การควบคุมความเค็มของดินร่วนปนทรายโดยการตัดกระบวนการคาพิวลารี

นางสาวหฤทัย มาศโค้ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

CAPILLARY CUT FOR SALINITY CONTROL

IN SANDY LOAM

Haruetai Maskong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การควบคุมความเค็มของดินร่วนปนทรายโดยการตัดกระบวนการคาพิวลารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

____

(ผศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
กรรมการ

____

(ผศ. ดร.ปรียาพร โกษา)
กรรมการ

____

(อ. ดร.วุฒิ ด่านกิตติกุล)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

หฤทัย มาศโค้ง : การควบคุมความเค็มของดินร่วนปนทรายโดยการตัดกระบวนการคาพิวลารี (CAPILLARY CUT FOR SALINITY CONTROL IN SANDY LOAM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร, 91 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของน้ำใต้ดินเค็มภายใต้กระบวนการคาพิวลารี และศึกษาการตัดกระบวนการคาพิวลารีเพื่อยับยั้งไม่ให้ความเค็มเคลื่อนที่ขึ้นมาบนผิวดิน โดยศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของน้ำในดินภายใต้กระบวนการคาพิวลารี โดยการจำลองชั้นดินในห้องปฏิบัติการด้วยการบดอัดดินตัวอย่างลงในท่อทรงกระบอกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 100 ซม. กำหนดระดับน้ำใต้ดิน 85 ซม. ต่ำกว่าผิวดิน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ชั้นดินระดับความลึกต่าง ๆ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 6 กรณี คือ (1) แท่งดิน I : ดินทราย น้ำใต้ดินจืด (2) แท่งดิน II : ดินทราย น้ำใต้ดินเค็ม (3) แท่งดิน III : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินจืด (4) แท่งดิน IV : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินเค็ม (5) แท่งดิน V : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินเค็มจำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย และ (6) แท่งดิน VI ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินเค็ม จำลองให้ผิวดินมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา โดยการเพิ่มน้ำจืดบนผิวดิน ผลการทดลองพบว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน และความสูงคาพิวลารีระหว่างน้ำใต้ดินจืดและน้ำใต้ดินเค็ม สำหรับดินทรายมีผลไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับดินร่วนปนทราย ซึ่งเป็นตัวอย่างดินจากพื้นที่ดินเค็ม บ้านหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ให้ผลที่ต่างกันมากคือ น้ำใต้ดินเค็มทำให้เกิดความสูงคาพิวลารีที่สูงกว่าและความชื้นเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่า และมากกว่าที่ระดับความลึกของดินเท่ากัน เนื่องจากประจุของโซเดียม (Na+) ในสารละลายเกลือที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะดูดซับน้ำเข้าหาตัวเอง และพบว่าสำหรับดินร่วนปนทรายแท่งดินมีการสะสมความชื้นที่ระดับผิวดินมากกว่าที่ระดับความลึกอื่น ๆ เมื่อเร่งการระเหยของน้ำผิวดินจึงทำให้เกิดคราบเกลือสะสมบนผิวดินได้มากเช่นเดียวกับที่เกิดในสภาพธรรมชาติ และเมื่อทดลองจำลองให้ผิวดินมีความชื้นมากขึ้น พบว่าความชื้นจากน้ำใต้ดินเค็มในดินร่วนปนทรายไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาถึงผิวดินได้ ดังนั้นควบคุมความชื้นบนผิวดินให้สูงคงที่ตลอดเวลา จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการแพร่กระจายตัวของดินเค็ม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา ____________________

ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ____________________

HARUETAI MASKONG : CAPILLARY CUT FOR SALINITY CONTROL IN SANDY LOAM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHATCHAI JOTHITYANGKOON, Ph.D., 91 PP.

CAPILLARY PRESSURE/SOIL COLUMN/SALINE WATER/
SOIL MOISTURE MOVEMENT/SAND

The objective of this study is to experiment on capillary cut design. The results in laboratory based on the investigation of saline groundwater movement influenced by capillary force. Soil layer is simulated by compacted soil sample in transparent tube of diameter 10 cm and 100 cm height and set groundwater level of 85 cm below soil surface. The experimental studies are divided to 6 different cases: (1) Column I: Sand with deionized groundwater (DG) (2) Column II: Sand with saline groundwater (SG) (3) Column III: Sandy loam with DG (4) Column IV: Sandy loam with SG (5) Column V: Sandy loam with SG and adding artificial sunlight to increase evaporation and (6) Column VI: Sandy loam with SG and adding water to the surface to cut a capillary process. The experimental results show that vertical movement rate and capillary pressure head between DG and SG for sand are similar. For sandy loam sampling from salinity – affected area in Nakhon Ratchasima, the results between DG and SG are explicitly different. SG gives high capillary pressure head, high moisture movement rate and high soil moisture content compare to DG at equal level of soil depth. The cause can be that sodium ion (Na^+) brought by saline water and staying in the voids between soil grain can absorb more water content. For sandy loam, soil moisture is accumulated at the soil surface in high water content, compare to the other level of soil depth. If this saline moisture is evaporated by artificial radiation, salt's

crystallization will be found on the soil surface. If high soil moisture content on the surface is maintained by adding water to the soil surface of sandy loam, SG movement will be ceased keeping constant high moisture on the soil surface is a potential measure to solve the problem of soil salinity dispersion.

School of Civil Engineering Student's Signature ______________________

Academic Year 2010 Advisor's Signature ______________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ แนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ แนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์สวรรค์ สถิรภัทรพร ผู้อำนวยการโรงเรียนบ้านซินหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาปัญหาดินเค็มในพื้นที่ศึกษา

คุณลุงวิรัตน์ เกษตรกรบ้านหนองเขวา ที่กรุณาให้ใช้ที่ดินส่วนตัว ในการศึกษาปัญหาดินเค็ม และให้เก็บตัวอย่างดินมาทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการ

เจ้าหน้าที่สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกจนการศึกษาเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีและให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา

หฤทัย มาศโค้ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ข
กิตติกรรมประกาศ ง
สารบัญ จ
สารบัญตาราง ช
สารบัญรูป ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ฏ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 การเกิดดินเค็มและการแพร่ของเกลือในพื้นที่ดินเค็ม 4
2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำในดิน 6
2.2.1 ความชื้นในดิน 6
2.2.2 การวัดความชื้นในดิน 7
2.2.3 การวัดค่าความเค็ม 7
2.2.4 แรงดึงดูดน้ำในดิน 8
2.2.5 สมดุลความชื้น 9
2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของน้ำและมวลเกลือในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ 11
2.3.1 ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน 11
2.3.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของมวลสาร 13
2.3.3 สมการการเคลื่อนที่ของมวลเกลือ 15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 สมการการเคลื่อนที่ของมวลเกลือ....15

2.4 กระบวนการคาพิวลารีในดิน....16

3 วิธีการดำเนินงานวิจัย....25

3.1 ศึกษาปัญหาดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ....26

3.2 การเลือกและเตรียมตัวอย่างดิน....27

3.3 คุณสมบัติของน้ำตัวอย่าง....29

3.4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน....29

3.5 อุปกรณ์การทดลองและการสอบเทียบ....31

3.6 การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในห้องปฏิบัติการ....32

3.7 วิธีการวิเคราะห์การทดลอง....33

4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล....34

4.1 บทนำ....34

4.2 คุณสมบัติของดินและน้ำ....34

4.3 การปรับเทียบหัววัด....37

4.4 แท่งดินเป็นดินทราย....39

4.5 แท่งดินเป็นดินร่วนปนทราย....41

4.6 แท่งดินเป็นดินร่วนปนทรายและเร่งการระเหย....44

4.7 แท่งดินร่วนปนทรายและตัดกระบวนการคาพิวลารี....46

4.8 การเปรียบเทียบผลระหว่างแท่งดิน....48

5 บทสรุป....52

5.1 สรุปผลงานวิจัย....52

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป....53

รายการอ้างอิง....54

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ตารางข้อมูลผลการทดลอง....58

ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่....76

ประวัติผู้เขียน....91

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ระดับความเค็มของดินและอิทธิพลต่อพืช....8
2.2 คุณสมบัติของดินและน้ำในการทดลองของ Akudago et al. (2009) 23
4.1 คุณสมบัติของดินและน้ำที่ใช้ในการทดลอง.... 35

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 การแพร่กระจายดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ..2
2.1 ลักษณะทางธรณีวิทยากับแพร่กระจายของดินเค็ม...4
2.2 หลักการของดาร์ซี...12
2.3 อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม...13
2.4 โค้งการกระจายตัวความชื้นเหนือระดับน้ำใต้ดิน และ CMDC …………………………....17
2.5 แบบจำลองความไม่สม่ำเสมอของช่วงคาพิวลารีเพื่ออธิบาย CMDC..................................17
2.6 ปรากฏการความไม่ซ้ำรอยของโค้งลักษณะความชื้นของดิน...19
2.7 ผลของขวดน้ำหมึกและผลของเครือข่าย...19
2.8 แบบจำลองการเคลื่อนที่ขึ้นของน้ำเค็ม ……………………………………..……..…...22
2.9 การติดตั้งระบบการทดลอง Akudago et al (2009)..23
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของ Column 1 Akudago et al (2009)…..................24
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 25
3.2 ภาพตัดขวางแสดงชั้นเกลือหิน จากอำเภอพล จังหวัดขอนแก่นขอนแก่น
ถึงจังหวัดหนองคายหนองคาย..26
3.3 คราบเกลือในนาข้าว บ้านหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย
จังหวัดนครราชสีมา…...26
3.4 การกระจายความเค็มในลุ่มน้ำมูล...28
3.5 สภาพผิวดินของบริเวณเก็บตัวอย่างดิน บ้านหนองเขวา ………………………………..28
3.6 การเตรียมตัวอย่างน้ำเค็ม (Saline water) 29
3.7 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) 30
3.8 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อดิน (Triangular texture soil classification chart) 30
3.9 หัววัด (sensor) รุ่น 5TE..31
3.10 เครื่องบันทึกข้อมูล (data loger) รุ่น EM50..32
3.11 การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ในห้องปฏิบัติการ 33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.1 การกระจายขนาดคละเม็ดดินของดินร่วนปนทราย.. 34
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลารีกับความชื้นดิน (SWCC)..36
4.3 กราฟปรับแก้ความชื้นระหว่างความชื้นโดยปริมาตรจากการวัด ความชื้นโดยน้ำหนัก และความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้องกรณีน้ำจืดและน้ำเค็มสำหรับดินทราย 37
4.4 กราฟปรับแก้ความชื้นระหว่างความชื้นโดยปริมาตรจากการวัด ความชื้นโดยน้ำหนัก และความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้องกรณีน้ำจืดและน้ำเค็มสำหรับดินร่วนปนทราย...38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลากรณีเป็นน้ำจืดและน้ำเค็มที่ระดับความลึก 65 และ 85 เซนติเมตร จากผิวดิน สำหรับแท่งดินที่เป็นดินทราย…......................39
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของดินทรายกับความชื้นเชิงปริมาตรที่เวลาต่าง ๆ...40
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินที่ระดับต่าง ๆ สำหรับแท่งดินที่เป็นดินร่วนปนทราย 42
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความชื้นดิน และระหว่างน้ำใต้ดินจืดและน้ำใต้ดินเค็ม กรณีดินร่วนปนทรายที่เวลาต่าง ๆ 44
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินระดับต่าง ๆ สำหรับแท่งดิน V...44
4.10 คราบเกลือที่เกิดขึ้นบนผิวดิน..45
4.11 คราบเกลือที่ลอกออกจากผิวดิน..45
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินระดับต่าง ๆ สำหรับแท่งดิน VI 46
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความชื้นโดยปริมาตรที่เวลาต่าง ๆ สำหรับแท่งดิน VI 47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-85 cm
ของแท่งดิน III IV และ VI 48
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-65 cm
ของแท่งดิน III IV และ VI ……………………………………..………...…………49
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-45 cm
ของแท่งดิน III IV และ VI 50
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-25 cm
ของแท่งดิน III IV และ VI...50
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-5 cm
ของแท่งดิน III IV และ VI 51

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

θ	=	ความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้อง
θ'	=	ความชื้นโดยปริมาตรที่ได้จากหัววัด
w	=	ความชื้นโดยน้ำหนัก
W_w	=	น้ำหนักน้ำ
W_s	=	น้ำหนักดินแห้ง
V_w	=	ปริมาตรน้ำ
V_t	=	ปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน
ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำ
ρ_b	=	ความหนาแน่นของดินรวม
ρ_{w_DI}	=	ความหนาแน่นของน้ำจืด
ρ_{w_Saline}	=	ความหนาแน่นของน้ำเค็ม
ψ	=	แรงดึงดูดน้ำในดิน
$u_a - u_w$	=	แรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิวลารี
π	=	แรงดึงดูดออสโมทิก
W	=	การเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นดิน
P	=	ปริมาณน้ำฝน
R	=	ปริมาณน้ำไหลบ่าบนผิวดิน (runoff)
E	=	ปริมาณน้ำที่ระเหยจากดิน (evaporation)
T	=	ปริมาณน้ำที่พืชคาย (transpiration)
D	=	ปริมาณน้ำที่ซึมลึกลงพ้นเขตรากพืช
d	=	ขนาดเม็ดดิน
h	=	ความชื้นโดยน้ำหนัก
Q	=	อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ
A	=	พื้นที่หน้าตัดของการเคลื่อนที่
ΔH	=	ความแตกต่างระหว่างเฮดของน้ำ
ΔL	=	ระยะทางที่น้ำเคลื่อนที่
q	=	อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

k	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
K	=	ฟังก์ชันของความชื้นหรือเฮดความดัน
H	=	เฮดทางชลศาสตร์
J_c	=	อัตราการเคลื่อนที่ด้วยการพาของมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
C	=	ความเข้มข้นของสารละลาย
v	=	ความเร็วการไหล
J_d	=	อัตราการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ของมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
D_s	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสาร
J_h	=	อัตราการเคลื่อนที่ด้วยการกระจายของมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
D_h	=	สัมประสิทธิ์การกระจายของมวลสาร
λ	=	ค่าสภาพการกระจาย
J	=	อัตราการเคลื่อนที่ของมวลสารต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
h	=	ความสูงคาพิวลารีของน้ำในดิน
d	=	ขนาดของท่อ
R	=	ค่าตัวประกอบความหน่วง
t	=	เวลา
I	=	อัตราการไหลเข้า (Inflow)
O	=	อัตราการไหลออก (Outflow)
ΔS	=	ปริมาณเก็บกักที่น้ำเปลี่ยนแปลง
Δt	=	เวลาที่เปลี่ยนแปลง
EC	=	ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity)
z	=	ระดับความลึกจากผิวดิน
DG	=	น้ำใต้ดินจืด (Deionized Groundwater)
SG	=	น้ำใต้ดินเค็ม (Saline Groundwater)

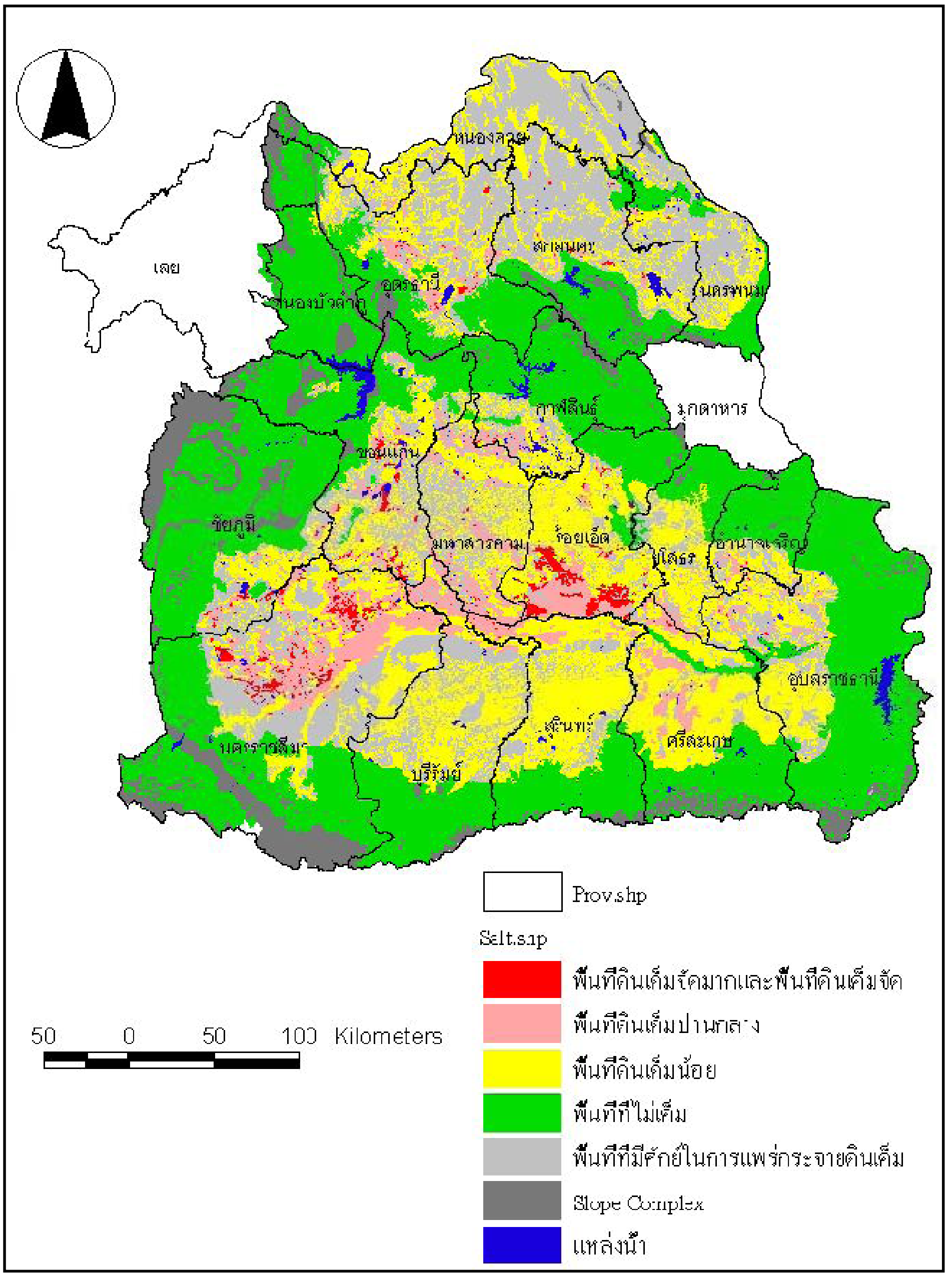
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาที่สำคัญของการใช้ประโยชน์ที่ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือคือปัญหาดินเค็ม ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง หรือไม่สามารถเพาะปลูกได้ ทำให้เกิดพื้นที่ว่างเปล่าไม่สามารถใช้ประโยชน์ เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีเกลือหิน (หมวดหินมหาสารคาม) กระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณตอนกลางของที่ราบสูงโคราช อยู่ในระดับความลึกตั้งแต่ 50 เมตร ไปจนถึง 1,000 เมตร เกลือหินนี้เป็นสาเหตุทำให้น้ำใต้ดินในระดับลึกเค็มจัด ความเค็มถูกพาขึ้นมาในระดับตื้นจากการซึมขึ้นมาของน้ำใต้ดินเค็ม ซึ่งเกิดจากการละลายของเกลือที่อยู่ในเกลือหิน น้ำฝนที่ซึมลงในพื้นที่รับน้ำ (recharge area) สามารถซึมลงลึกถึงชั้นเกลือหินและละลายเอาเกลือไปด้วย เมื่อน้ำใต้ดินเค็มเหล่านี้ไหลซึมขึ้นมาใกล้ผิวดินบริเวณ พื้นที่เกิดการไหลของน้ำ (discharge area) ซึ่งส่วนใหญ่ระดับน้ำจะไม่ลึกจากผิวดิน (5-10 ม.) น้ำใต้ดินที่เป็นน้ำเค็มซึ่งอยู่ในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และมีระดับน้ำใต้ดินระดับตื้นจะถูกแรงคาพิวลารี (capillary force) ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเหนือชั้นอิ่มตัวด้วยน้ำ ดึงดูดความชื้นและความเค็มขึ้นมาสะสมไว้ในช่องว่างและบางแห่งน้ำในดินที่เค็มจะถูกพาขึ้นมาสู่ผิวดินโดยการคายระเหยและทิ้งคราบเกลือไว้บนผิวดิน โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ดินเค็มประมาณ 17.8 ล้านไร่ หรือหนึ่งในสามของพื้นที่ทั้งภาค และพื้นที่มีศักยภาพในการแพร่กระจายของความเค็ม อีก 19.4 ล้านไร่ (Arunin, 1992) แสดงดังรูปที่ 1.1 จากอดีตถึงปัจจุบันมีการศึกษาหาสาเหตุของปัญหาดินเค็มอย่างกว้างขวาง และเสนอแนะวิธีการบรรเทาปัญหารูปแบบต่าง ๆ แต่การจัดการปัญหาดินเค็มที่เหมาะสม และยอมรับได้โดยเกษตรกร ยังมีการศึกษาน้อยและยังไม่เห็นผลที่ชัดเจน ซึ่งแต่ละวิธีมีความเหมาะสมแตกต่างกันตามสภาพพื้นที่ แต่มีวิธีที่ง่ายและสะดวกสำหรับเกษตรกร คือวิธีปรับสภาพผิวดินโดยการใช้ชีวมวลที่ถูกย่อยสลายแล้วรูปแบบต่าง ๆ เช่น การหมัก การเผา จนเป็นอินทรียวัตถุคลุมหน้าดินวิธีนี้จะช่วยลดการสูญเสียน้ำ เพิ่มอินทรียวัตถุและแร่ธาตุให้แก่ดิน และเก็บความชื้นให้ผิวดิน จึงทำให้ลดการเคลื่อนที่ของเกลือขึ้นมาบนผิวดินหรือบริเวณรากพืช จากแรงคาพิวลารี (ประสิทธิ ตันประภาส และ ไพรัช พงษ์วิเชียร, 2549)

