของตัวอย่างดินจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 7.95 ถึง 9.22 ซึ่งค่า pH จะสูงที่สุดบริเวณที่ตัวอย่างดินสัมผัสกับสารทดสอบ

- ปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ โดยปริมาณคลอไรด์ที่วิเคราะห์ได้นั้นจะอยู่ในรูปของ Soluble Salt Chloride จากการวิเคราะห์คลอไรด์ภายหลังการทดสอบพบว่าปริมาณคลอไรด์ในดินเพิ่มขึ้นจากเดิมก่อนทำการทดสอบ มีปริมาณคลอไรด์ประมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 11.5 ถึง 16.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคลอไรด์ส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมากจากการแตกตัวของกรดที่ใช้เป็นสารทดสอบนั่นเอง
- ปริมาณสารไบคาร์บอเนตที่เหลืออยู่ในตัวอย่างดินภายหลังการทดสอบ เป็นที่คาดกันว่าการที่ตัวอย่างดินมีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH จากเดิมไม่มากนักน่าจะมาจากความสามารถในการปรับสภาพกรด-เบส (Buffering) ของสารไบคาร์บอเนตที่อยู่ในดิน ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาปริมาณไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับสารทดสอบนั้นพบว่า ในกรณีที่ทดสอบโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ ปริมาณไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินลดลงเหลือประมาณ 22- 34 milliequivalent ต่อดินแห้ง 100 กรัม จากปริมาณไบคาร์บอเนตเริ่มต้นที่ประมาณ 64 milliequivalent ต่อดินแห้ง 100 กรัม ส่วนในกรณีที่ใช้เบสเป็นสารทดสอบนั้น ปริมาณไบคาร์บอเนตในตัวอย่างดินลดลงเหลือประมาณ 32- 47 milliequivalent ต่อดินแห้ง 100 กรัม
- การเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุในตัวอย่างดินจากการวิเคราะห์โดยวิธี X-rays Fluorescence Spectrometer เพื่อเป็นการยืนยันว่า มีการดูดซับคลอไรด์และโซเดียมไว้ในตัวอย่างดิน จากการเก็บตัวอย่างดินบางส่วนไปวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่านโดยใช้สารทดสอบทั้งสองชนิด พบว่าปริมาณของธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจนคือคลอไรด์จากการทดสอบโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารทดสอบ กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมที่มีคลอไรด์อยู่น้อยมากจนแทบวิเคราะห์หาไม่ได้นั้นเพิ่มขึ้นมาเป็น 0.51 % โดยน้ำหนัก ส่วนกรณีที่ทำทดสอบโดยใช้สารทดสอบเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น ปริมาณโซเดียมในตัวอย่างดินเพิ่มขึ้นถึงเกือบ 2 เท่าตัว คือจากเดิม 0.56 % เป็น 0.94 % โดยน้ำหนัก

### 5.1.3. ค่า pH ของดินผสมกับสารทดสอบที่ปริมาณต่าง ๆ กัน

จากการทดสอบโดยนำตัวอย่างดินผสมกับสารทดสอบมาวัดค่า pH ของดิน โดยสารทดสอบที่ใช้ ได้แก่ น้ำประปา ที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 22%, 33% และ 39% ส่วนสารทดสอบที่เป็นกรดและเบสนั้นจะทำการทดสอบที่ปริมาณกรดเท่ากับ 5%, 10% และ 20% ของน้ำหนักดินที่ใช้ โดยจะนำผลของเวลาที่ใช้ทดสอบมาพิจารณาด้วย ผลการวัดค่า pH ของดินมีดังต่อไปนี้