ดังนั้นการเข้าใจปัจจัยกระบวนการหรือตัวแปรที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินโดยแรงคาพิวลารีซึ่งเป็นต้นเหตุของการแพร่กระจายดินเค็ม จึงเป็นประเด็นที่ควรศึกษาทำความเข้าใจเพื่อนำไปสู่แนวทางป้องกันการแพร่กระจายของดินเค็มได้ในที่สุด โดยงานวิจัยได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำในดินภายใต้กระบวนการคาพิวลารีในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 1.1 การแพร่กระจายดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2535)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษาการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของน้ำใต้ดินเพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของน้ำ 2 ชนิด คือ น้ำจืด และน้ำเค็ม ในดินสองชนิด คือ ดินทราย และดินร่วนปนทราย

2) ศึกษาการตัดกระบวนการคาพิวลารีด้วยการเพิ่มความชื้นบนผิวดิน

3) ประเมินแนวทางการแก้ไขปัญหาการเคลื่อนที่ของความเค็มในแนวดิ่ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาโดยการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในแนวดิ่งเท่านั้น โดยใช้ตัวอย่างดิน 2 ชนิด คือ ดินทราย ใช้ดินทรายชุมพวงนำมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ และดินร่วนปนทราย ใช้ดินจากบ้านหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปัญหาดินเค็มรุนแรง มีระดับของชั้นเกลือหินและระดับของน้ำใต้ดินอยู่ในระดับตื้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

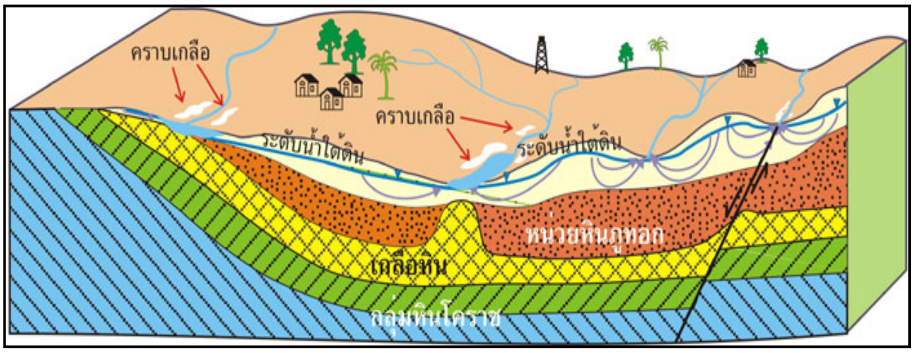
ผลการวิจัยนี้จะเป็นองค์ความรู้ในการเข้าใจการแพร่กระจายดินเค็มและปัจจัยที่ควบคุมการแพร่กระจายของความเค็มในแนวดิ่ง เพื่อนำไปประเมินแนวทางการแก้ไขปัญหาดินเค็มในพื้นที่ที่มีปัญหาน้ำใต้ดินเค็มและระดับน้ำใต้ดินอยู่ระดับตื้น

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดดินเค็มและการแพร่ของเกลือในพื้นที่ดินเค็ม

ดินเค็ม (saline soil) หมายถึง ดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือ (salt affected soil) หรือดินที่มีเกลือที่ละลายน้ำได้อยู่มากเกินไปจนมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยทั่วไปเกลือที่พบในดินเค็มมักเกิดจากการรวมตัวของธาตุที่มีประจุบวกพวกโซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม กับธาตุประจุลบ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต โซเดียคาร์บอเนต และบางกรณีจะพบในรูปของเกลือโซเดียมไนเตรท แมกนีเซียมซัลเฟต และ แมกนีเซียมคลอไรด์ (อรุณี ยูวะนิยม, 2525; ดิเรก ฮุ่นตระกูล, 2531)

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่พบปัญหาการแพร่กระจายดินเค็มมากที่สุด มีผู้เสนอทฤษฎีการเกิดขึ้นของดินเค็มไว้หลายทฤษฎี (Sinanuwong and Takaya, 1974a; 1974b; JICA, 1991; Kohyama et al., 1993) ส่วนใหญ่เห็นตรงกันว่า ความเค็มที่เกิดขึ้นเกี่ยวข้องกับชั้นเกลือหิน (หมวดหินมหาสารคาม) ที่ลึกลงไปอย่างน้อย 60 เมตร เกลือหินนี้เป็นสาเหตุทำให้น้ำใต้ดินในระดับลึกเค็มจัด (มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2551) และชั้นหินเกลือของหมวดหินมหาสารคามถูกดันตัวขึ้นมาเป็นโดมเกลือ หรือแท่งเกลือ ตามแนวเปราะบางของเปลือกโลก หรือรอยแตก โดยเฉพาะแนวในทิศทาง เหนือ-ใต้ และแนวตะวันตกเฉียงเหนือตะวันออกเฉียงใต้ บริเวณดังกล่าวพบว่ามีเกลืออยู่ที่ระดับลึกประมาณ 70-80 เมตร และได้รับอิทธิพลของน้ำบาดาลนำพาความเค็มขึ้นสู่ผิวดิน แสดงดังรูปที่ 2.1 (กรมทรัพยากรธรณี, 2548)



รูปที่ 2.1 ลักษณะทางธรณีวิทยากับแพร่กระจายของดินเค็ม (กรมทรัพยากรธรณี, 2548)

ความเค็มถูกพาขึ้นมาในระดับตื้นจากการซึมขึ้นมาของน้ำใต้ดินเค็มซึ่งเกิดจากการละลายของเกลือจากชั้นหินเกลือ พื้นที่ดินเค็มมักเกิดในที่ลุ่ม มีน้ำท่วมในฤดูฝน ส่วนใหญ่จึงเป็นนาข้าว สังเกตได้จากคราบเกลือบนผิวดินเป็นหย่อม ๆ ไม่สม่ำเสมอกันทั้งพื้นที่ และความเค็มในชั้นดินก็แตกต่างกันขึ้นกับฤดูกาลในฤดูฝนเกลือที่ดินชั้นบนจะถูกน้ำฝนชะลงไปในดินชั้นล่าง และคราบเกลือจะกลับขึ้นมาปรากฏที่ผิวดินใหม่ในช่วงแล้ง ในการจำแนกดินเค็มเพื่อทำแผนที่ดินเค็มจึงจำแนกจากการกระจายคราบเกลือบนผิวดินในช่วงแล้ง สมศรี อรุณินท์ (2539) สรุปว่า การเคลื่อนที่ของความเค็มในชั้นดินนำไปสู่การแพร่กระจายของดินในลุ่มน้ำ ขึ้นอยู่กับความเปลี่ยนแปลงปริมาณและเส้นทางการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินระหว่างผิวดิน และชั้นดินความเปลี่ยนแปลงนี้นอกจากผันแปรตามสภาพภูมิประเทศแล้ว ยังผันแปรตามสภาพภูมิอากาศและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การตัดไม้ทำลายป่าบนพื้นที่รับน้ำ ในปี พ.ศ.2504 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเคยมีป่าไม้ประมาณร้อยละ 41.9 ลดลงเหลือร้อยละ 12.4 ในปี พ.ศ.2541 (ธงชัย จารุพพัฒน์, 2541) ในสภาพที่ยังมีป่าไม้จำนวนมากปริมาณน้ำฝนที่ซึมลงในดิน และปริมาณน้ำใต้ดิน (น้ำจืด) ที่ถูกดูดซึมขึ้นมาโดยต้นไม้ในกระบวนการคายระเหยมีความสมดุล ทำให้ระดับน้ำใต้ดินเค็มคงที่ในระดับลึกจากผิวดิน แต่เมื่อจำนวนป่าไม้ลดลง ปริมาณน้ำใต้ดินที่ถูกใช้ในกระบวนการคายระเหยลดลง แต่ปริมาณน้ำฝนที่ซึมลงเติมน้ำใต้ดินคงเดิม จึงเป็นผลให้น้ำใต้ดินมีระดับสูงขึ้นจนใกล้ผิวดินในที่สุด ทำให้ที่ลุ่มซึ่งเป็นนาข้าวกลายเป็นดินเค็ม และความเค็มจะค่อย ๆ ทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ เช่น พื้นที่ดินเค็มในอำเภอขามทะเลสอ อำเภอด่านขุนทด อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา

การแพร่กระจายความเค็มเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ เกลือเคลื่อนที่ในแนวดิ่งจากดินชั้นล่างสู่ผิวดิน และการเคลื่อนที่ในแนวนอน ดังนั้นการหยุดการกระจายของความเค็ม จะต้องควบคุมการเคลื่อนที่ของเกลือทั้งสองทิศทาง วิธีการควบคุมแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ตามสภาพทางกายภาพเงื่อนไขธรรมชาติ และสภาพทางสังคมที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาที่ผ่านมาแนะนำว่า การแก้ไขปัญหาดินเค็ม ควรแบ่งออกเป็นระยะสั้นและระยะยาว (Arunin, 1984; Puengpen, 1992; Puengpen et al., 1993) การแก้ปัญหาระยะสั้น เช่น การใช้น้ำล้างเกลือออกจากเขตรากพืช การปรับปรุงดิน การปลูกพืชทนเค็ม สามารถทำได้ทันทีไม่ยากเกินไป และค่าใช้จ่ายไม่สูง เกษตรกรมีกำลังที่จะดำเนินการเองได้ ส่วนในระยะยาว เช่น การลดระดับน้ำใต้ดิน เป็นการจัดการระดับลุ่มน้ำที่ภาครัฐจะต้องเข้ามาดำเนินการ วิธีนี้เพื่อลดความชื้นในดินและตัดกระบวนการคาพิวลารีของน้ำเค็ม ไม่ให้เคลื่อนที่ขึ้นมาถึงผิวดินอาจใช้วัสดุมวลรวมหยาบ (Topark-Ngarm, 1998) แทรกในชั้นดินเพื่อป้องกันการเกิดกระบวนการคาพิวลารี ชัยนาม ดิสถาพร (2532) ศึกษาการเคลื่อนที่ของเกลือภายใต้ทุ่งหญ้า โดยเปรียบเทียบกับพื้นที่ว่างเปล่าพบว่าในบริเวณพื้นที่ว่างเปล่ามีการสะสมของเกลือสูงกว่า เนื่องจากบริเวณที่มีหญ้าปกคลุม ดินมีการซึมน้ำสูงกว่าทำให้เกิดการชะล้างเกลือดีกว่า และ

ป้องกันการระเหยจากผิวดินได้ดีกว่า ซึ่งช่วยให้มีการควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวดินของน้ำเกลือโดยกระบวนการคาพิวลารีได้ ประสิทธิ์ ตันประภาส และ ไพรัช พงษ์วิเชียร (2549) ศึกษาการฟื้นฟูดินเค็มด้วยการปลูกหญ้าแฝกในพื้นที่ดินเค็มที่มีคราบเกลือในอำเภอพระยืน จังหวัดขอนแก่น ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ในพื้นที่ดินเค็ม ผลของการปลูกหญ้าแฝกและสับกลบหญ้าแฝกลงดิน พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของดินลดลง ลดการเคลื่อนที่ของเกลือขึ้นบนผิวดิน และยังเป็นการเพิ่มอินทรียวัตถุให้แก่ดินด้วย

2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำในดิน

2.2.1 ความชื้นดิน (soil moisture)

ความชื้นดิน หมายถึง น้ำทั้งที่อยู่ในสถานะของเหลวและไอน้ำในดิน ส่วนคำว่าน้ำในดิน (soil water) หมายถึง เฉพาะน้ำในสถานะของเหลวในดิน การแสดงปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนัก เป็นการแสดงโดยการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของความชื้นในดินกับน้ำหนักของดินอบแห้ง วิธีตรงที่สุดที่จะหาน้ำหนักของความชื้นและน้ำหนักดินอบแห้ง คือการชั่งน้ำหนักดินขณะชื้นและหลังอบแห้ง ความแตกต่างของน้ำหนักที่ได้จากการชั่งทั้งสองครั้งนี้ คือน้ำหนักความชื้นดิน น้ำหนักดินอบแห้งคือน้ำหนักดินที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ ปริมาณความชื้นดินโดยน้ำหนัก สามารถแสดงเป็นสัดส่วนของน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักดินอบแห้งโดยตรงเช่น กรัม/กรัม อาจแสดงเป็น ร้อยละโดยน้ำหนัก (gravimetric moisture content, *w*) ก็ได้ร้อยละโดยน้ำหนักคือสัดส่วนของน้ำหนักความชื้น คิดเป็น ร้อยละของน้ำหนักดินอบแห้ง

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \qquad (2.1)$$

เมื่อ w คือ ความชื้นดินโดยน้ำหนัก ,%

W_w คือ น้ำหนักน้ำ

W_s คือ น้ำหนักดินแห้ง

นอกจากจะคิดความชื้นดินโดยน้ำหนักแล้ว ยังสามารถคิดเป็นร้อยละของปริมาตรน้ำได้ด้วยเรียกว่า ความชื้นโดยปริมาตร (volumetric moisture content, θ) หมายถึงปริมาตรน้ำที่มีอยู่ในดินต่อปริมาตรทั้งหมดของดิน ตัวอย่างดินที่นำมาหาความชื้นโดยปริมาตรเป็นตัวอย่างชุดเดียวกันกับตัวอย่างดินที่ใช้หาความชื้นโดยน้ำหนัก โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (Scott, 2000)

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = w\frac{\rho_b}{\rho_w} \tag{2.2}$$

เมื่อ θ คือ ความชื้นดินโดยปริมาตร, %

V_w คือ ปริมาตรน้ำ

V_t คือ ปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างดิน

ρ_b คือ ความหนาแน่นของดินรวม

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ

2.2.2 การวัดความชื้นในดิน

ความชื้นโดยปริมาตรยังสามารถวัดด้วยหัววัดความชื้น (sensor) ซึ่งเป็นวิธีวัดค่าความชื้นทางไฟฟ้า (electrical method) ด้วยการวัดค่า dielectric constant และยังแบ่งวิธีการหาความชื้นออกเป็น 3 วิธี คือ (1) Time Domain Reflectometer method : TDR (2) Frequency Domain Reflectometer method : FDR และ (3) Amplitude Domain Reflectometer method : ADR แสดงผลออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Topp et al., 1980) ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาหัววัดความชื้น ให้สามารถวัดค่าความเค็มของดินพร้อมไปกับวัดค่าความชื้น โดยการแปลงค่า dielectric constant เป็นค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) เพราะค่าความเค็มของดินแสดงในรูปของค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น ค่าความเค็มมีหน่วยเป็นเดซิซีเมนต่อเมตร (dS/m) แต่อย่างไรก็ตาม การวัดความชื้นของดินภายใต้เงื่อนไขที่มีความเค็ม หัววัดมักจะถูกจำกัดด้วยชนิดของดิน ปริมาณความเค็ม และความหนาแน่นของดิน ดังนั้นเมื่อใช้หัววัดความชื้น ในการวัดความชื้นของดินจำเป็นจะต้องสอบเทียบอุปกรณ์ก่อน เพราะความเค็มจะทำให้ค่าความชื้นที่วัดได้มีปริมาณมากเกินความเป็นจริง (Inoue et al., 2008)

2.2.3 การวัดค่าความเค็ม

โดยทั่วไปการวัดค่าความเค็มของดินจะวัดทางอ้อมด้วยการวัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) เรียกย่อ ๆ ว่า EC เป็นค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่สกัดจากดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (electrical conductivity at saturation extract, Ece) การวัดค่าความเค็มของดินสามารถใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity meter) เนื่องจากการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเกลือในน้ำ เพื่อความสะดวกอาจต้องใช้อัตราส่วนของดินต่อน้ำเช่น 1:2 หรือ 1:5 การวัดค่าการนำไฟฟ้าจึงทำให้ประมาณค่าเกลือละลายในน้ำที่สกัดออกมาจากดินได้ ซึ่งจะใช้เป็นดัชนีของความเค็มดังตารางที่ 2.1 อย่างไรก็ดีค่าการนำไฟฟ้าไม่ได้บอกให้ทราบถึงชนิดของเกลือในสารละลาย บอกเพียงว่ามีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของเกลือในสารละลายเท่านั้น โดยคิดเทียบที่

อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาหัววัดความเค็มในดินเพื่อความสะดวกในการวัดค่าความเค็มของดินในสนาม โดยสามารถวัดค่า EC ในดินจากสนามได้โดยตรง

ตารางที่ 2.1 ระดับความเค็มของดินและอิทธิพลต่อพืช (US Soil Salinity Laboratory Staff, 1954)

ECe (dS/m)	ปริมาณเกลือ (%)	ระดับความเค็ม	อิทธิพลต่อพืช
<2	<0.1	ไม่เค็ม	ไม่กระทบกระเทือนต่อพืช
2-4	0.1-0.2	เค็มเล็กน้อย	พืชที่ไวต่อความเค็มการเจริญเติบโตลดลงบ้าง
4-8	0.2-0.4	เค็มปานกลาง	จำกัดการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8-16	0.4-0.8	เค็มมาก	พืชทนเค็มเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี
>16	>0.8	เค็มจัด	พืชทนเค็มบางชนิดเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี

2.2.4 แรงดึงดูดน้ำในดิน (soil suction or total suction, ψ)

แรงดึงดูดน้ำในดิน คือ แรงดูดยึดที่ดินมีกับน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความชื้นในดินลดลง และเมื่อช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมีขนาดเล็กลง น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน จะอยู่ใต้สภาวะแรงดึงดูดที่เรียกว่า แรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิวลารี (matric or capillary suction, $(u_a - u_w)$) และแรงดึงดูดออสโมทิก (osmotic suction, π) คือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินด้วย โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากความสามารถในการดูดน้ำหาตัวเองด้วยได้มากด้วย (Fredlund and Rahardjo, 1993) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.3 โดยที่ u_a คือ แรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ u_w คือ แรงดันน้ำในดิน

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \qquad (2.3)$$

โดยสามารถหาแรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิวลารีได้ด้วยหม้อแรงดัน (Pressure plate) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02 ทดสอบหาค่าแรงคาพิวลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงคาพิวลารี (Soil Water retention Characteristic Curve : SWCC)

2.2.5 สมดุลความชื้น

การซึมของน้ำ (infiltration) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายนอกผิวดินเข้าสู่ดินทางผิวดิน ดังจะเห็นได้จากการให้น้ำโดยระบบชลประทานหรือการที่ฝนตก น้ำเหล่านี้ไหลซึมลงในดินด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก อัตราการซึมของน้ำในดินขึ้นอยู่กับ ระดับความชื้นของดิน ลักษณะโครงสร้างของเนื้อดินและผิวดิน อัตราการขยายตัวของแร่ดินเหนียวและอินทรียวัตถุในดิน และเสถียรภาพของโครงสร้างดิน

การคายระเหย (evaportranspiration) เป็นการสูญเสียน้ำจากการระเหย (evaporation) และการระเหยจากการคายน้ำของพืช (transpiration) การสูญเสียน้ำของทั้งสองขบวนการนี้รวมเรียกว่า การคายระเหย เป็นการสูญเสียน้ำของดินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติอยู่เสมอ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการคายระเหยที่สำคัญ คือสภาพภูมิอากาศ เช่น แสงแดด อุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ พืชพรรณ และลมเป็นต้น ส่วนปัจจัยอื่นได้แก่ ปริมาณของน้ำในดิน การพัดพาไอน้ำออกจากผิวน้ำสู่ผิวดิน และสิ่งที่ปกคลุมผิวดิน

สมดุลความชื้นในดิน (soil moisture balance) คือรายการที่แสดงปริมาณของน้ำที่ดินจะได้รับจากแหล่งต่าง ๆ เปรียบเทียบกับปริมาณของน้ำที่ดินต้องสูญเสียและปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่ในดิน การพิจารณาว่าสมดุลความชื้นในดิน มีองค์ประกอบอะไรบ้าง แต่ละองค์ประกอบสามารถจัดการได้เพียงใดจะช่วยให้เข้าใจถึงหลักการจัดการเพื่อลดปัญหาความแห้งแล้งได้ดุลย์ความชื้นดินในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ แสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$W = (P - R) - (E + T + D) \tag{2.4}$$

เมื่อ W คือ การเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นดิน

P คือ ปริมาณน้ำฝน

R คือ ปริมาณน้ำไหลบ่าบนผิวดิน (runoff)

E คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยจากดิน (evaporation)

T คือ ปริมาณน้ำที่พืชคาย (transpiration)

D คือ ปริมาณน้ำที่ซึมลึกลงพ้นเขตรากพืช

ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ใกล้ผิวดิน และมีการซึมของน้ำใต้ดินขึ้นสู่เขตรากพืช D ในสมการนี้มีค่าเป็นลบ $(P - R)$ เป็นปริมาณน้ำที่ดินได้รับจากผิวดิน เกิดจากปริมาณน้ำฝนที่ซึมลงมาจากผิวดิน ลบด้วยส่วนเกินการซึมที่เป็นน้ำไหลผิวดิน $(E + T + D)$ เป็นปริมาณน้ำที่ดินสูญเสีย ค่า T คิดเฉพาะส่วนที่คายน้ำของพืชเท่านั้น พืชใช้เพื่อการสังเคราะห์แสงและการเติบโต

ส่วน E คือส่วนที่คายโดยวัชพืชเป็นการสูญเสียไปโดยไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชที่ปลูก จากการพิจารณาดุลย์ความชื้น จะเห็นว่าหลักสำคัญของการจัดการเพื่อลดโอกาสการขาดความชื้นดินประกอบด้วย

1) การเพิ่มปริมาณน้ำแทรกซึมเข้าในดิน (เพิ่ม $(P-R)$)

2) การลดการสูญเสียน้ำจากดินโดยไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชที่เราปลูก $(E+T+D)$)

3) การเพิ่มความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (เพิ่มขนาดของ W)

ยุทธลักษณ์ ชูวรเชษฐ์ (2548) ได้ศึกษาระดับของความเค็มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) การสำรวจและจำแนกประเภทของดิน (2) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน และ (3) การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเค็มซึ่งแบ่งย่อยออกเป็น การทดสอบหน่วยแรงเฉือนของดิน การทดสอบการบดอัด การหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ และการทดสอบหาระดับการกระจายตัวของดิน ได้ทำการสำรวจโดยรอบพื้นที่ทำนาเกลือในเขตอำเภอบ้านดุง จังหวัดอุดรธานี เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการทำนาเกลือต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มในดินโดยเฉพาะบริเวณเลียบทางหลวงหมายเลข 2096 (บ้านดุง-บ้านม่วง) พบว่าการทำนาเกลือทั้งวิธีตากและวิธีต้มตลอดแนวถนนเป็นระยะทางยาวไปโดยตลอด จากการสำรวจสามารถประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน และมีผลการทดสอบค่าความซึมน้ำของดินดังนี้

1) เมื่อระดับความเค็มของดินมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (hydraulic conductivity, k) ของดินมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการทดสอบให้น้ำไหลผ่านดินที่มีเกลืออยู่ภายในย่อมส่งผลให้เกิดการละลายของเกลือเหล่านั้นเกลือซึ่งเคยอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจึงละลายออกมากับน้ำ ทำให้เกิดโพรงต่อเนื่องขึ้นในมวลดิน และดินที่มีเกลืออยู่มากก็จะถูกชะล้างเกลือออกมามาก จึงทำให้เกิดช่องว่างในดินมากกว่าและทำให้ค่า k มากกว่าด้วยเช่นกัน

2) เมื่อระดับความเค็มของดินมากขึ้นอัตราการชะล้างเกลือในดินจะมากขึ้น และเมื่อใช้เวลาในการทดสอบเท่ากัน (ประมาณ 7 วัน) จึงทำให้มีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่างดินมีปริมาณมากกว่า ส่งผลให้มีการละลายเกลือในมวลดินให้ไหลออกมากับน้ำมากกว่าด้วย

ประทีป ดวงเดือน (2531) อธิบายว่าพฤติกรรมของมวลดินจะขึ้นอยู่กับสถานะความเหลวเป็นสำคัญโดยความเป็นพลาสติกซิตี้ของดินมีสาเหตุมาจากบริเวณรอบ ๆ ผิวเม็ดดินมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ และดึงดูดโมเลกุลของน้ำที่มีทั้งประจุบวก และลบ (bi-polar) ทำให้น้ำเกาะติดที่ผิวมีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ ชั้นน้ำที่เกาะติดผิวดินเรียกว่าแอดซอบ (adsorbed water) ส่วนชั้นที่ถัดออกไปเรียกว่าวิสคอส (viscous water) โดยน้ำทั้งสองชั้น (double layer) จะเป็นชั้นน้ำที่ได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และชั้นนอกสุดจะเป็นชั้นน้ำอิสระ (free water) โดยถ้าในมวลดินมี

น้ำน้อย น้ำจะเกาะอยู่เฉพาะผิวของเม็ดดิน และทำหน้าที่เป็นน้ำแอดซอบเพื่อยึดดินให้ติดกัน แต่ถ้าน้ำมากขึ้นจะทำให้ความหนาของชั้นน้ำรอบผิวเม็ดดินเพิ่มขึ้นเป็นน้ำวิสคอส ซึ่งปริมาณส่วนนี้จะมีความหนืดสูง และถ้าในดินมีน้ำมากเกินจากน้ำวิสคอสเป็นน้ำอิสระแล้ว ความหนืดจะลดลงทำให้ดินสามารถไหลได้

Petrukhin (1993) พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพและการไหลผ่านของน้ำเค็มในดินนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเกลือที่อยู่ภายในมวลดิน นอกจากนี้แล้วสถานะของเกลือที่อยู่ภายในมวลดินก็ยังส่งผลถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินเค็มอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเกลือที่ละลายจะเข้าแทรกอยู่ในช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างอนุภาคของดิน และจะมีการแตกตัวเพื่อแลกประจุบวก (cation) ซึ่งจะทำให้ดินเกิดการกระจายตัวและเกิดการไฮเดรชันขึ้น

2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของน้ำและมวลเกลือในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

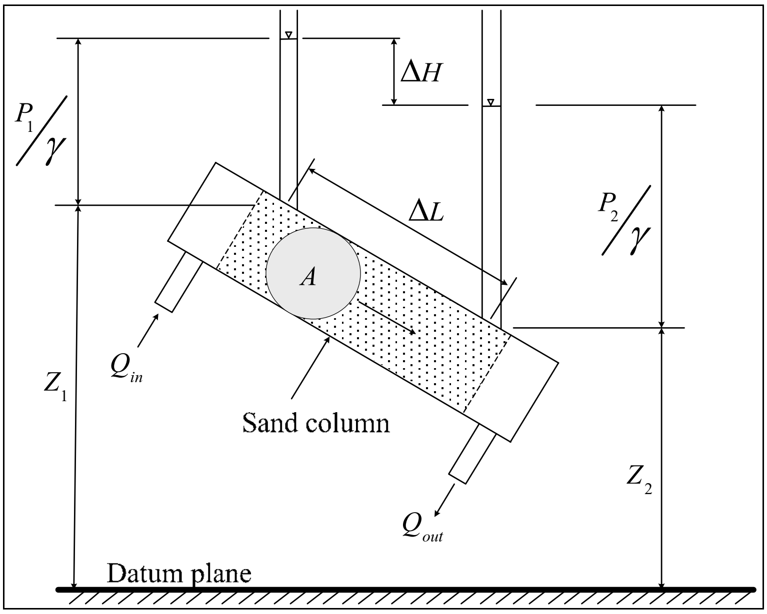
ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของน้ำและมวลเกลือในดินไม่อิ่มตัวสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน ตามลักษณะประเภทของการเคลื่อนที่

2.3.1 ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (theory of soil water flow) ในส่วนนี้ประกอบไปด้วย สมการดาร์ซี่-บักกิงแฮม (darcy-buckingham equation) ซึ่งอธิบายถึงหลักการการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านวัตถุพรุนโดยพิจารณาผลของค่าความแตกต่างเฮดของน้ำเทียบกับระยะการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุพรุน ในปี ค.ศ.1856 จากการทดลองให้น้ำผ่านทรายดังรูปที่ 2.2 พบว่าอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ (Q) มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดของการเคลื่อนที่ (A) และค่าแตกต่างระหว่างเฮดของน้ำที่บริเวณเข้าและออก (ΔH) และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะทางที่เคลื่อนที่ (ΔL) ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = KA\frac{\Delta H}{\Delta L} \tag{2.5}$$

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ (q) จะได้

$$q = \frac{Q}{A} = K\frac{\Delta H}{\Delta L} \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.2 หลักการของดาร์ซี (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

เรียกสมการที่ 2.6 ว่า กฎของดาร์ซี (Dracy's law) ซึ่งใช้กับการไหลในตัวกลางที่อิ่มตัวด้วยน้ำ กรณีการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ Buckingham (1907) ได้ประยุกต์ใช้กฎของดาร์ซี่สำหรับการไหลในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีรูปสมการ คือ

$$q = -K_u i \tag{2.7}$$

เมื่อ i คือเกรเดียนต์ชลศาสตร์ ($\dfrac{\Delta H}{\Delta L}$) และ K_u คือสภาพนำชลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นของดิน (θ) หรือเฮดแรงดัน (h_p) เขียนได้เป็น

$$K_u = K(\theta) \tag{2.8}$$

หรือ

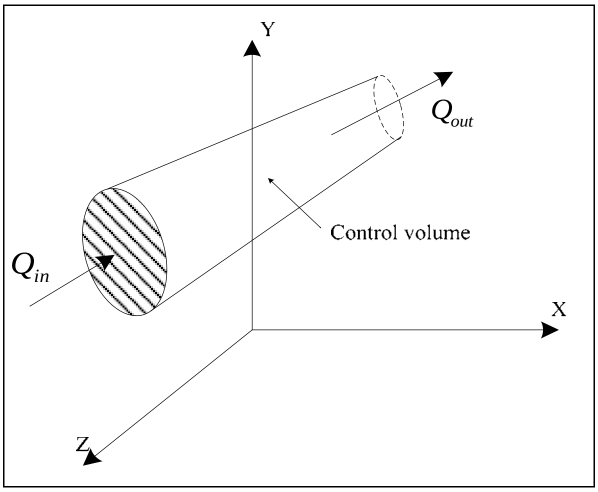
$$K_u = K(h_p) \tag{2.9}$$

สมการริชาร์ดส์ (Richards equation) จากกฎทรงมวลซึ่งกล่าวว่าสสารย่อมไม่สูญหายนั้นในปริมาตรควบคุม (control volume) อัตราไหลเข้าของมวลของน้ำลบด้วยอัตราการไหลออก ต้องเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ถ้าพิจารณาว่ามวลนี้ คือน้ำซึ่งเป็นของเหลวที่กดอัดไม่ได้ (incompressible fluid) พิจารณาปริมาตรแทนมวล ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังรูปที่ 2.3 ในช่วงระยะเวลา Δt สมการริชาร์ดส์เป็นสมการสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางพรุนหรือดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเมื่ออยู่ในสถานะไม่คงตัว (unsteady flow) และเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ลำดับที่สอง (second-order) แบบพาราโบริค (parabolic) ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) เมื่อเขียนในรูปการไหลใน 3 มิติจะได้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial H}{\partial z} \right) \tag{2.10}$$

เมื่อ K คือ ฟังก์ชันของความชื้นหรือเฮดความดัน

H คือ เฮดทางชลศาสตร์



รูปที่ 2.3 อัตราการไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุม (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

2.3.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของมวลสาร (theory of mass transport) เมื่อน้ำและตัวละลายเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางพรุนหรือดินจะเกิดปรากฏการณ์ 3 อย่างพร้อมกัน คือ

1) การเคลื่อนที่ด้วยการพา (advection) คือกระบวนการซึ่งมวลของตัวละลายเคลื่อนที่ไปกับน้ำในความเร็วเฉลี่ยเท่ากัน ในขณะที่สารละลายไหลผ่านตัวกลางพรุน

อัตราการเคลื่อนที่ของมวลสารต่อหน่วยพื้นที่จึงมีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ หรือสารละลาย ต่อหน่วยพื้นที่คูณด้วยความเข้มข้นของตัวละลาย จะได้

$$J_c = qC \quad (2.11)$$

เมื่อ J_c คือ อัตราการเคลื่อนที่ด้วยการพาของมวลสารต่อหน่อยพื้นที่
q คือ อัตราการไหลของสารละลายต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล
C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

ซึ่งคิดจากมวลของตัวละลายต่อหน่วยปริมาตรของสารละลายการประมาณระยะทางที่ตัวละลายเคลื่อนที่ไปต่อหน่วยเวลานั้นสามารถพิจารณาได้จาก ความเร็วเฉลี่ยของสารละลาย (average apparent velocity, v) หมายถึงความเร็วการไหลเชิงเส้นเฉลี่ยที่เกิดจากการไหลของสารละลายเฉพาะในโพรงที่มีการไหลเท่านั้น

$$v = \frac{q}{\theta} \quad (2.12)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วจริงการไหลเฉลี่ย
q คือ อัตราการไหลของสารละลายต่อหน่วยพื้นที่
θ คือ ความชื้นโดยปริมาตร

เพราะฉะนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่ของสารละลายด้วยการพาคือ

$$J_c = v\theta C \quad (2.13)$$

2) การเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) ของตัวละลาย คือกระบวนการเคลื่อนที่ของมวลสารตัวละลายในตัวกลางจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การแพร่ของตัวละลายในน้ำ เป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของฟิก (Fick’s first law) กล่าวไว้ว่าปริมาณการแพร่ของตัวละลายต่อหน่วนพื้นที่แปรผันตาม เกรเดียนต์ (gradient) ของความเข้มข้นของมวลสาร ซึ่งอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อระยะการแพร่ออกไป ดังสมการต่อไปนี้

$$J_d = -D_s \frac{d(\theta C)}{dx} \tag{2.14}$$

เมื่อ J_d คือ อัตราการแพร่ของตัวละลายต่อหน่วยพื้นที่

D_s คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวละลายที่อยู่ในน้ำในดินซึ่งเป็นฟังก์ชั่นความชื้น (θ)

3) การเคลื่อนที่จากการกระจาย (dispersion) เกิดจากการไหลของสารละลายในช่องการไหลที่มีขนาดและรูปร่างของช่องการไหลที่แตกต่างกัน ทำให้ความเร็วและทิศทางการไหลที่แต่ละตำแหน่งมีความแตกต่าง เบี่ยงเบนจากค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำในช่องการไหล ซึ่งการเคลื่อนที่เนื่องจากการกระจายสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่คล้ายคลึงกับสมการที่ 2.14 ของการเคลื่อนที่ของมวลสารเนื่องจากการแพร่ ดังนี้

$$J_h = -D_h \frac{d(\theta C)}{dx} \tag{2.15}$$

เมื่อ J_h คือ อัตราการเคลื่อนที่ต่อหน่วยพื้นที่เนื่องจากการกระจาย

D_h คือ สัมประสิทธิ์การกระจาย ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วการไหล (v) ดังนี้

$$D_h = \lambda v^n \tag{2.16}$$

โดย λ คือ ค่าสภาพการกระจาย (dispersivity) ซึ่งสำหรับการทำการทดลองส่วนมากทดสอบในห้องปฏิบัติการกับตัวอย่างดินแบบรบกวน (disturbed) และตัวอย่างดินแบบ uniform field soils จะได้ว่า λ มีค่าประมาณ 1 เซนติเมตร หรือน้อยกว่า และ n คือ ค่าคงที่การทดลองมีค่าประมาณเท่ากับ 1

2.3.3 สมการการเคลื่อนที่ของมวลเกลือ สัมประสิทธิ์การแพร่และสัมประสิทธิ์การกระจายมักถูกรวมเข้าเป็นตัวเดียวกัน เรียกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (diffusion-dispersion coefficient, D) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้น (θ) และความเร็วการไหลเฉลี่ยของสารละลาย (v) ดังนี้

$$D(\theta, v) = D_s(\theta) + D_h(\theta, v) \tag{2.17}$$

ดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่ของมวลสาร (mass transport, J) เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวละลายจากทั้งสามกระบวนการที่กล่าวแล้วข้างต้น ทำให้สามารถหาสมการการเคลื่อนที่ของมวลสารได้โดยการรวมสมการทั้ง 3 สมการคือ (2.13) (2.14) (2.15)

$$J = J_c + J_d + J_h$$
$$J = v\theta C - D_s(\theta)\frac{d(\theta C)}{dx} - D_h(\theta, v)\frac{d(\theta C)}{dx} \qquad (2.18)$$

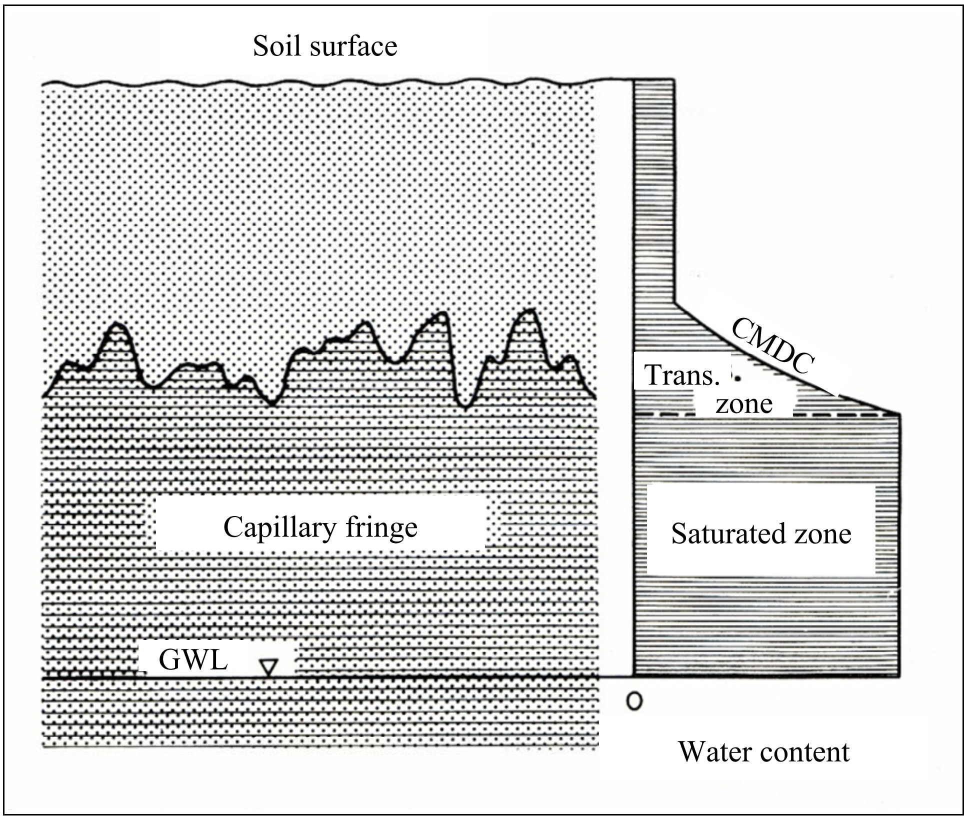
จากเงื่อนไขของสมการ (2.17) ทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของมวลสารดังนี้

$$J = v\theta C - D(\theta, v)\frac{d(\theta C)}{dx} \qquad (2.19)$$

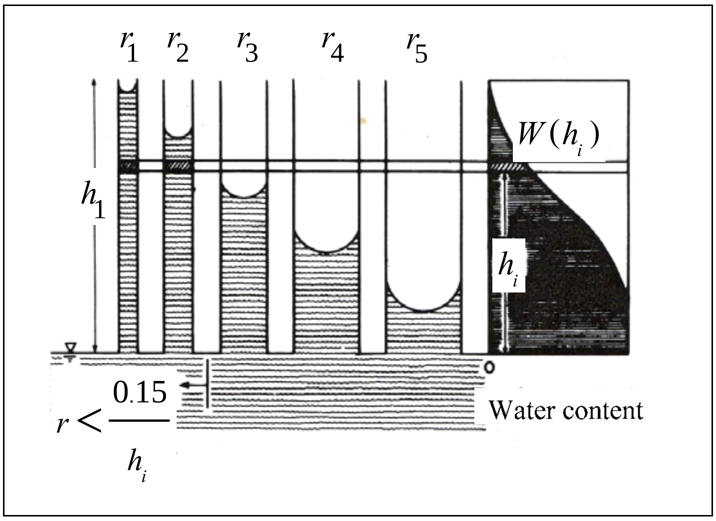
เมื่อ J คือ ปริมาณมวลสารเคลื่อนที่ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของดินต่อหน่อยเวลา

2.4 กระบวนการคาพิวลารีในดิน (Capillary water in soil)

กระบวนการคาพิวลารี (Shingo et al., 1988) ในดินเกิดขึ้นเหนือระดับน้ำใต้ดิน เป็นปรากฏการณ์ที่รู้จักกันเป็นอย่างดี โดยจะอธิบายในรูปของโค้งการกระจายตัวของความชื้นแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งถูกเรียกว่า Capillary Moisture Distribution Curve : CMDC สังเกตได้ว่าเหนือระดับน้ำใต้ดินจะมีช่วงอิทธิพลของแรงคาพิวลารีทำให้เกิดความชื้นเคลื่อนที่ขึ้น และยังแบ่งเป็นส่วนอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated zone) และ ส่วนเปลี่ยนผ่าน (transition zone)



รูปที่ 2.4 โค้งการกระจายตัวความชื้นเหนือระดับน้ำใต้ดิน และ CMDC (Shingo et al., 1988)

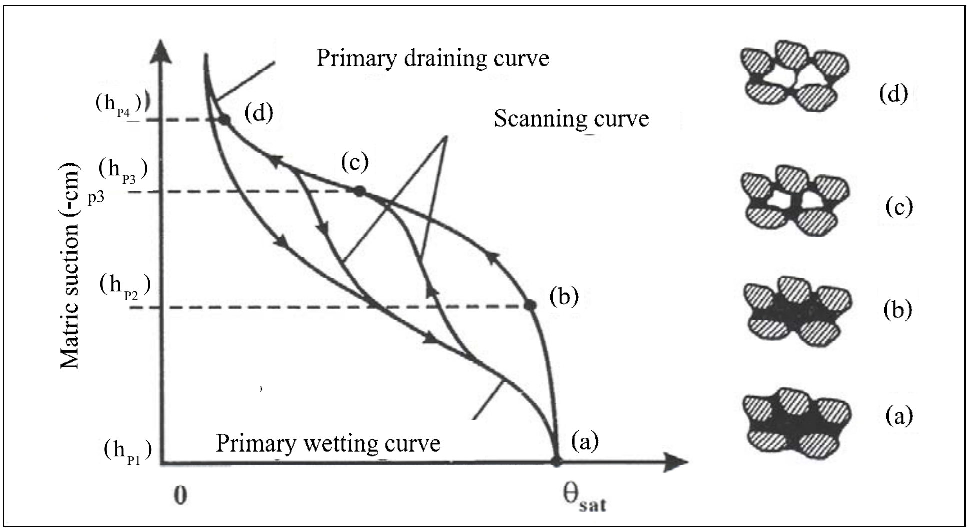


รูปที่ 2.5 แบบจำลองความไม่สม่ำเสมอของช่วงคาพิวลารีเพื่ออธิบาย CMDC (Shingo et al., 1988)

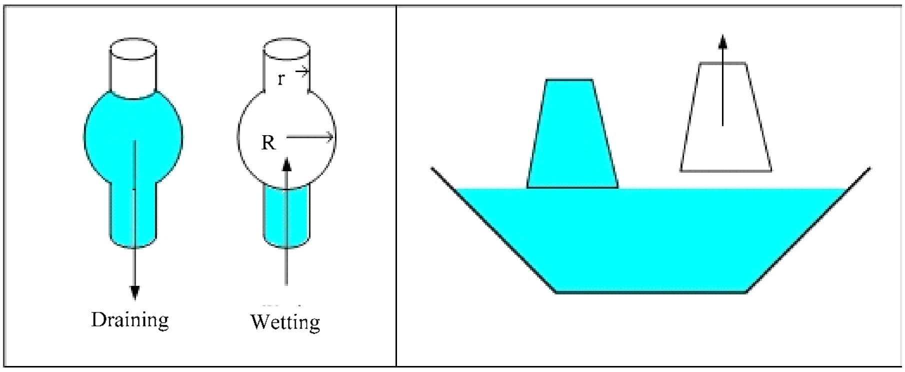
ดินในส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และส่วนเปลี่ยนผ่านถูกเชื่อมต่อกันน้ำใต้ดินและมีการเปลี่ยนแปลงระดับที่อยู่กับความผันผวนของระดับน้ำใต้ดิน ซึ่งเรียกทั้งสองส่วนว่า ช่วงคาพิวลารี (capillary fringe) ซึ่งกระบวนการนี้มีการแปรผันตามขนาดของช่องว่างตามแบบจำลองที่แสดงดังรูปที่ 2.5 และสามารถอธิบายถึงความสูงของช่วงคาพิวลารี (capillary rise) ในส่วนไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ได้จากสมการดังนี้

$$h = \frac{0.3}{d} \tag{2.20}$$

เมื่อ d คือ ขนาดของท่อ (cm) ที่ทุก ๆ ความสูง h_i ระดับความสูงคาพิวลารีของน้ำในดิน h_c มีความสัมพันธ์แปรผกผันกับขนาดของอนุภาคเม็ดดิน (ϕ) ซึ่งจะถูกอธิบายด้วย ความไม่ซ้ำรอย (hysteresis) ของโค้งลักษณะความชื้นของดิน ซึ่งเป็นโค้งที่เขียนขึ้นจากความสัมพันธ์ของเฮดความดัน (metric suction) กับความชื้นที่เกิดขึ้นจากดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.6 เมื่อดินมีลักษณะความชื้นลดลงหรือเรียกว่ากระบวนการแห้งลง (drying process) คือ ดินเริ่มต้นจากสภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (a) แล้วความชื้นเริ่มลดลงเรื่อย ๆ จาก (b) (c) จนถึง (d) ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความชื้นอีกครั้ง การลดลงของเฮดความดันเทียบกับความชื้นจะไม่สัมพันธ์กันเหมือนกับตอนลดความชื้นสาเหตุหลักในการเกิดปรากฏการณ์ความไม่ซ้ำรอย เนื่องมาจากขนาดของโพรงช่องว่างในดินจะเป็นต้นเหตุที่มีอิทธิพลต่อผลการเกิดปรากฏการไม่ซ้ำรอย ถ้าโพรงช่องว่างในดินมีขนาดใหญ่จะเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (water moment) และในทางตรงกันข้ามถ้าโพรงช่องว่างในดินมีขนาดเล็กก็จะเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมกระบวนการระบายน้ำ (draining processes) ในดินเช่นกัน ผลกระทบที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ความไม่ซ้ำรอยหลัก ๆ ที่สำคัญได้แก่ผลของขวดน้ำหมึก (ink bottle effect) ในความแตกต่างของขนาดโพรงช่องว่างในดิน เมื่อดินแห้งลงน้ำยังคงค้างอยู่ในโพรงขนาดเล็ก ทำให้น้ำในดินไม่สามารถระบายออกมาได้ ส่วนเมื่อดินชื้นขึ้นโพรงที่มีขนาดใหญ่ จะเป็นตัวสกัดกั้นไม่ยอมให้น้ำในดินเคลื่อนที่ขึ้นตามแรงคาพิวลารีและผลของรอยต่อเครือข่าย (network effects) คือ ลักษณะของการเคลื่อนที่เข้าออกของน้ำในโพรงช่องว่างของดิน ยกตัวอย่างเช่นเวลาเรายกแก้วน้ำที่คว่ำจมอยู่ในน้ำเต็มขึ้น น้ำจะตามแก้วขึ้นมาด้วย จนกว่าปากแก้วจะพ้นจากผิวน้ำ ในทำนองเดียวกันเมื่อระบายน้ำออกจากดินโพรงขนาดใหญ่ในดินก็จะระบายน้ำออกได้จนกว่าอากาศจะไหลเข้าไปในโพรงนั้นก่อนดังแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ปรากฏการความไม่ซ้ำรอยของโค้งลักษณะความชื้นของดิน (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)



รูปที่ 2.7 ผลของขวดน้ำหมึกและผลของเครือข่าย (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

ศุภสิทธิ์ คนใหญ่ (2552) ประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (D) และค่าตัวประกอบความหน่วง (R) ในพื้นที่ดินเค็มเขตบ้านนาเพีย ตำบลนาเพีย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น สามารถทำได้โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งทดลองโดยการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำเกลือด้วยแรงคาพิวลารี ขึ้นไปตามช่องว่างของดินที่บรรจุในท่อ PVC ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 เมตร และความยาวท่อ 3 ขนาด คือ 1.0 1.5 และ 2.0 เมตร ตั้งในอ่างน้ำเค็มซึ่งใช้สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรท์ที่มีความเค็ม 150 dS/cm แสดงดังรูปที่ 2.8 แล้ววัดความชื้น [$\theta(x_i,t)$] และความเค็ม [$C(x,t)$] ในดินที่ระยะเวลา 1 7 14 21 และ 30 วัน ทดสอบหาค่า D และ R ที่ทำให้กราฟจากการคำนวณใกล้เคียงกับกราฟจากการทดลอง โดยใช้

สมการหาความเข้มข้นของสารละลายของ Danckwerts (1953) กระทั่งกราฟใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองมากที่สุด ในการจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลาย (solute transport) ความเร็วการไหล (flux velocity) ของการเคลื่อนที่ของสารละลายมีความสำคัญต่อการคำนวณค่า D และ R ดังนั้นในการคำนวณมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาและเข้าใจในหลักการของสมการที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เช่น สมการริชาร์ดส์ (Richards equation) สมการสมดุลน้ำ (water balance equation) และสมการการเคลื่อนที่ของสารละลาย (solution equation)

สมการสมดุลน้ำ

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \tag{2.21}$$

เมื่อ I คือ อัตราการไหลเข้า (Inflow)

O คือ อัตราการไหลออก (Outflow)

ΔS คือ ปริมาณเก็บกักที่น้ำเปลี่ยนแปลง

Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง

พิจารณารูปที่ 2.8 น้ำเคลื่อนที่ขึ้นด้วยแรงคาพิวลารีและสมมติให้อัตราการไหลออกที่ปลายบนสุด O_n เป็นศูนย์ หรือมีการระเหยออกจากแท่งดินน้อยมาก พิจารณาด้วยการแบ่งแท่งดินช่วง ๆ (section) จากสมการที่ 2.21 ΔS คือ ปริมาณเก็บกักที่น้ำเปลี่ยนแปลงจะมีค่าเท่ากับความชื้นที่เวลา t คือ $\theta_{n,t}$ ลบด้วยความชื้นที่เวลาเริ่มต้น $\theta_{n,0}$ จะได้ดังสมการที่ 2.22

$$I_n - O_n = \frac{(\theta_{n,t} - \theta_{n,0})A\Delta x}{\Delta t} \tag{2.22}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดในแท่งดิน และสมมติให้อัตราการไหลออกที่ปลายบนสุด O_n เป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้สมการ 2.23

$$I_n = \frac{(\theta_{n,t} - \theta_{n,0})A\Delta x}{\Delta t} \tag{2.23}$$

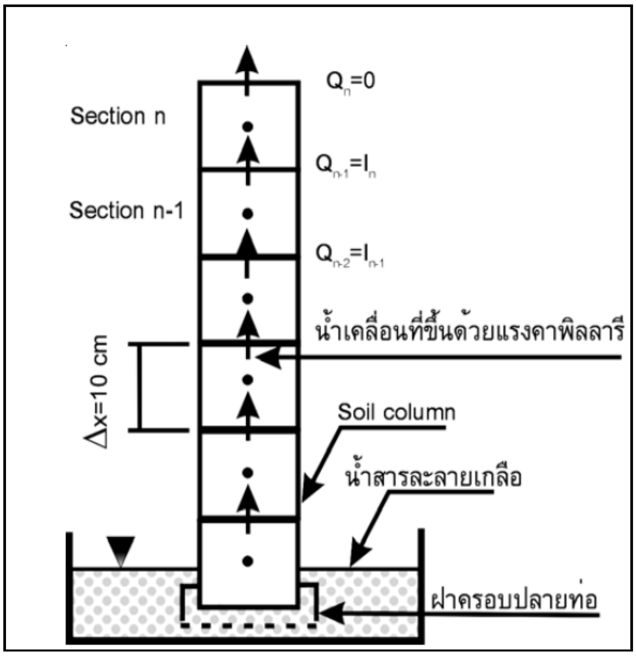
สมการการเคลื่อนที่ของสารละลาย

$$c(x,t) = 0.50erfc\left[\frac{Rx - vt}{2(DRt)^{1/2}}\right] \tag{2.24}$$

เมื่อ $c(x,t) = \dfrac{C(x,t) - C_i}{C_0 - C_i}$ โดยที่ $c(x,t)$ คือ ความเข้มข้นสัมพันธ์ที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t $C(x,t)$ คือ ความเข้มข้นที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ที่ได้จากการทดลอง C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในแท่งดิน (initial concentration in soil column) และ C_0 คือ สารละลายที่มีความเข้มข้นคงที่ โดยที่ *erfc (y)* คือ complementary error function ของ *y* ซึ่งเท่ากับ 1 ลบด้วย error function ของ y คือ *erfc (y)* =1- *erf (y)* และค่า *erf (y)* สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$erf(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y} dy \tag{2.25}$$

ค่าของ *erf(y)* และ *erfc(y)* สามารถหาได้จากสมการในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ เช่น Matlab หรือ Microsoft Excel เป็นต้น



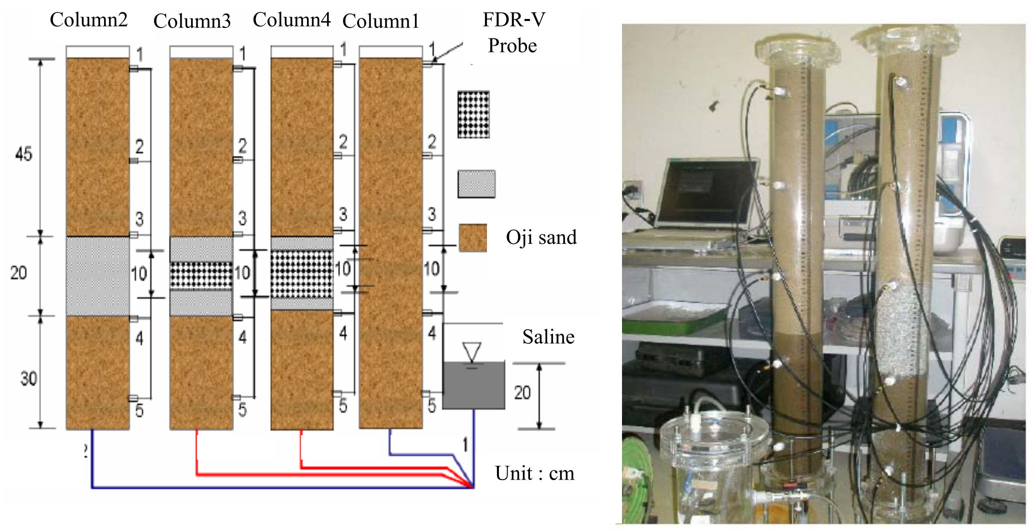
รูปที่ 2.8 แบบจำลองการเคลื่อนที่ขึ้นของน้ำเค็ม (ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552)

โดยในการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่แรกเป็นการจำลองให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นตามตัวอย่างแท่งดินจากระดับ water table ด้วยแรงคาพิลลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของสารละลายกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity, EC) และในส่วนที่สองเป็นการคำนวณหาค่าความเร็วการไหล (flux velocity) จากการจำลองการเคลื่อนที่ขึ้นของน้ำเค็มด้วยแรงคาพิลลารีในแท่งดิน ทำให้ทราบค่าความชื้น และค่าความเค็มที่เปลี่ยนไปตามชั้นความสูงที่แบ่งในแท่งดิน และจากผลที่ได้ทำให้สามารถหาค่าความเร็วการไหล (flux velocity) ได้โดยใช้หลักการสมดุลน้ำโดยอาศัยความสัมพันธ์ของความชื้นที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของความสูงของแท่งดิน หลังจากสามารถหาค่าอัตราการไหลทำให้สามารถหาค่า D และ R ได้จากการทำนายค่าโดยการฟิตเส้นโค้งในสมการที่ 2.24 ผลการทำนายค่าทำให้ทราบว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากจะมีผลต่อค่า D และ R กล่าวคือ หากมีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากจะทำให้ค่า D และ R ต่ำ

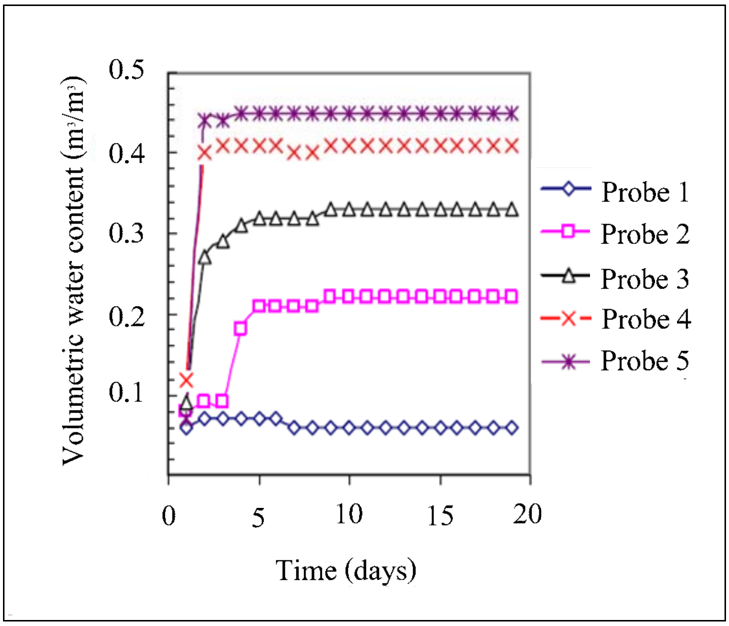
Akudago et al. (2009) ทำกระศึกษากระบวนการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของน้ำใต้ดินซึ่งมีความเค็ม และการตัดกระบวนเคลื่อนที่นั้น โดยการออกแบบการทดลอง และเงื่อนไข โดยใช้ดินทราย (Oji sand) ในการทดลอง นำชั้นกรวดมาทดลองแทรกระหว่างทรายเพื่อตัดกระบวนการดึงดูดของเหลวของช่องว่างในดิน แสดงดังรูปที่ 2.9

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินและน้ำในการทดลองของ Akudago et al. (2009)

คุณสมบัติ	ค่า
Specific gravity (g/cm^3)	2.67
Porosity	0.45
Average particle size (mm)	0.26
Salt concentration (%)	10
Electrical Conductivity of salt solution (mS/cm)	100.5
Temperature of salty soil/water (^{o}C)	14.8
Saturated Permeability of Sand (cm/s)	2.03E-03
Intial conductivity of saturated soil (μS/cm)	150
Temperature of initial saturated sample (^{o}C)	13



รูปที่ 2.9 แสดงการติดตั้งระบบการทดลอง Akudago et al. (2009)



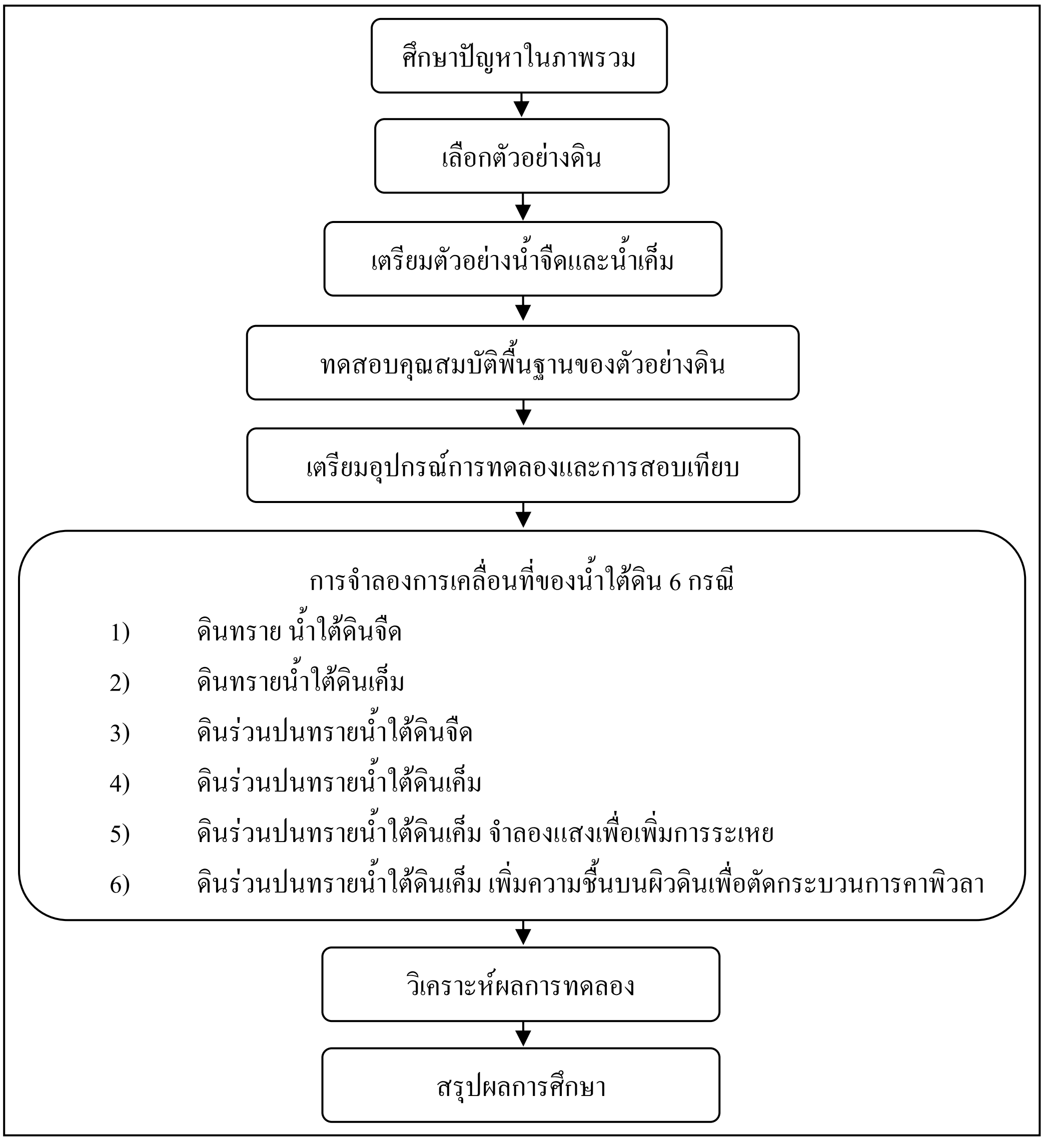
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของ Column 1 (Akudago et al., 2009)

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ระดับน้ำใต้ดินมีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนสารละลายเกลือของดิน แรงคาพิวลารีมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือ แสดงดังรูปที่ 2.10 และสามารถใช้กรวดในการตัดกระบวนการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือได้ เพราะกรวดมีช่องว่างระหว่างเม็ดกรวดขนาดใหญ่ทำให้น้ำไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นได้

การศึกษานี้จึงได้พัฒนาต่อจากการศึกษาของ Akudago et al. (2009) ด้วยรูปแบบการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่คล้ายคลึงกัน แต่นำมาศึกษาการควบคุมความเค็มของพื้นที่ดินเค็มที่เป็นดินทรายปนดินตะกอน ใช้การตัดกระบวนการคาพิวลารีโดยการควบคุมความชื้นบนผิวดิน

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

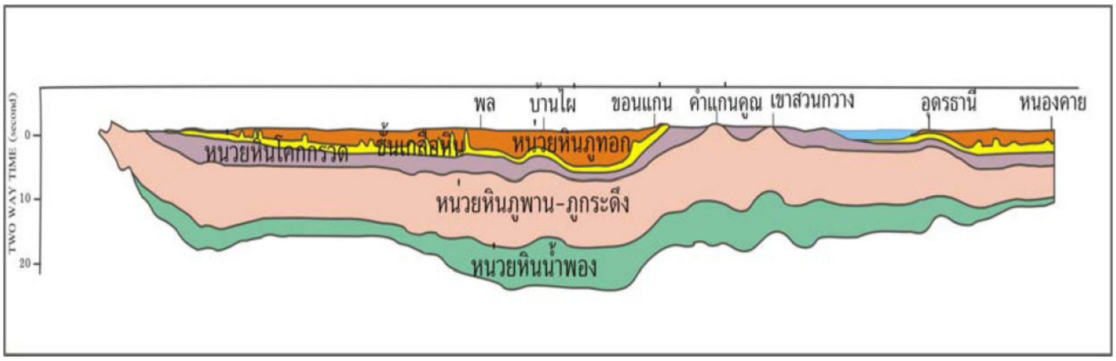
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในแนวดิ่ง และศึกษาการควบคุมความเค็มของพื้นที่ดินเค็มโดยการตัดกระบวนการคาพิวลารี ซึ่งได้ทำการศึกษาโดยการจำลองการเคลื่อนที่ในห้องปฏิบัติการ วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



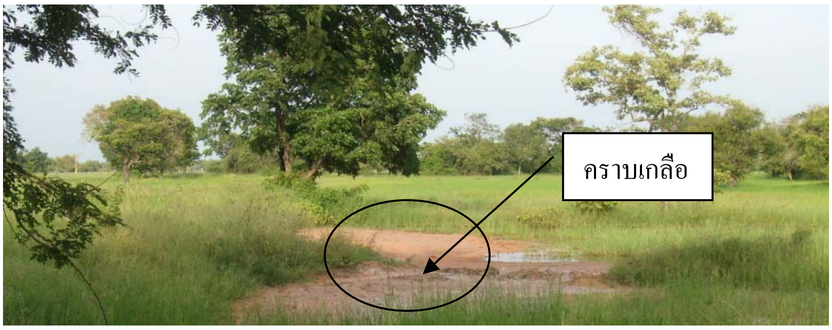
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาปัญหาดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเกิดขึ้นเนื่องจากใต้ดินมีชั้นเกลือหินแทรกอยู่ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประมาณร้อยละ 34.18 ของพื้นที่ภาค (กรมทรัพยากรธรณี, 2525) เกลือที่สะสมในดินส่วนใหญ่ในภูมิภาคนี้เป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) มีความเข้มข้นผันแปรไปตามพื้นที่และฤดูกาล (อรุณี ยูวะนิยม, 2540) จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณขอบแอ่งระดับของชั้นเกลือหินจะอยู่ในระดับตื้น ซึ่งจังหวัดนครราชสีมาอยู่ขอบของแอ่งโคราช ส่งผลให้พื้นที่บริเวณดังกล่าวได้รับผลกระทบจากปัญหาดินเค็มรุนแรง เพราะเมื่อชั้นเกลือหินนี้อยู่ในระดับตื้น ส่งผลให้น้ำใต้ดินในระดับลึกเค็ม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจนทำให้ระดับน้ำใต้ดินเค็มนี้มีระดับตื้นขึ้นจนอยู่ในช่วงอิทธิพลของแรงคาพิวลารีของดินส่งผลให้น้ำเค็มสามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาบนผิวดินได้ ดังนั้นจึงสนใจทำการศึกษาการตัดกระบวนการคาพิวลารีภายใต้เงื่อนไขน้ำใต้ดินอยู่ในระดับตื้น



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางแสดงชั้นเกลือหิน จากอำเภอพล จังหวัดขอนแก่น ถึง จังหวัดหนองคาย (กรมทรัพยากรธรณี, 2525)



รูปที่ 3.3 คราบเกลือในนาข้าว บ้านหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา

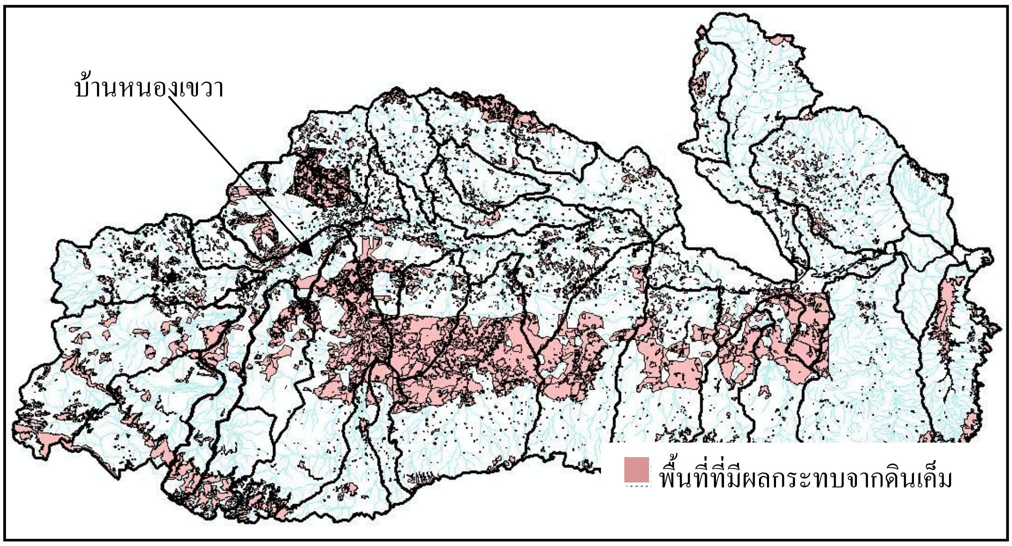
จากการทบทวนการศึกษาในอดีตที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 มีผู้เสนอแนะวิธีการแก้ไขปัญหาดินเค็มไว้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีความเหมาะสมและแตกต่างกันตามลักษณะของพื้นที่ดินเค็ม จึงได้ทำการเลือกพื้นที่ศึกษาจากแผนที่ดินเค็มของกรรมพัฒนาที่ดิน เลือกพื้นที่ศึกษา อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาดินเค็ม ความเค็มของดินอยู่ในระดับเค็มมาก ดังนั้นจึงทำการสำรวจภาคสนามโดยการเข้าไปสำรวจสภาพปัญหาจริงในพื้นที่ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาข้าว และมีคราบเกลือบนผิวดิน ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งบริเวณที่มีคราบเกลือ เป็นพื้นที่ว่างเปล่าข้าวไม่สามารถเจริญเติมโดยได้ ซึ่งพบปัญหาคราบเกลือบนผิวดิน กระจายอยู่ทั่วไปทั่วในบริเวณพื้นที่ศึกษา ทำการเจาะสำรวจวัดระดับน้ำใต้ดินในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2552 พบว่าระดับน้ำใต้ดินลึกประมาณ 1.5 เมตร จากผิวดิน และน้ำใต้ดินมีค่าความเค็มประมาณ 20 เดซิซีเมนต่อเมตร จึงทราบว่าปัญหาดินเค็มในพื้นที่ศึกษานี้ เกิดจากน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็มและมีระดับตื้น จึงเคลื่อนที่ขึ้นมาสู่ผิวดินได้ด้วยกระบวนการคาพิวลารี หลังจากนั้นได้ทำการสำรวจการใช้ประโยชน์ที่ดินเบื้องต้นจากเกษตรในพื้นที่ พบว่ามีเกษตรกรบางหลายปรับปรุงพื้นที่ดินเค็มจนสามารถเพาะปลูกได้ ด้วยการใช้น้ำหมักชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ และแกลบหรือฟางในการปกคลุมผิวดิน ซึ่งวิธีการนี้เป็นความเชื่อของเกษตรบางรายเท่านั้น ซึ่งเกษตรกรอีกส่วนหนึ่งยอมปล่อยให้พื้นที่ที่มีคราบเกลือเป็นพื้นที่ว่างเปล่า เพราะเชื่อว่าปัญหาดินเค็มไม่สามารถแก้ไขได้ ดังนั้นผลการจากสำรวจในสนามจึงนำไปสู่การทดลองในห้องปฏิบัติการต่อไป

3.2 การเลือกและเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือ

1) ดินทราย (sand) เป็นดินทรายชุมพวง จากท่าทราย อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างเบอร์ 60 ซึ่งมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.425-0.625 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D 422

2) ดินร่วนปนทราย (sandy loam) เป็นดินที่เก็บตัวอย่างมาจากบ้านหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา รูปที่ 3.4 เป็นภาพการกระจายตัวของดินเค็มในลุ่มน้ำมูล โดยแสดงให้เห็นว่าพื้นที่บ้านหนองเขวาเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาดินเค็ม และ รูปที่ 3.5 เป็นสภาพผิวดินของพื้นที่บ้านหนองเขวา ซึ่งจะมีคราบเกลือบนผิวดิน ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบทำลายโครงสร้าง (disturbed) ที่ความลึกช่วงผิวดินถึง 1 เมตร



รูปที่ 3.4 การกระจายความเค็มในลุ่มน้ำมูล

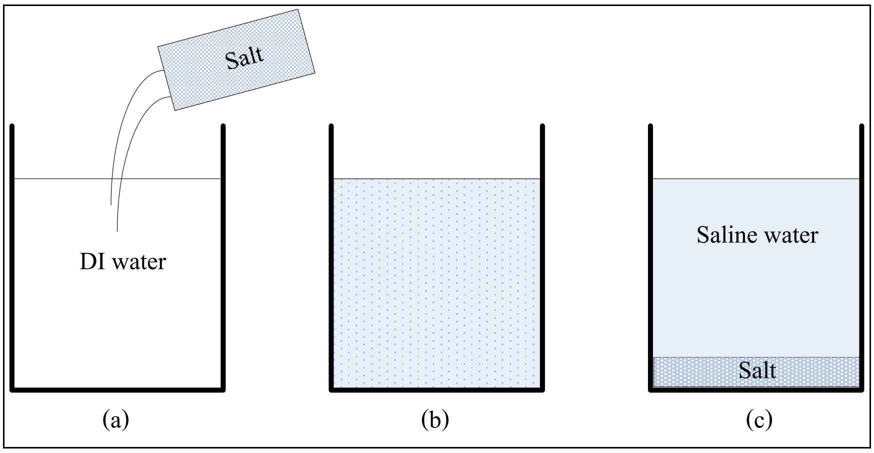
รูปที่ 3.5 สภาพผิวดินของบริเวณเก็บตัวอย่างดิน บ้านหนองเขวา

3.3 คุณสมบัติของตัวอย่างน้ำ

ใช้น้ำ 2 ชนิด ในการจำลองน้ำใต้ดิน คือ

1) น้ำจืด ใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าน้ำดีไอ (DI) เป็นน้ำที่ผ่านการกรองไอออนโดยใช้เรซินเป็นตัวกรองจึงทำให้น้ำที่ได้ไม่มีไอออนเหลืออยู่ และเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงอย่างแท้จริงเพราะโมเลกุลที่เหลืออยู่ เป็นเพียงโมเลกุลของน้ำ (H_2O) เท่านั้น

2) น้ำเค็ม (Saline water) ใช้เกลือโซเดียมคอลไลท์ (NaCl) บริสุทธิ์ ทำให้เป็นสารละลาย โดยการผสมเกลือกับน้ำดีไอดังรูปที่ 3.6 (a) คนส่วนผสมให้เข้ากันดังรูปที่ 3.6 (b) จากนั้นทิ้งให้ตกตะกอน จะได้น้ำเค็มดังรูปที่ 3.6 (c) แล้วนำน้ำเค็มที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้น และค่าความหนาแน่นของน้ำ



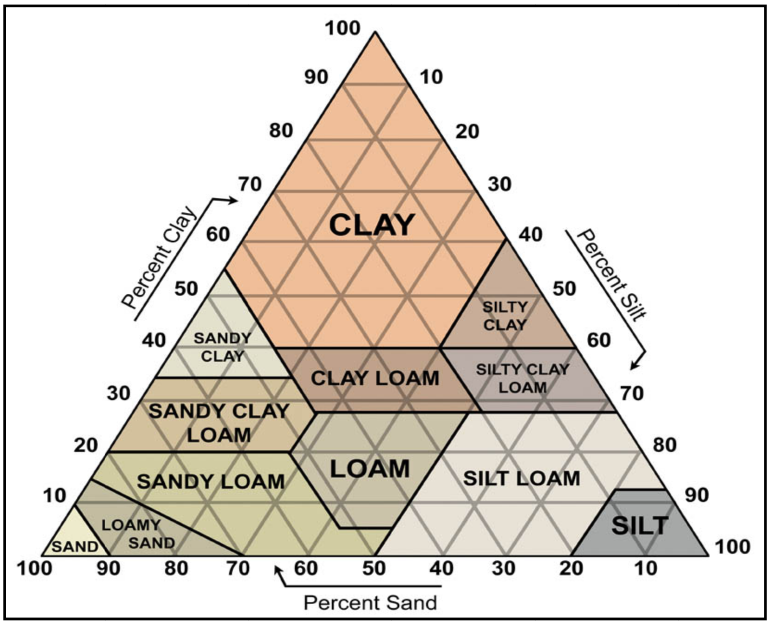
รูปที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่างน้ำเค็ม (Saline water)

3.4 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดิน

วิเคราะห์การกระจายของอนุภาค (particle size distribution) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดังรูปที่ 3.7 และนำผลกรวิเคราะห์ไปจำแนกเนื้อดิน (soil texture) ด้วยสามเหลี่ยมจำแนกเนื้อดิน (triangular texture soil classification chart) ดังรูปที่ 3.8 ตามระบบการจำแนกของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Agriculture : USDA) ซึ่งจำแนกโดยการคำนวณร้อยละของอนุภาคดิน เป็นกลุ่มต่าง ๆ ดังนี้ ทราย (sand) ขนาดอนุภาค 0.05-2.0 มิลลิเมตร ทรายแป้ง (silt) ขนาดอนุภาค 0.002-0.05 มิลลิเมตร และดินเหนียว (clay) ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.002 มิลลิเมตร

ดินทั้งสองชนิดจะถูกทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 854 และทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงดูดเมทริกกับความชื้น (SWCC) โดยใช้วิธีหม้อแรงดัน (pressure plate method) ตามมาตรฐาน ASTM D6836-02

รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer)



รูปที่ 3.8 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อดิน (Triangular texture soil classification chart)

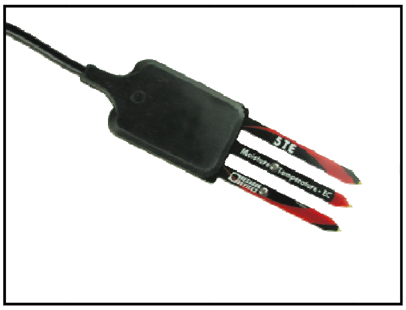
3.5 อุปกรณ์การทดลองและการสอบเทียบ

หัววัด (sensor) รุ่น 5TE แสดงดังรูปที่ 3.9 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความชื้น ความเค็ม และอุณหภูมิของดิน ด้วยวิธี Frequency Domain Reflectrometry (FDR) ซึ่งอาศัยหลักการความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อนำมาใช้กับดินที่มีความเค็มจึงต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์ เพราะในดินที่มีความเค็มจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น และจะทำให้ค่าความชื้นของดินมีค่ามากเกินจริง (Inoue et al, 2008) ใช้วิธีสอบเทียบตาม http://www.decagon.com/education/video-custom-soil-calibration-for-vwc-sensors/ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) บดอัดดินตัวอย่างในภาชนะทรงกระบอก ให้ได้ความหนาแน่นเท่าที่ต้องการ
2) วัดความชื้นด้วยหัววัด บันทึกค่าความชื้นที่วัดได้(θ')
3) เก็บตัวอย่างดินนำไปอบเพื่อหาความชื้นโดยน้ำหนัก(w)
4) ทำซ้ำข้อที่ 1 ถึง 3 โดยมีการเพิ่มน้ำเพื่อแปรผันความชื้น
5) คำนวณความชื้นที่ถูกต้อง (θ) จากสมการที่ 2.2

และเมื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์แล้วได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากหัววัดความชื้นโดยปริมาตร (θ') ความชื้นโดยน้ำหนัก (w) และความชื้นโดยปริมาตรที่แท้จริง (θ) เพื่อปรับแก้ค่าความชื้น

เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) รุ่น EM50 แสดงดังรูปที่ 3.10 มีช่องสำหรับต่อเข้ากับหัววัด 5 ช่อง สามารถกำหนดระยะเวลาในการวัดค่าได้ ตั้งแต่ 1 นาทีต่อครั้ง จนถึง 24 ชั่วโมงต่อครั้ง มีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ทำงานในรูปแบบปฏิบัติการบน Windows ลงบนคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลแสดงค่าความชื้นโดยปริมาตร θ' (%) ค่าความเค็มแสดงออกมาในรูปแบบของค่าการนำไฟฟ้า EC (dS/m) และอุณหภูมิ T (°C)



รูปที่ 3.9 หัววัด (sensor) รุ่น 5TE

รูปที่ 3.10 เครื่องบันทึกข้อมูล (data loger) รุ่น EM50

3.6 การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในห้องปฏิบัติการ

จำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในห้องปฏิบัติการ มีขั้นตอนการปฏิบัติการดังนี้ (1) บดอัดดินลงในท่อทรงกระบอกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ให้ดินมีความสูง 95 เซนติเมตร (2) ทำการติดตั้งหัววัด (sensor) ที่ระดับ 5 25 45 65 และ 85 เซนติเมตร จากผิวดิน (3) ติดตั้งถังจ่ายน้ำเข้าไปในดินด้านใต้ของท่อทรงกระบอก กำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ 85 เซนติเมตร จากผิวดิน ดังรูปที่ 3.11 แสดงการจำลองในห้องปฏิบัติการ (4) ปล่อยน้ำใต้ดินเข้าสู่แท่งดิน จะเริ่มเก็บข้อมูลความชื้น ความเค็ม และอุณหภูมิของดินทุก ๆ 5 นาที ข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูล (data loger) การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินกรณีต่าง ๆ 6 กรณีดังนี้

1) แท่งดิน I: ดินทราย น้ำใต้ดินจืด

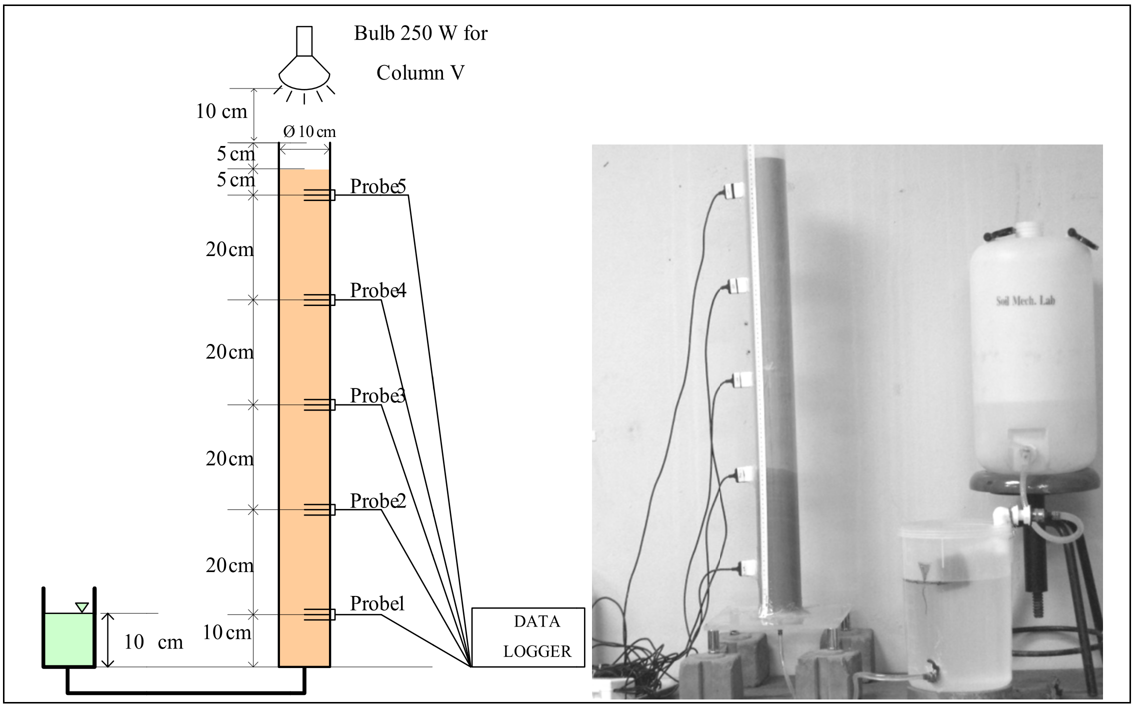
2) แท่งดิน II: ดินทรายน้ำใต้ดินเค็ม

3) แท่งดิน III: ดินร่วนปนทรายน้ำใต้ดินจืด

4) แท่งดิน IV: ดินร่วนปนทรายน้ำใต้ดินเค็ม

5) แท่งดิน V: ดินร่วนปนทรายน้ำใต้ดินเค็ม จำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย โดยหลังจากการทดลองแท่งดิน IV จนความชื้นคงที่ จึงจำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย แสดงการจำลองแสงดังรูปที่ 3.11 โดยใช้หลอดไฟขนาด 250 วัตต์ ที่สามารถปรับแสงได้ ทำให้เกิดอุณหภูมิบนผิวดิน 45 ถึง 50 °C ทดสอบต่อไปอีก 30 วัน

6) แท่งดิน VI: ดินร่วนปนทรายน้ำใต้ดินเค็ม เพิ่มความชื้นบนผิวดินเพื่อตัดกระบวนการคาพิวลารี โดยเตรียมตัวอย่างแท่งดินเหมือนกับแท่งดิน IV แต่มีการเติมน้ำจืดบนผิวดินให้ผิวดินมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 3.11 การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ในห้องปฏิบัติการ

3.7 วิธีการวิเคราะห์การทดลอง

วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา และความสัมพันธ์ของความชื้นที่ระดับความลึกต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของน้ำระหว่างน้ำใต้ดินเค็ม (SG) และน้ำใต้ดินจืด (DG) ของดินทั้งสองชนิด ตลอดจนวิเคราะห์การตัดกระบวนการคาพิวลารี เพื่อเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาดินเค็มของพื้นที่ศึกษา

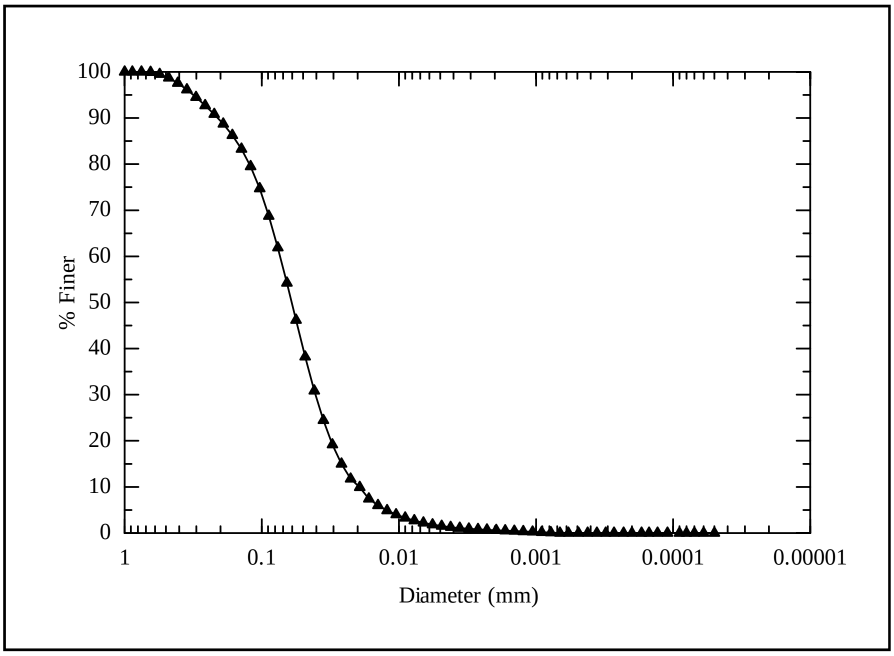
บทที่ 4
ผลการการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในแนวดิ่ง ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในบทที่ 3 ตลอดจนผลของการปรับเทียบเครื่องมือ และวิเคราะห์ผลการทดลองจากความสัมพันธ์ของความชื้นกับเวลาที่ระดับความลึกต่าง ๆ

4.2 คุณสมบัติของดินและน้ำ

ตัวอย่างดินและน้ำที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในห้องปฏิบัติการณ์นั้น มีคุณสมบัติพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยทดลองด้วยดิน 2 ชนิด คือดินทราย และดินจากบ้านหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา นำไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ ได้กราฟการกระจายขนาดคละเม็ดดินแสดงดังรูปที่ 4.1 แล้วจึงสามารถจำแนกชนิดของดินได้เป็นดินร่วนปนทราย



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดคละเม็ดดิน ของดินร่วนปนทราย

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของดินและน้ำที่ใช้ในการทดลอง

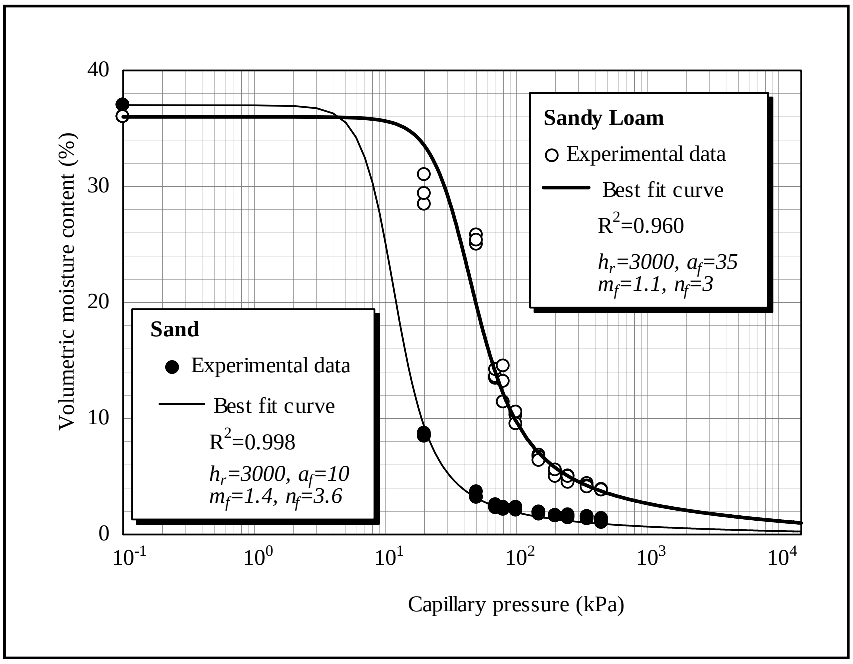
คุณสมบัติ	หน่วย	ค่า
ดินทราย (Sand)		
o ดินทรายขนาดเม็ดดิน,d	mm	0.250 - 0.450
o ความถ่วงจำเพาะ	-	2.67
o ความหนาแน่นแห้ง, ρ_d	g/cm^3	1.68
o ความพรุน	-	0.37
o ความเค็มเริ่มต้นของดิน, EC	dS/m	0
ดินร่วนปนทราย (Sandy loam)		
o ดินเหนียว	%	1
o ดินตะกอน	%	37
o ดินทราย	%	62
o ความถ่วงจำเพาะ	-	2.64
o ความหนาแน่นแห้ง, ρ_d	g/cm^3	1.70
o ความพรุน		0.36
o ความเค็มเริ่มต้นของดิน, EC	dS/m	0.05
น้ำ (Water)		
o ความเข้มข้นของน้ำเค็ม (NaCl)	%	10
o ความเค็มเริ่มต้นของดิน, EC	dS/m	0
o ความหนาแน่นของน้ำเค็ม, ρ_{w_Saline}	g/cm^3	1.10
o ความหนาแน่นของน้ำจืด , ρ_{w_DI}	g/cm^3	1.00

เมื่อนำดินทั้งสองชนิดมาทดสอบหาค่าแรงคาพิวลารีโดยใช้วิธีหม้อแรงดัน (pressure plate method) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลารีกับความชื้นดิน (SWCC) แสดงดังรูปที่ 4.2 ผลการทดลองสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ด้วยสมการของ Fredlund (1994) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1 เมื่อ θ คือ ความชื้นของดิน θ_w คือ ความชื้นของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ψ_m คือ แรงคาพิวลารี h_r a_f n_f และ m_f คือ พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างสมการตามเส้นของกราฟ จากความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงคาพิวลารีแสดงให้เห็นว่าที่ความชื้นเท่ากันตัวอย่างดินทรายนี้มีค่าแรงคาพิวลารีน้อยกว่าดินร่วนปนทราย

$$\theta = \theta_w \left[1 - \frac{\ln\left(1+\frac{\psi_m}{h_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\left\{ \ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\psi_m}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \right] \tag{4.1}$$

อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดินยังมีแรงดึงดูดออสโมทิก ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินด้วยโดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมาก ความสามารถในการดูดน้ำของดินจะมากขึ้นด้วย (Fredlund, 1993) ความสัมพันธ์ของแรงดึงดูดน้ำในดิน (soil suction, ψ) น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน จะอยู่ใต้สภาวะแรงดึงดูดที่เรียกว่า แรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิวลารี $(\psi_m$ or $u_a - u_w)$ และแรงดึงดูดออสโมทิก (π) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.2 โดยที่ u_a คือแรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ u_w คือ แรงดันน้ำในดิน

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \tag{4.2}$$



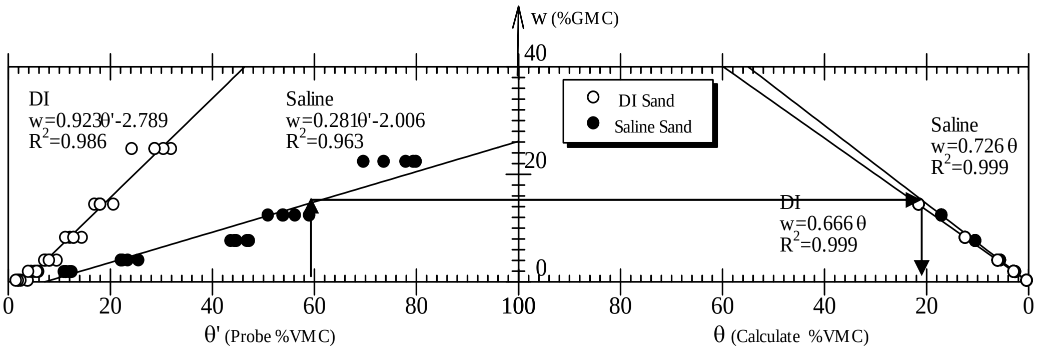
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลารีกับความชื้นดิน (SWCC)

4.3 การปรับเทียบหัววัด (sensor)

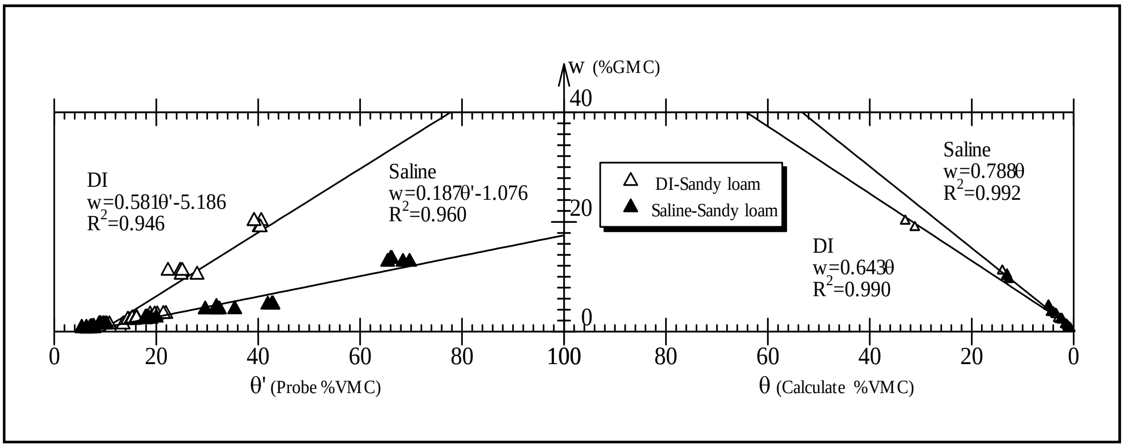
ทำการปรับเทียบหัววัดแล้วสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรที่ได้จากหัววัดความชื้น (θ') ความชื้นโดยน้ำหนัก (w) และความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้อง (θ) ซึ่งความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้อง สามารถคำนวณได้จากตามสมการที่ 4.3 โดยสมการนี้อยู่ภายเงื่อนไขที่ว่าดินแน่นมากไม่มีการหยุบตัวเมื่อความชื้นมากขึ้น (Scoot, 2000) เมื่อ ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้งของดิน (g/cm^3) และ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3)

$$\theta = \frac{w\rho_d}{\rho_w} \tag{4.3}$$

ใช้รูปที่ 4.3 และ 4.4 ในการปรับแก้ความชื้นของดินทรายและดินร่วนบนทรายตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่นรูปที่ 4.3 ถ้าอ่านค่าความชื้นในกรณีน้ำใต้ดินเค็มจากอุปกรณ์วัดความชื้น (θ') ได้ 60 % ให้ลากเส้นตรงขึ้นไปชนกับเส้น Saline Sand แล้วลากเส้นตรงไปทางขวามือให้ชนกับเส้นกราฟของน้ำใต้ดินเค็มที่ได้จากการคำนวณ แล้วลากเส้นตรงลงมาชนกับแกน x อ่านค่าความชื้น (θ) ได้ประมาณ 20 % หรือสามารถใช้สมการที่ 4.4 ปรับแก้ในกรณีที่เป็นน้ำจืด สมการ ที่ 4.5 ในกรณีที่เป็นน้ำเค็ม สำหรับปรับแก้ดินทราย และสำหรับปรับแก้ดินร่วนปนทรายใช้สมการ ที่ 4.6 ปรับแก้ในกรณีที่เป็นน้ำจืด สมการที่ 4.7 ในกรณีที่เป็นน้ำเค็ม



รูปที่ 4.3 กราฟปรับแก้ความชื้นระหว่างความชื้นโดยปริมาตรจากการวัด ความชื้นโดยน้ำหนัก และความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้องกรณีน้ำจืดและน้ำเค็ม สำหรับดินทราย



รูปที่ 4.4 กราฟปรับแก้ความชื้นระหว่างความชื้นโดยปริมาตรจากการวัด ความชื้นโดยน้ำหนัก และความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้องกรณีน้ำจืดและน้ำเค็ม สำหรับดินร่วนปนทราย

สมการปรับแก้ความชื้นในดินทราย

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (DI sand)

$$\theta = 1.386\theta' - 4.188 \quad (4.4)$$

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม (Saline sand)

$$\theta = 0.387\theta' - 2.763 \quad (4.5)$$

สมการปรับแก้ความชื้นในดินร่วนปนทราย

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (DI sandy loam)

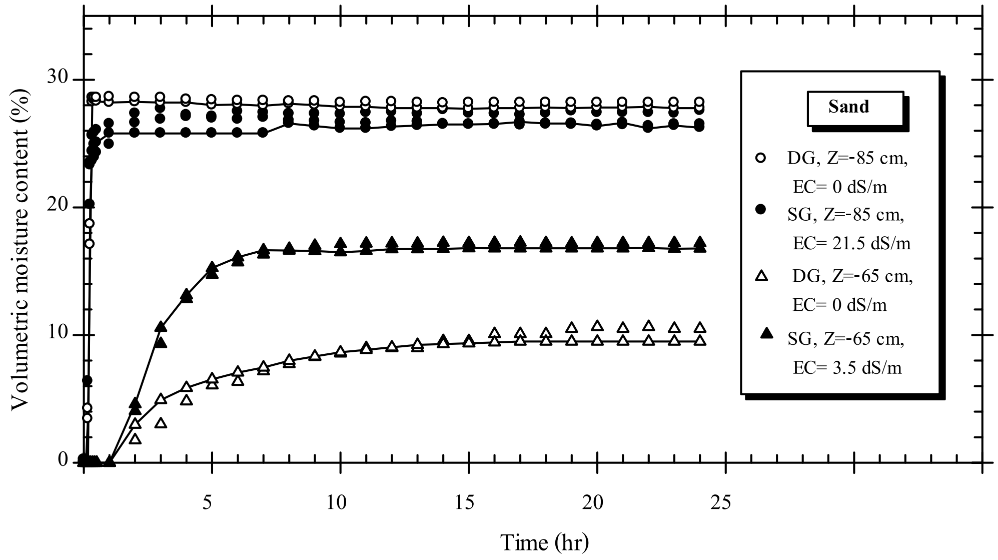
$$\theta = 0.904\theta' - 8.065 \quad (4.6)$$

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม (Saline sandy loam)

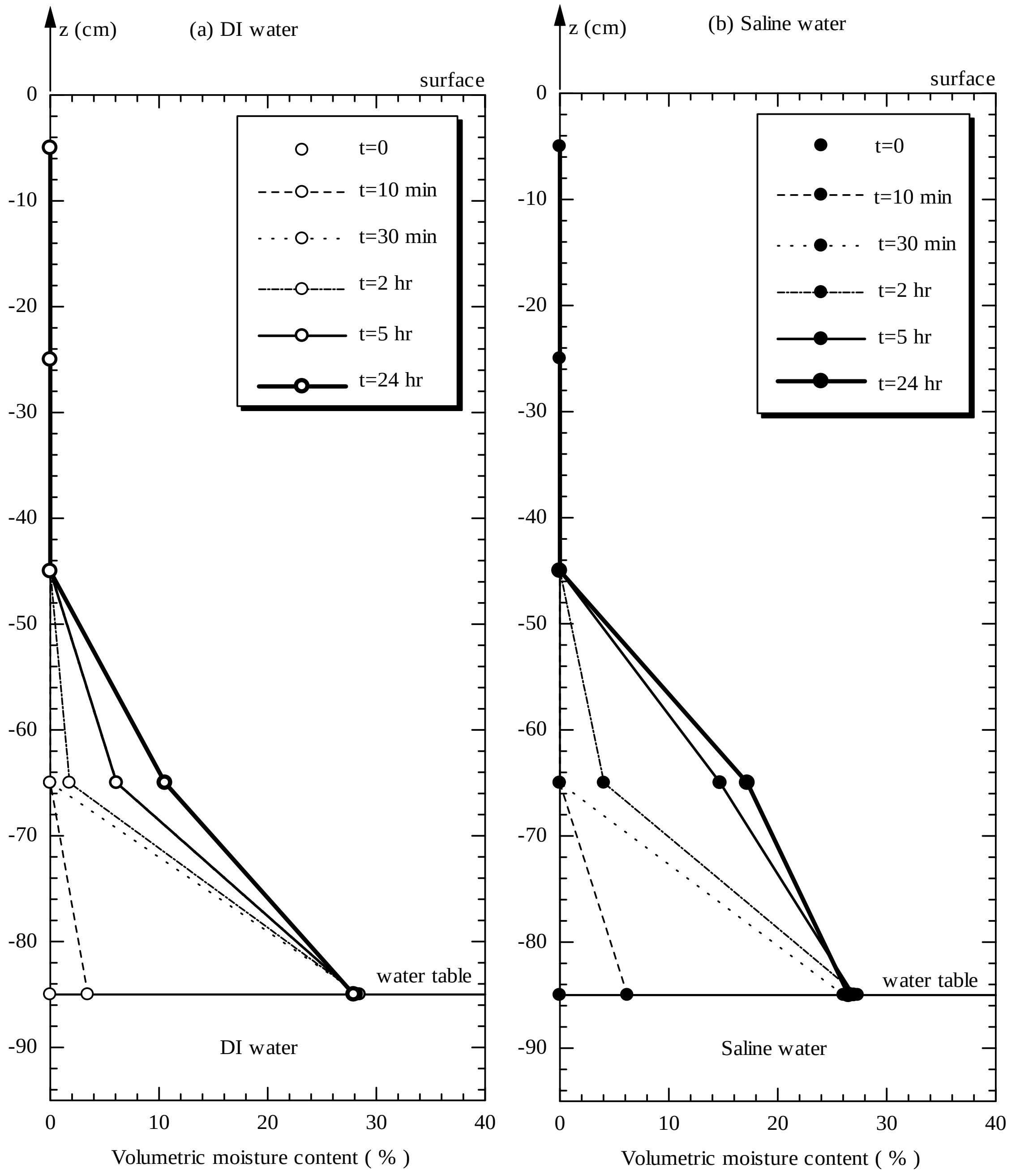
$$\theta = 0.237\theta' - 1.365 \quad (4.7)$$

4.4 แท่งดินเป็นดินทราย

เปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินภายใต้กระบวนการคาพิวลารี(แท่งดินI,II) ของน้ำใต้ดินสองชนิด ดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความลึก 85 เซนติเมตร จากผิวดิน ซึ่งอยู่ที่ระดับน้ำใต้ดินพอดี ทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม ดินทรายมีความชื้นเพิ่มขึ้นและคงที่อย่างรวดเร็วเหมือนกัน คงที่ที่ ประมาณ 27 % ซึ่งในกรณีน้ำใต้ดินเค็มมีค่าความเค็มของดินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 21.5 เดซิซีเมน/เมตร (dS/m) แต่ที่ระดับความลึก 65 เซนติเมตร จากผิวดินหรือเหนือระดับน้ำใต้ดิน 20 เซนติเมตร เมื่อความชื้นดินเพิ่มขึ้นจนคงที่ ความชื้นของดินในกรณีเป็นน้ำเค็มมีค่ามากกว่าความชื้นของดินกรณีที่เป็นน้ำจืด และกรณีเป็นน้ำเค็มมีผลทำให้ค่าความเค็มของดิน เพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.5 เดซิซีเมน/เมตร เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามระดับความลึกจากผิวดินระหว่างน้ำใต้ดินเค็มและจืด ดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าที่ความลึกเหนือระดับน้ำใต้ดินเท่ากัน ที่เวลาเดียวกัน ความชื้นของดินในกรณีน้ำเค็มมีค่ามากกว่าน้ำจืด และน้ำสามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาได้สูงสุดประมาณ 30 เซนติเมตร จากระดับน้ำใต้ดินไม่ต่างกัน ทั้งกรณีที่เป็นน้ำใต้ดินจืดและน้ำเค็ม นอกจากนี้ความชื้นมีค่าลดลงในดินที่มีระดับอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินมากขึ้น ดังนั้นที่ระดับดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินมากขึ้นค่าความเค็มที่สะสมในดินจะน้อยลง



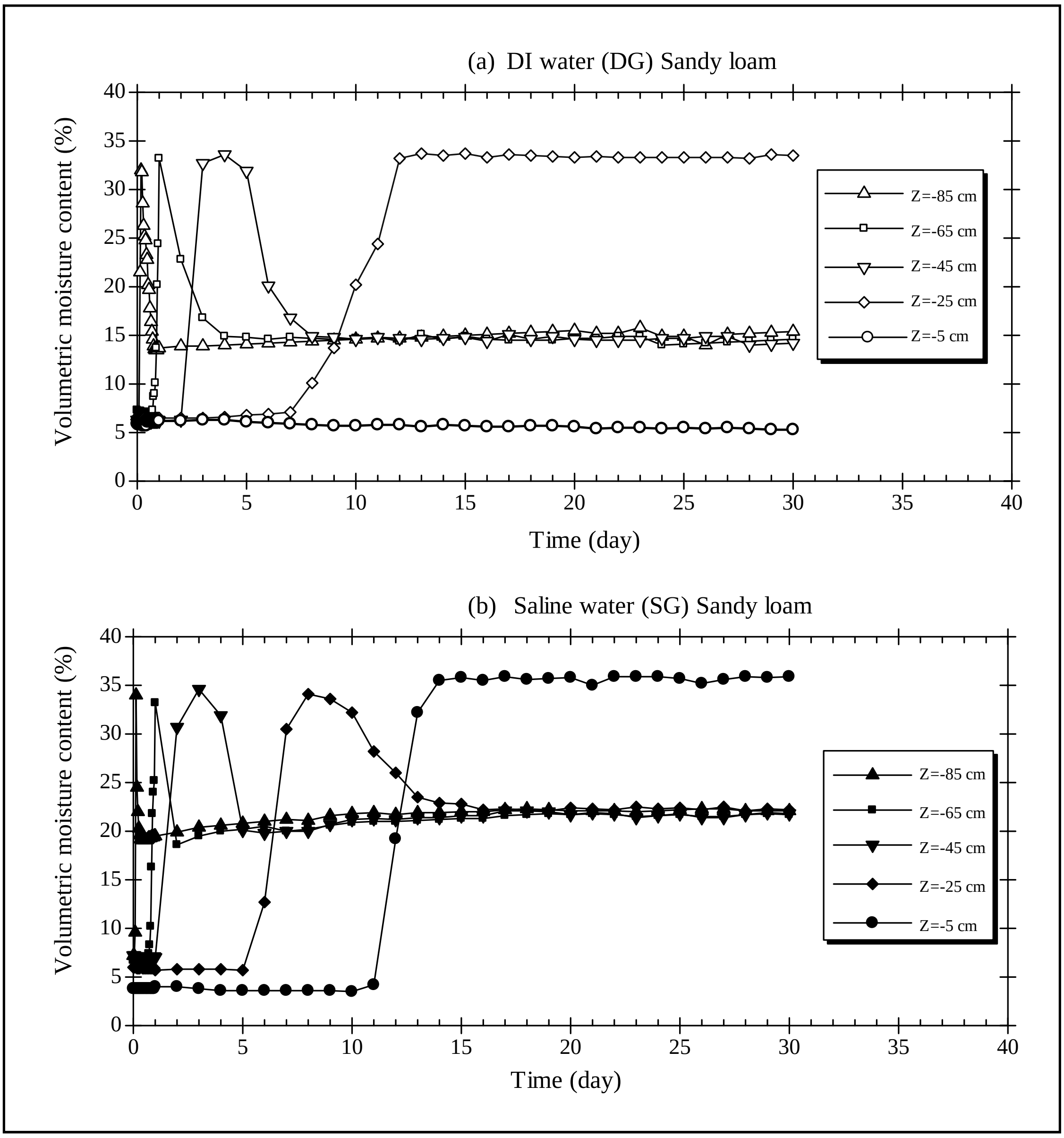
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลากรณีเป็นน้ำจืดและน้ำเค็มที่ระดับความลึก 65 และ 85 เซนติเมตร จากผิวดิน สำหรับแท่งดินที่เป็นดินทราย



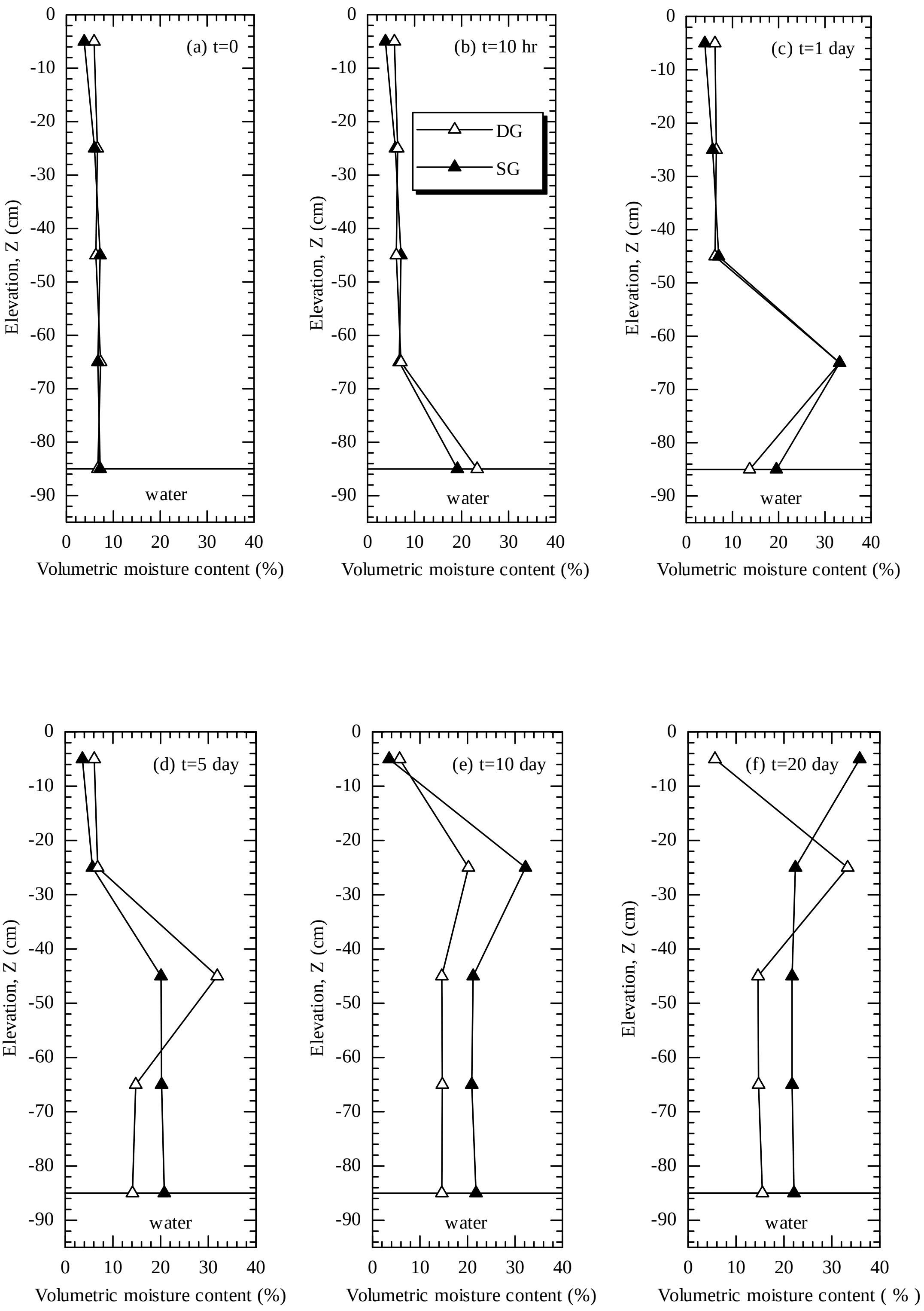
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของดินทรายกับความชื้นเชิงปริมาตรที่เวลาต่าง ๆ
(a) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (b) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม

4.5 แท่งดินเป็นดินร่วนปนทราย

เปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินภายใต้กระบวนการคาพิวลารี (แท่งดิน III,IV) ของน้ำใต้ดินสองชนิด ดังรูปที่ 4.7 ที่ระดับดินลึก (Z=-85, -65 เซนติเมตร) ความชื้นของดินเพิ่มขึ้นในเวลาที่ใกล้เคียงกันระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม แต่ที่ระดับดินตื้นขึ้น (Z=-45, -25 เซนติเมตร) ความชื้นของดินที่เป็นน้ำเค็มเพิ่มขึ้นในเวลาที่รวดเร็วกว่าน้ำจืด และพบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของความชื้นที่ความลึกต่าง ๆ ของดินร่วนปนทรายแตกต่างจากดินทรายคือความชื้นของดินร่วนปนทรายจะเพิ่มจนถึงความชื้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วความชื้นจะลดลงมาคงที่ที่ค่าหนึ่งเหมือนกันทุกระดับความลึกของดินยกเว้นดินที่อยู่ระดับตื้นที่สุด (Z=-5 เซนติเมตร) ที่ความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึงความชื้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว แต่จะคงที่ที่ความชื้นนี้ ไม่ลดลงเหมือนดินที่ระดับความลึกมากกว่า ดูรูปที่ 4.5 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 พบว่าที่ระดับความลึก 65 เซนติเมตร จากผิวดินกรณีน้ำเค็มความชื้นของดินร่วนปนทรายกว่าจะเพิ่มขึ้นจนคงที่ใช้เวลาประมาณ 3 วัน ขณะที่ดินทรายใช้เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าที่ความลึกต่าง ๆ และที่เวลาต่าง ๆ น้ำเค็มมีผลทำให้ความชื้นของดินมากกว่าน้ำจืดเสมอ โดยเฉพาะเมื่อความชื้นเพิ่มจนคงที่แล้ว และน้ำเค็มสามารถขึ้นไปจนถึงผิวดิน แต่น้ำจืดขึ้นไปไม่ถึง แต่หากเป็นดินทรายทั้งกรณีน้ำจืดและน้ำเค็มความชื้นขึ้นไปได้สูงสุดที่ระดับความลึก 65 เซนติเมตร จากผิวดินเท่านั้น (Z= -65 เซนติเมตร) ดูรูปที่ 4.6



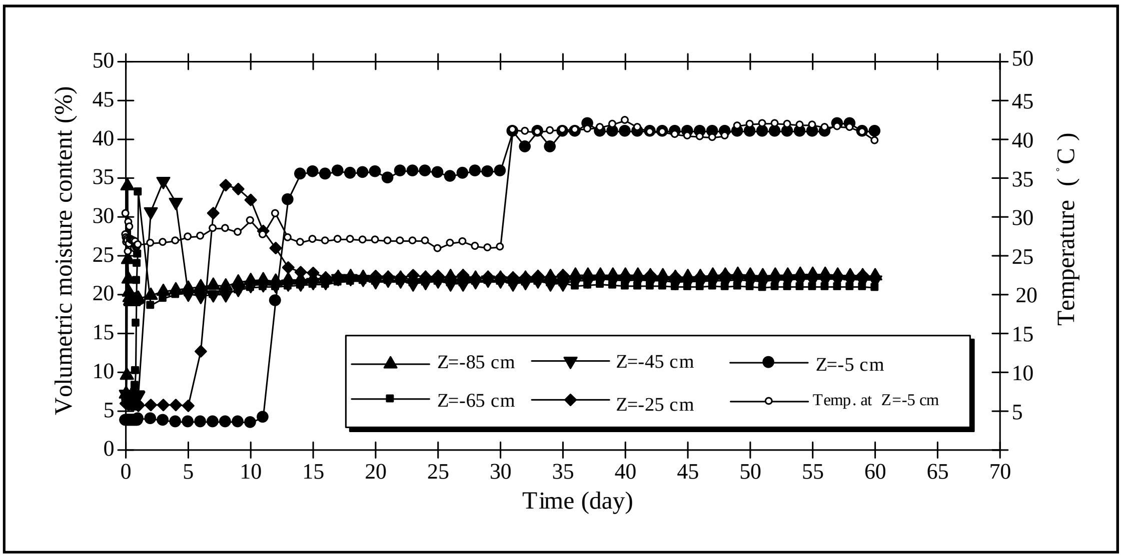
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินที่ระดับต่าง ๆ สำหรับแท่งดินที่เป็นดินร่วนปนทราย (a) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (b) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความชื้นดิน และระหว่างน้ำใต้ดินจืดและน้ำใต้ดินเค็ม กรณีดินร่วนปนทราย ที่ (a)ที่เวลาเริ่มต้น (b) 10 ชั่วโมง (c) 1 วัน (d) 5 วัน (e) 10 วัน (f) 20 วัน

4.6 แท่งดินเป็นดินร่วนปนทรายและเร่งการระเหย

จากการทดลองทั้ง 4 กรณี แท่งดิน I ถึง IV เป็นการทดลองในร่ม อุณหภูมิห้อง แต่ในสภาพธรรมชาติของพื้นที่ดินเค็ม ดินจะได้รับแสงแดด ลม ซึ่งมีส่วนสำคัญในการทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวดิน ดังนั้นเพื่อจำลองการระเหยจากพลังงานที่ผิวดินได้รับเพิ่มขึ้นจึงกำหนดให้มีการทดลองกรณีที่ 5 (แท่งดิน V) หลังจากจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มในดินร่วนปนทรายเหมือน แท่งดิน IV จนความชื้นคงที่ ใช้เวลาประมาณ 30 วัน จึงได้จำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหยแสดงการจำลองแสงดังรูปที่ 3.10 โดยใช้หลอดไฟขนาด 250 วัตต์ ที่สามารถปรับแสงได้ ทำให้เกิดอุณหภูมิบนผิวดิน 45 ˚C ถึง 50 ˚C ทดสอบต่อไปอีก 30 วัน ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อผิวดินมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการระเหยเพิ่มขึ้นแต่กลับมีผลทำให้ความชื้นของดินที่ระดับผิวดินสูงขึ้นซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะที่บริเวณผิวดินเท่านั้น ส่วนที่ระดับอื่น ๆ ของดินที่ลึกลงไป ความชื้นคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ที่ผิวดินมีคราบเกลือเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.10 คราบเกลือมีลักษณะเป็นฟิล์มเคลือบผิวดินไว้ มีลักษณะแข็ง เมื่อลอกเอาคราบเกลือออกมาจากผิว แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่ามีคราบเกลือ ความหนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร ถึง 1 เซนติเมตร



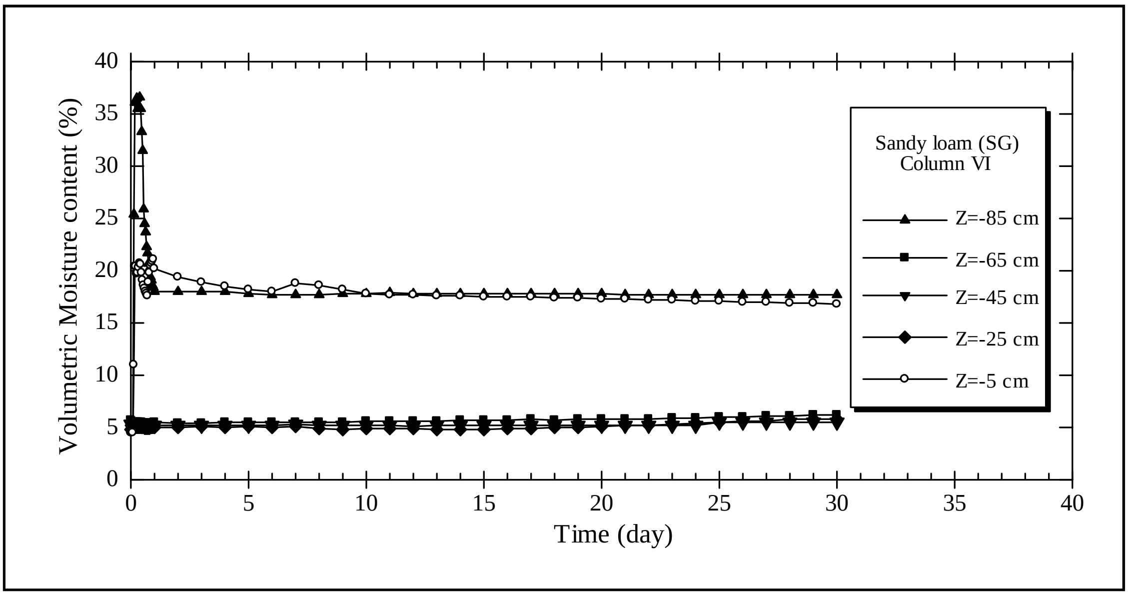
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินระดับต่าง ๆ สำหรับแท่งดินที่เป็นดินร่วนปนทราย กรณีน้ำใต้ดินเค็ม และเพิ่มการจำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย

รูปที่ 4.10 คราบเกลือที่เกิดขึ้นบนผิวดิน

รูปที่ 4.11 คราบเกลือที่ลอกออกจากผิวดิน

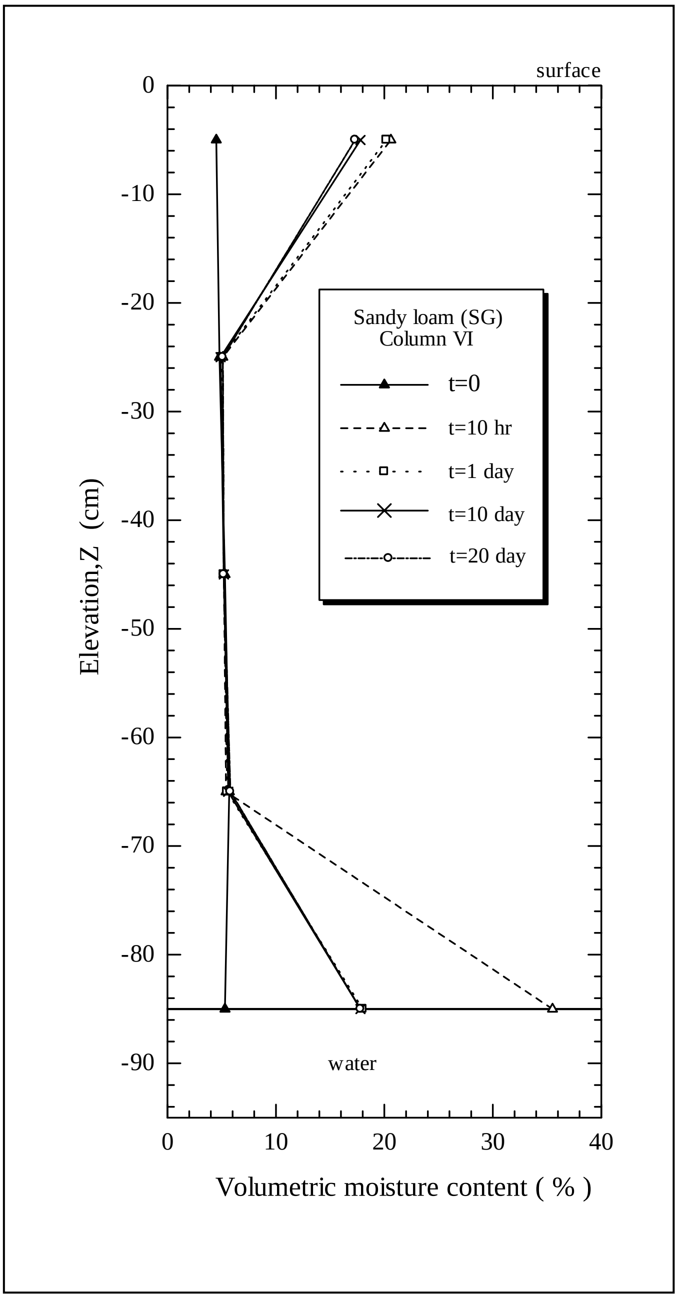
4.7 แท่งดินร่วนปนทรายและตัดกระบวนการคาพิวลารี

สืบเนื่องมาจากผลการทดลองของแท่งดิน V ซึ่งทำให้ทราบว่าเกลือสามารถขึ้นมาบนผิวดินได้มากขึ้นเมื่อผิวดินแห้งและมีการระเหย และวิธีการแก้ไขปัญหาดินเค็มของเกษตรกรบ้านหนองเขวา ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 จึงออกแบบ และทำการทดลองเพื่อตัดกระบวนการคาพิวลารี (แท่งดิน VI) โดยการทำให้ผิวดินมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ด้วยการหยดน้ำบนผิวดินทดสอบ 30 วัน ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาดังรูปที่ 4.12 พบว่า ที่ระดับน้ำใต้ดิน (Z=-85cm) ความชื้นเพิ่มขึ้นและคงที่อย่างรวดเร็ว คล้ายกับแท่งดิน IV และ V แต่เมื่อเพิ่มความชื้นผิวดิน ความชื้นที่ระดับ Z=-5 cm เพิ่มขึ้นทันที คงที่ที่ประมาณ 20 % ความชื้นที่ระดับความลึกอื่น ๆ (Z=-65,-45,-25,-5 cm) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น เมื่อพิจารณาโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับความชื้นโดยปริมาตร ดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อที่ผิวดินมีความชื้น เท่า ๆ กับความชื้นที่ระดับน้ำใต้ดิน ทำให้ความชื้นจากน้ำใต้ดินเค็มไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาบนผิวดินได้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินระดับต่าง ๆ สำหรับแท่งดินVI

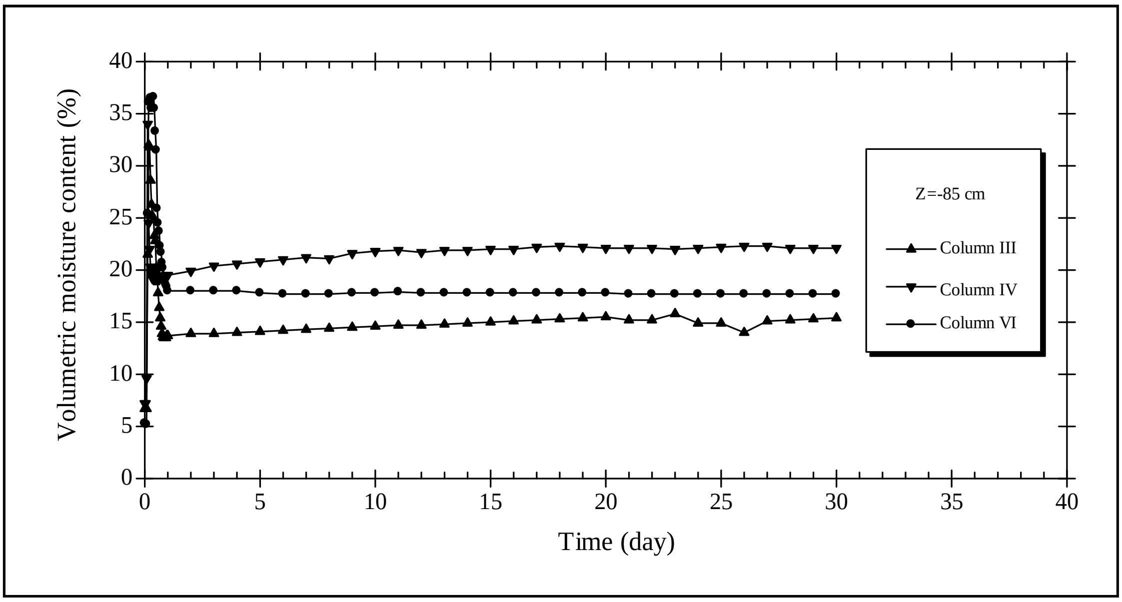
ในการจำลองเพิ่มความชื้นบนผิวดินนี้ เป็นการจำลองสภาพในฤดูฝนที่มีความชื้นผิวดินสูงจากน้ำฝน ดังนั้นในช่วงฤดูแล้งต้องมีอินทรียวัตถุปกคลุมที่ผิวดิน เพื่อลดการระเหยความชื้นบนผิวดิน และรักษาความชื้นบนผิวดินให้คงที่



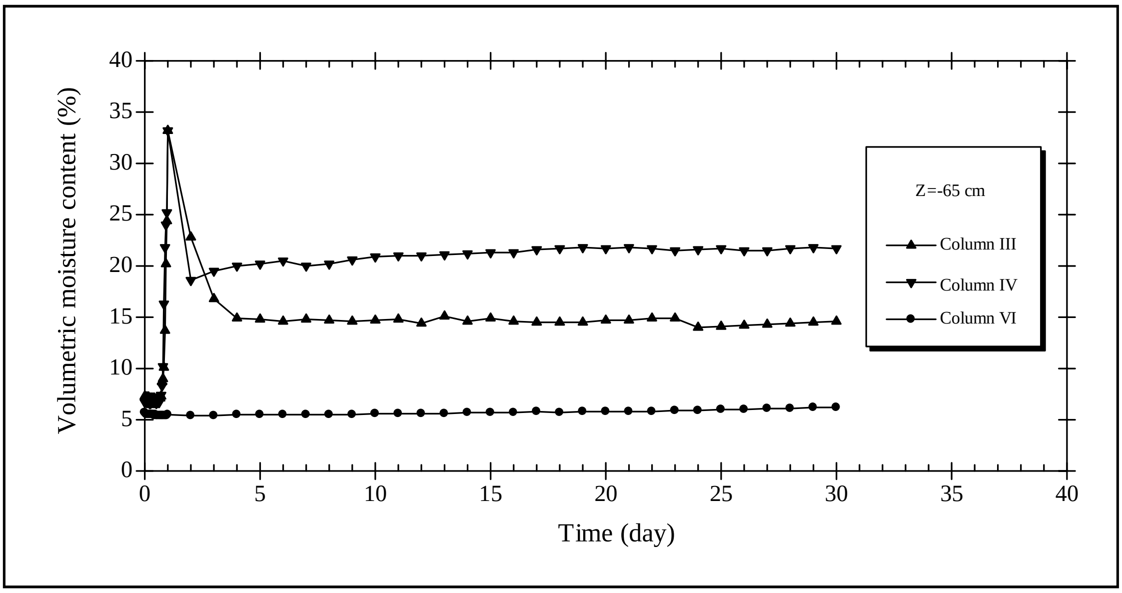
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความชื้นโดยปริมาตรที่เวลาต่าง ๆ สำหรับแท่งดิน VI ดินร่วนปนทรายน้ำใต้ดินเค็ม เพิ่มความชื้นบนผิวดิน

4.8 การเปรียบเทียบผลระหว่างแท่งดิน III แท่งดิน IV และ แท่งดิน VI

จากผลการทดลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ในดินร่วนปนทราย นำผลการทดลองของแท่งดินที่ III แท่งดินที่ IV และแท่งดินที่ VI เปรียบเทียบกัน โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึกต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาที่ระดับน้ำใต้ดิน (Z=-85 cm) ดังรูปที่ 4.14 ความชื้นของดินทั้งสามแท่งดินเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วคงที่อย่างรวดเร็วคล้ายกัน แต่เมื่อความชื้นคงที่แล้ว พบว่าปริมาณความชื้นของดินแตกต่างกัน ความชื้นของดินในแท่งดิน IV ซึ่งน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็มมีค่าความชื้นมากกว่าแท่งดิน VI ที่มีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็มเช่นกัน แต่แท่งดิน VI มีการตัดกระบวนการคาพิวลารี และแท่งดิน III น้ำใต้ดินเป็นน้ำจืดมีความชื้นน้อยที่สุด

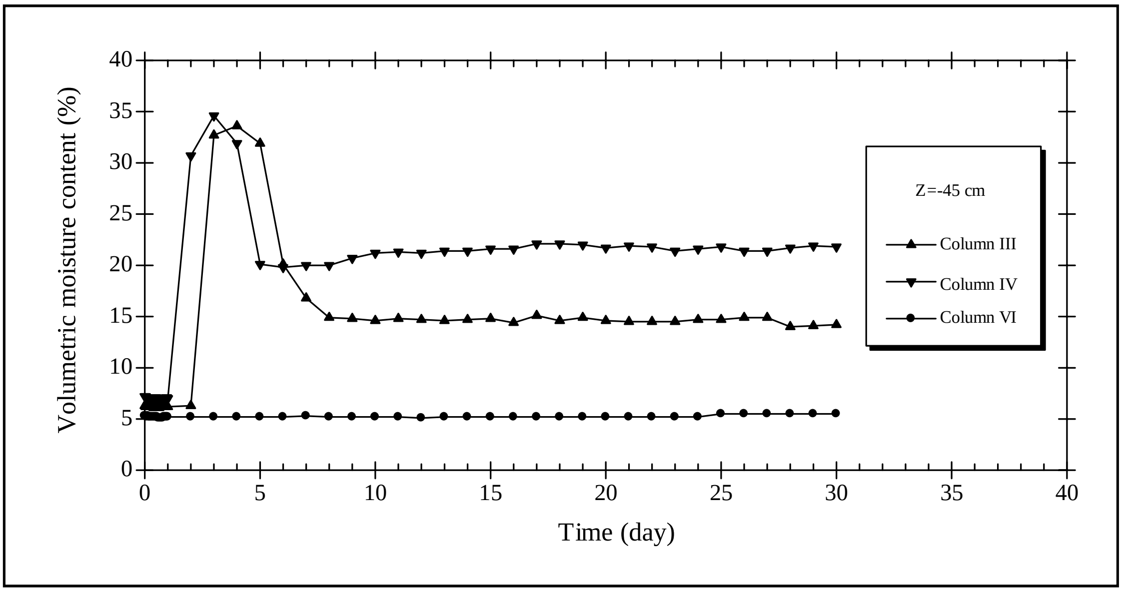


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-85 cm ของแท่งดิน III IV และ VI

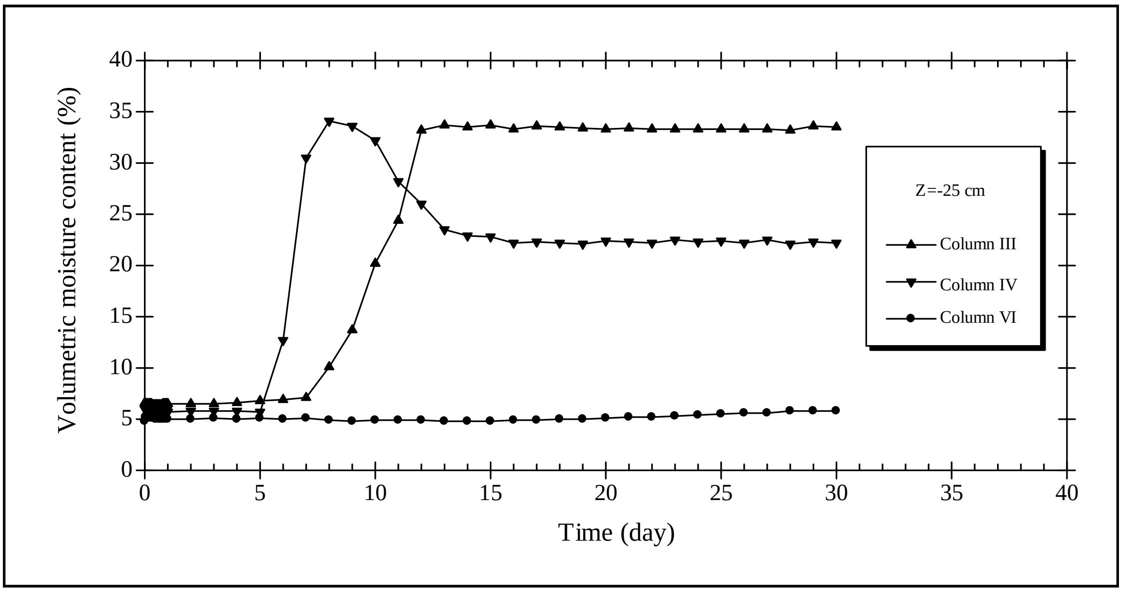


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-65 cm ของแท่งดิน III IV และ VI

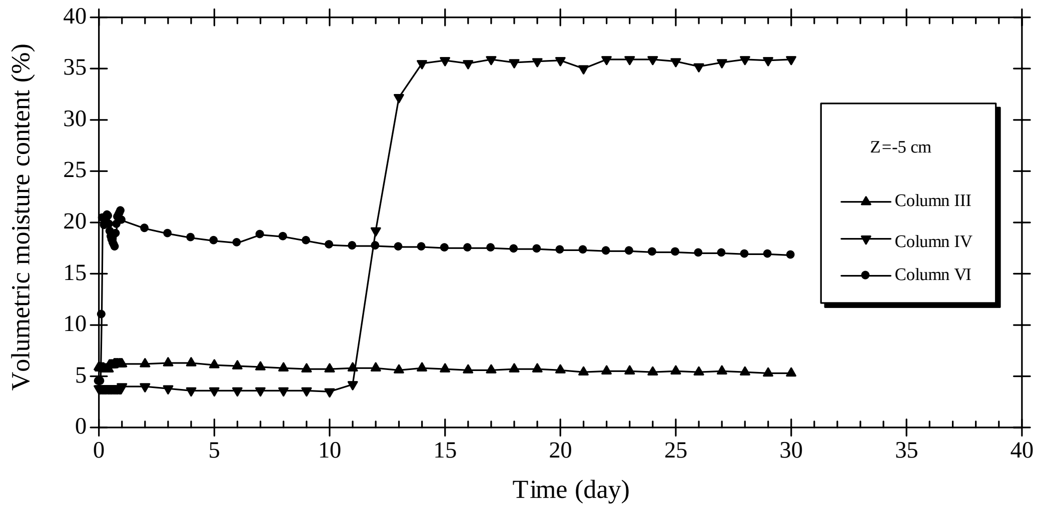
เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 65 เซนติเมตร จากผิวดิน ดังรูปที่ 4.15 พบว่าแท่งดิน III และแท่งดิน IV มีความชื้นเพิ่มขึ้นและลดลงแล้วคงที่ในเวลาที่เท่า ๆ กัน แต่เมื่อความชื้นคงที่แล้ว พบว่าความชื้นของแท่งดิน IV มากกว่าความชื้นของแท่งดิน III มีผลคล้ายกับที่ระดับความลึก 85 เซนติเมตร จากผิวดิน แต่ความชื้นของแท่งดิน VI ไม่เพิ่มขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดเพราะว่าความชื้นไม่สามารถขึ้นไปถึงได้ ที่ระดับความลึก 45 เซนติเมตร จากผิวดิน ดังรูปที่ 4.16 ให้ผลคล้ายคลึงกันกับที่ระดับความลึก 65 เซนติเมตร จากผิวดิน แต่พบว่าความชื้นของแท่งดิน IV สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าความชื้นของแต่ดิน III เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร จากผิวดิน ดังรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นว่าความชื้นแท่งดิน IV สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าความชื้นของแต่ดิน III แต่ที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร จากผิวดิน เมื่อความชื้นคงที่พบว่าความชื้นของแท่งดินที่ III เพิ่มขึ้นแล้วคงที่ไม่ลดลง แต่ความชื้นของแท่งดินที่ IV เพิ่มขึ้น และลดลงแล้วคงที่ ส่วนแท่งดินที่ VI ความชื้นไม่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร จากผิวดิน ดังรูปที่ 4.18 พบว่าความชื้นของแท่งดินที่ IV สามารถขึ้นไปถึงผิวดิน มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นแล้วคงที่ไม่ลดลงแตกต่างจากที่ความลึกอื่น ๆ แต่มีผลคล้ายกับแท่งดิน III ที่ความระดับความลึก 25 เซนติเมตร จากผิวดิน ส่วนความชื้นของแท่งดิน III ไม่เพิ่มขึ้น เพราะความชื้นไม่สามารถเคลื่อนที่มาถึงผิวดินได้และความชื้นในดินของแท่งดิน VI มีความชื้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการเพิ่มความชื้นบนผิวดินเพื่อตัดกระบวนการคาพิวลารี



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-45 cm ของแท่งดิน III IV และ VI



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-25 cm ของแท่งดิน III IV และ VI



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ระดับความลึก Z=-5 cm ของแท่งดิน III IV และ VI

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน และความสูงคาพิวลารีระหว่างน้ำใต้ดินที่เป็นน้ำจืดและน้ำเค็ม ในแท่งดินทรายให้ผลคล้ายคลึงกัน เนื่องจากดินทรายที่ใช้ทดสอบมีแรงคาพิวลารีน้อยจึงยังไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ และความสูงคาพิวลารีเป็นผลมาจากแรงคาพิวลารี เมื่อทดลองการเคลื่อนที่ในดินร่วนปนทรายที่มีแรงคาพิวลารีสูงกว่าดินทราย พบว่าความสูงคาพิวลารีของน้ำใต้เค็มน้ำเค็มสูงกว่าน้ำใต้ดินจืด ที่ระดับความลึกของดินเท่ากันที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น พบว่าน้ำใต้ดินเค็มจะมีอิทธิพลทำให้ดินมีความชื้นมากกว่าน้ำใต้ดินจืด เนื่องจากสารละลายเกลือ (NaCl) ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ประจุของโซเดียม (Na+) จะดูดซับน้ำเข้าหาตัวเองด้วยแรงดึงดูดออสโมทิก จากผลการทดลองระหว่างดินทราย และ ดินร่วนปนทรายแสดงให้เห็นว่าแรงคาพิวลารีมีความแตกต่างกันตามชนิดและโครงสร้างดิน นอกจากนี้ ยังพบว่าดินร่วนปนทรายซึ่งเป็นดินจากพื้นที่ดินเค็มเป็นดินที่สามารถเก็บความชื้นไว้ที่ระดับผิวดินได้มากกว่าดินที่ระดับความลึกอื่น ๆ เมื่อเกิดการระเหยของน้ำบนผิวดินจึงทำให้เกิดคราบเกลือสะสมบนผิวดินได้มาก การทดลองพบว่าสามารถตัดกระบวนคาพิวลารีเพื่อลดการเคลื่อนที่ขึ้นมาบนผิวดินของน้ำใต้ดินเค็มได้ด้วยการควบคุมให้ผิวดินมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการควบคุมความชื้นบนผิวดินจึงเป็นวิธีการหนึ่งสำหรับการแก้ไขปัญหาดินเค็มในพื้นที่ บ้านหนองเขวา ตำบลค้างพลู อำเภอโนนไทย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นวิธีที่เกษตรกรสามารถทำเองได้ ยกตัวอย่างเช่นการใช้อินทรียวัตถุ เช่น แกลบ ฝาง เศษหญ้าผสมกับปุ๋ยคอก น้ำสกัดชีวภาพ (EM) และน้ำส้มควันไม้คลุมบนผิวดินในช่วงฤดูแล้ง เพื่อลดการระเหย รักษาความชื้นบนผิวดิน และเป็นการปรับปรุงดินให้สามารถเพาะปลูกได้ วิธีการนี้ควรทำทันทีหลังจากฤดูฝน เพราะน้ำฝนจะชะล้างคราบเกลือออกจากผิวดินและยังทำให้ผิวดินมีความชื้นสูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาดินเค็มในพื้นที่ดังกล่าวควรมีการศึกษาหาแนวทางการแก้ไขในระดับลุ่มน้ำเช่นการลดระดับน้ำใต้ดินควบคู่ไปด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ซึ่งอยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาต่อไปถึงปัจจัยตามธรรมชาติที่ควบคุมกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มให้ครอบคลุมในทุกประเด็นมากขึ้นเช่นการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศตามเวลา

ปัจจัยกระบวนการในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ จากผลการทดลองนี้ควรนำไปวิเคราะห์ตามหลักการสมดุลของน้ำ สมดุลของเกลือ ตลอดจนหลักการเคลื่อนที่ของน้ำเช่นการเคลื่อนที่ด้วยการพา การแพร่ และการกระจาย เพื่อนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ตามหลักการเหล่านี้ และสามารถสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มในแนวดิ่งได้ในที่สุด

รายการอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน, 2535 **แผนที่การแพร่กระจายดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มาตราส่วน 1: 500,000,** กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมทรัพยากรธรณี, 2548 ธรณีวิทยาพื้นที่โครงการศึกษาปัจจัยทางธรณีวิทยาที่ทำให้เกิดดิน เค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, **รายงานฉบับสมบูรณ์ กรมทรัพยากรธรณีฯ**.

ชัยนาม ดิสถาพร, 2532 วิธีป้องกันและควบคุมปัญหาดินเค็ม, **เอกสารคู่มือเจ้าหน้าที่ของรัฐ เรื่องดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ**, รวบรวมโดย สมศรี อรุณิรท์, กรมพัฒนาที่ดินฯ.

ดิเรก ฮุ่นตระกูล, 2531 การประเมินปัญหาและศักยภาพดินเค็มในบริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง, **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธงชัย จารุพพัฒน์ , 2541 สถานการณ์ป่าไม้ของประเทศไทยในช่วงระยะเวลา 37 ปี (2504-2541), **รายงานฉบับสมบูรณ์ ส่วนวิเคราะห์ทรัพยากรป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้.**

ประทีป ดวงเดือน, 2531 **คุณสมบัติของดินทางกายภาพ**, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประสิทธิ์ ตันประภาส และ ไพรัช พงษ์วิเชียร, 2549 การจัดการมวลชีวภาพของหญ้าแฝก และถั่วพร้าเพื่อการฟื้นฟูดินเค็มอย่างยั่งยืน, **รายงานฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดินฯ.**

มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2551 โครงการศึกษา HYDROGEOLOGICAL MODEL เพื่อคาดคะเนการกระจายดินเค็มและน้ำเค็มระยะยาว โครงการ โขง-ชี-มูล, **รายงานฉบับสมบูรณ์ กรมชลประทานฯ.**

ยุทธลักษณ์ ชูวรเชษฐ์, 2548 การศึกษาระดับของความเค็มที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย, **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภสิทธิ์ คนใหญ่, 2552 การพัฒนาวิธีการวัดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำและมวลสารในดินเค็มที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ, **วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น**.

สมศรี อรุณินท์, 2539 ดินเค็มในประเทศไทย, **รายงานฉบับสมบูรณ์ กระทรวงเกษตร และสหกรณ์, กรุงเทพฯ.**

อรุณี ยูวะนิยม, 2525 ดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, **เอกสารความรู้เรื่องดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ**, กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

Akudago, J.A., Nishigaki, M., Chegbeleh, L.P., Komatsu, M., and Alim, M.A. (2009). Capillary cut design for soil groundwater salinity control, **Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology Okayama University,** Vol.14 No 1:17-22.

American Society for Testing and Materials. (2008). **Test Designation D 6836 – 02, Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge**:ASTM, USA.

Arunin, S. (1984). Characteristics and manament of salted-affected soils in Northeast Thailand. In:**Ecology and management of problem soils in Asia**, FFTA book series No.27 pp.336-351.

Arunin, S. (1992). Strategies for utilizing salt affected lands in Thailand, **Bangkok : Department of Land Development**, Ministry of Agriculture and Cooperatives.

Danckwerts, P.V. (1953). **Continuous flow system. Chem**. Eng. Sci., 2(1), 1-13.

Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: Wiley.

Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994). Equations for the soil water characteristic curve, **Canadian Geotechnical Journal**.31:521-532

Inoue, M., Ould Ahmed, B.A., Saito, T., and Irshad, M. (2008). Comparison of Twelve Dielectric Moisture Probes for Soil Water Measurement under Saline Conditions, **American Journal of Environmental Sciences** 4 (4): 367-372.

JICA. (1991). **The master plan study on the integrated rural development of salted-affected land in Northeast Thailand.**

Kohyama, K., Wichaidit, P., Pramojanee, P., Sukchan, S., and Wada, H. (1993). Salinity in the watershed Of Northeast Thailand. In: Kokyama K. and Subhasaram T. (eds.), **Salt-affected soil in Northeast Thailand, their salinity and amelioration**, ADRC Technical paper No.12 pp.7-26.

Petrukhin, V.P. (1993). **Construction of Structures on Saline Soils. A.A.Balkema Publishers, Brookfield.**

Puengpan, N. (1992). Salted-affected soils in Northeast Thailand and strategies of their amelioration **, PhD. Thesis**, Tokyo University of Agriculture, Tokyo, Japan.

Puengpan, N., Subhasaram, T., and Wada, H. (1993). Techniques and strategies to ameliorate salt- affected soils in Northeast Thailand. In : Kokyama K. and Subhasaram T. (eds.), **Salt-affected soil in Northeast Thailand, their salinity and amelioration**, ADRC Technical paper No.12 pp.27-44.

Scoot, H.D. (2000). Soil physics : **agricultural and environmental applications**. Ames : Lowa State University Press.

Shingo, I., Toshio, T., and Benno, P.W. (1988). **Soil water interactions mechanisms and applications**, ISBN 0-8247-7767-0**.**

Sinanuwong, S., and Takaya, Y. (1994a). Saline soils in Northeast Thailand : Their possible origin as deduced from field evidence, **Southeast Asian studies**, 12, 105-120.

Sinanuwong, S., and Takaya, Y. (1994b). Distribution of saline soils in Korat basin of Thailand, **Southeast Asian studies**, 12, 365-382.

Topark-Ngarm, B. (1988). Study on increasing productivity of saline soil, **PhD. Thesis**, Tokyo University of Agriculture, Tokyo, Japan.

Topp, G.L., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmission lines, **Water resource**. Res. 16:574-582.

United State Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, **Agriculture Handbook** No.60 USDA. 160 pp.

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ตารางที่ ก-1 เปอร์เซนต์การกระจายขนาดคละเม็ดดิน ของดินร่วนปนทราย สำหรับรูปที่ 4.1

Diameter(mm)	%Finer	Diameter(mm)	%Finer	Diameter(mm)	%Finer
0.00005	0	0.00144	0.43	0.04143	30.85
0.00006	0	0.00168	0.52	0.04827	38.22
0.00007	0	0.00195	0.6	0.05623	46.18
0.00008	0	0.00228	0.7	0.06551	54.24
0.00009	0	0.00265	0.8	0.07632	61.88
0.00011	0	0.00309	0.92	0.08891	68.74
0.00013	0	0.0036	1.07	0.10358	74.71
0.00015	0	0.00419	1.26	0.12067	79.5
0.00017	0	0.00488	1.51	0.14058	83.28
0.0002	0	0.00569	1.82	0.16377	86.27
0.00023	0	0.00663	2.21	0.1908	88.72
0.00027	0	0.00772	2.7	0.22228	90.82
0.00031	0	0.009	3.29	0.25895	92.72
0.00036	0	0.01048	4.01	0.30168	94.5
0.00042	0	0.01221	4.89	0.35146	96.15
0.00049	0	0.01422	6	0.40945	97.58
0.00058	0	0.01657	7.42	0.47701	98.72
0.00067	0	0.01931	9.92	0.55571	99.5
0.00078	0.1	0.02249	11.75	0.64741	99.93
0.00091	0.18	0.0262	14.98	0.75423	100
0.00106	0.26	0.03053	19.17	0.87867	100
0.00124	0.34	0.03556	24.45	1	100

ตารางที่ ก-2 ผลทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลารีและความชื้นโดยปริมาตร ของดินทรายและดินร่วนปนทราย สำหรับรูปที่ 4.2

แรงคาพิวลารี (kPa)	ความชื้นโดยปริมาตร (%)		แรงคาพิวลารี (kPa)	ความชื้นโดยปริมาตร (%)	
	ดินทราย	ดินร่วนปนทราย		ดินทราย	ดินร่วนปนทราย
0	37	36	150	1.731	6.822
0	37	36	150	1.884	6.669
0	37	36	150	1.935	6.364
20	8.71	28.45	200	1.629	5.498
20	8.45	29.37	200	1.578	4.989
20	8.5	31	200	1.629	5.549
50	3.2	24.996	250	1.578	5.04
50	3.67	25.811	250	1.425	4.48
50	3.18	25.353	250	1.68	4.989
70	2.44	13.44	350	1.527	4.378
70	2.55	13.593	350	1.324	4.175
70	2.29	14.204	350	1.527	4.073
80	2.14	13.185	450	1.375	3.869
80	2.24	11.404	450	1.222	3.818
80	2.34	14.509	450	1.018	3.818
100	2.09	10.284			
100	2.087	9.52			
100	2.342	10.538			

ตารางที่ ก-3 ผลการปรับเทียบหัววัดในดินทราย สำหรับรูปที่ 4.3

น้ำใต้ดินจืด (DG)			น้ำใต้ดินเค็ม (DG)		
θ' (%)	w (%)	θ (%)	θ' (%)	w (%)	θ (%)
2.1	0.18	0.283	2.1	0.18	0.258
3.9	0.18	0.283	3.9	0.18	0.258
2.5	0.18	0.283	2.