- กรณีดินผสมกับน้ำประปา จากผลการวัดค่า pH พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งค่า pH ยังเปลี่ยนแปลงจากเดิมไม่มาก คืออยู่ในช่วงระหว่าง 7.54-7.72 ซึ่งยังอยู่ในช่วงของค่า pH เดิมของตัวอย่างดิน โดยที่เมื่อปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นค่า pH มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 30 วันแรกของการทดสอบและหลังจากนั้นค่า pH ของดินจะค่อนข้างคงที่
- กรณีดินผสมกับกรด จากผลการวัดค่า pH พบว่าค่า pH จะลดลงเมื่อปริมาณของกรดที่ผสมกับดินนั้นมากขึ้น โดยในวันแรกของการทดสอบค่า pH ของการทดสอบที่แต่ละปริมาณกรดจะลดลงต่ำสุด แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป ค่า pH ของดินจะเพิ่มขึ้นจนถึงระยะหนึ่ง คือ ประมาณ 15 วัน ค่า pH ของดินจะเริ่มคงที่ โดยค่า pH ที่วัดได้จะเข้าใกล้ค่า pH เริ่มต้นของดิน ซึ่งหมายถึงการปรับสภาพกรด - เบส ของดินโดยสาร ไบคาร์บอเนตในดินนั่นเอง
- กรณีดินผสมกับเบส ผลการวัดค่า pH ของดินที่ได้นั้น แสดงว่าปริมาณเบสที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า pH ของดินสูงขึ้น โดยค่า pH จะสูงที่สุดในวันแรกของการทดสอบและจะลดต่ำลง เข้าใกล้กับค่า pH เริ่มต้นก่อนการทดสอบที่ระยะเวลาประมาณ 15 วันหลังจากผสมดินกับเบส และมีแนวโน้มคงที่จนถึงวันที่สิ้นสุดการทดสอบ คือที่ระยะเวลา 45 วัน

### 5.1.4. ผลการทดสอบการแพร่กระจาย

- ปริมาณคลอไรด์ในดินจากการทดสอบโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ ในการทดสอบการแพร่กระจายนี้ หลังจากปล่อยให้สารทดสอบแพร่กระจายสู่ตัวอย่างดินแล้ว ที่ระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่สัมผัสกับสารทดสอบมากที่สุด ปริมาณคลอไรด์จะเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน และที่ระยะห่างจากแหล่งสารทดสอบมากขึ้น ปริมาณคลอไรด์ที่วัดได้ก็จะน้อยลง

เรื่อยๆ ซึ่งปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นนี้มาจาก คลอไรด์ที่แตกตัวจากกรด ไฮโดรคลอริก

- ค่า Diffusion Coefficients ของคลอไรด์ โดยทำการวัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงจากการทดสอบการแพร่กระจายโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบนั้น จะได้ค่า Diffusion Coefficient, D ( Sauty,1980) ที่ระยะเวลาทดสอบ 60 วัน เท่ากับ  $2.66 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
- ค่า pH ของตัวอย่างดินจากการทดสอบโดยใช้กรดเป็นสารทดสอบ หลังจากเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลาต่างๆ มาวัดค่า pH พบว่า ทุกๆระยะห่างจากแหล่งสารทดสอบที่มากขึ้น รวมถึงเมื่อระยะเวลาที่ทำการทดสอบเพิ่มขึ้น ค่า pH ของดินจะสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพความเป็นกรด-เบสของดิน โดยสารไบคาร์บอเนตในดินนั้น ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการวัดค่า pH ของดินผสมกรด ในหัวข้อที่ 3.2 อย่างไรก็ตามค่า pH ที่วัดได้นั้นเปลี่ยนแปลงจากค่า pH เริ่มต้นก่อนการทดสอบไม่มากนัก
- ปริมาณสารไบคาร์บอเนตที่เหลืออยู่หลังทำปฏิกิริยากับกรด เพื่อเป็นการยืนยันถึงความสามารถในการปรับสภาพกรด-เบส ของดินนี้โดยสารไบคาร์บอเนต จึงต้องทำการวัดปริมาณไบคาร์บอเนตที่ลดลงจาก ค่าเริ่มต้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณไบคาร์บอเนตในดินพบว่า ปริมาณไบคาร์บอเนตมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาทดสอบเพิ่มมากขึ้นและ ยิ่งระยะห่างจากแหล่งสารทดสอบน้อยหรือจุดที่สัมผัสกับสารทดสอบ ปริมาณไบคาร์บอเนตจะลดลงอย่างมาก
- ค่า pH ของตัวอย่างดินจากการทดสอบโดยใช้เบสเป็นสารทดสอบ ผลการวัดค่า pH ที่ได้พบว่าเมื่อระยะเวลาทดสอบมากขึ้น ค่า pH ของตัวอย่างดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกๆ ระยะห่างจากแหล่งสารทดสอบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถในการไหลซึมผ่าน และการแพร่กระจายได้ของดินเหนียวบดอัด รวมถึงความสามารถในการปรับสภาพกรด-เบส โดยสารทดสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นกรดไฮโดรคลอริก และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 1 และ 13 ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่น่าจะมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไปได้แก่



- ความสามารถในการไหลซึมผ่าน และการแพร่กระจายได้ โดยเปลี่ยนชนิด และปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารที่นำมาใช้ทำเป็น pore fluid โดยอาจเป็นสารปนเปื้อนจริงที่ถูกปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากภาคเกษตรกรรมโดยตรง ซึ่งจะเป็นสารที่พบในแต่ละท้องถิ่น เช่น กรดชนิดอื่นๆ, สารประเภท organic, ปุ๋ยหรือ ยาฆ่าแมลง เป็นต้น
- เวลาที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งหากมีการศึกษาวิจัยถึงผลที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของเวลามากขึ้น คาดว่าจะทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของดินที่ถูกปนเปื้อนมากขึ้น
- ชนิดของดินที่นำมาทดสอบ แม้ว่าในการศึกษาวิจัยนี้จะได้นำตัวอย่างดินที่เป็นดินเหนียวที่มีต้นกำเนิดบริเวณกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) มาทำการศึกษา ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างมาจากสถานที่เพียงที่เดียว โดยในความเป็นจริงดินที่เก็บมาจากสถานที่ต่างกัน แม้จะเรียกว่าเป็นดินเหนียวกรุงเทพฯเหมือนกันก็ย่อมจะมีส่วนประกอบในดินต่างกัน ทำให้คุณสมบัติที่จะทำการศึกษาเปลี่ยนแปลงไปด้วย และเนื่องจากแหล่งของสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นก็เกิดขึ้นแตกต่างกันไปตามแต่ละท้องถิ่น ซึ่งหากมีการศึกษาวิจัยถึงผลเนื่องจากส่วนประกอบของดินที่มีต่อคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนแล้ว คาดว่าน่าจะเป็นทางออกที่ดีสำหรับการออกกฎ หรือมาตรการควบคุม เฉพาะแต่ละท้องถิ่น ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย
- เนื่องจากสารไฮโดรคาร์บอนในดินน่าจะมาจากฝนที่ตกลงมาและไหลซึมลงสู่ชั้นดิน ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วในน้ำฝนจะมีกรดคาร์บอนิก เมื่อแตกตัวก็จะได้สารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอนอีก ซึ่งหากมีการวิจัยกับการนำดินที่ถูกปนเปื้อนแล้ว กลับมาใช้อีกโดยการเติมสารบางชนิดลงไปน่าจะมีส่วนช่วยให้การก่อสร้างแหล่งฝังกลบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Acar, Y. B. and Ghosn, A. A., 1986. Role of activity in hydraulic conductivity of compacted soils permeated with acetone, *Proceedings of the International Symposium on Environmental Geotechnology*, ed. H Y. Fang, I: pp. 403-412.
2. Barone, F.S. et al., 1992. A laboratory estimation of diffusion and adsorption coefficients for several volatile organic in a natural clayey soil, *Journal of Contaminant hydrology*. 10: pp. 225-250.
3. Bjerrum, L., and Huder, J., 1957. Measurement of the permeability of compacted clays, *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, England, 1: pp. 6-10
4. Bond, W. J. et al., 1982. Constant flux absorption of a tritiated calcium chloride solution by a clay soil with anion exclusion, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: pp. 1133-1137.
5. Bourke, P.J. et al., 1993. Mass transfer mechanisms in compacted clays, *Geochemistry of Clay-Pore Fluid Interactions*. Edited by D. A. C. Manning, et al., London, Chapman & Hall: pp. 331- 350.
6. Bowders, J. J. et al., 1986. Methods for testing the compatibility of clay liners with landfill leachate, *Hazardous and Industrial Solid Waste Testing: Fourth Symposium*, ed. J. D. Petros, Jr., W. J. Lacey, and R. A. Conway, ASTM STP 886: pp. 233-250.
7. Bowders, J. J. and Daniel, D. E., 1987. Hydraulic conductivity tests on compacted clay to dilute organic chemicals, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113 No. 12: pp 1432-1448.
8. Fetter, C.W., 1993. *Contaminant Hydrogeology*, 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 500 p.
9. James, R. V. and Rubin, J., 1986. Transport of chloride ion in a water-unsaturated soil exhibiting anion exclusion, *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 50: pp. 1142-1149
10. Klotz D. et al., 1980. Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments, *Journal of Hydrolics*, 45: pp.169-184
11. Mackenzie, L. D. and David, A. C., 1991. *Introduction to environmental engineering*, 2<sup>nd</sup> ed., New York: McGraw-Hill.

12. Mitchell, K. J., Hooper D.R. and Campanella R.G., 1965. Permeability of compacted clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, American Society of Civil Engineering, 91, No.SM4: pp.41-65
13. Mitchell, K. J., 1993, Fundamentals of soil behavior, 2<sup>nd</sup> ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc. 437 p.
14. Muskat M., 1973. The Flow of homogeneous fluid through porous media, McGraw-Hill, New York.
15. Page, A. L. et al (Editors), 1982. Methods of Soil Analysis, Part2-Chemical and Microbiological Properties, Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc., 1159 p.
16. Rowe, R. K. et al., 1996. Chloride migration through clayey silt underlain by fine sand or silt, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 No. 1: pp. 60- 68.
17. Saffman P.G., 1959. A theory of dispersion in porous medium, *Journal of the Fluid Mechanics*, 6, No.3: pp.321-349.
18. Sahami M., Hughes B.D., Scriven L.E. and Davis H.T., 1986. Dispersion in flow through porous media in one phase flow, *Journal of Chemical Engineering and Science*, 41, No.8: pp.2103-2122.
19. Shackelford, C. D. et al., 1989. Diffusion of inorganic chemical species in compacted clay soil, *Journal of Contaminant hydrology*. 4: pp. 241-273.
20. Shackelford, C. D. et al., 1996. Acid buffering a high pH soil for zinc diffusion, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123, No.3: pp. 260-271.
21. The National Environment Protection Council, 1999. Guideline on laboratory analysis of potentially contaminated soils, Schedule B(3), December: 120 p.
22. United States Environmental Protection Agency, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Method no. 2320B. Titration Method.
23. United States Environmental Protection Agency, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Method no. 4500-Cl<sup>-</sup> C. Mercuric Nitrate Method.
24. Wierenga, P. J. and van Genuchten, M. Th., 1986. Solute transport through small and large unsaturated soil columns, *Journal of Groundwater*. 27, No.1: pp. 35-42.
25. Yong R.N., Mohamed A.M.O. and Warkentin B.P., 1992. Principles of contaminant transport in soils, Elsevier, Amsterdam: 327p.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย กิตติพงษ์ สกฺลศรีจิรววัฒน์ เกิดวันที่ 28 พฤษภาคม 2520 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา พ.ศ. 2541 และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิศวกรรมปฐพี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย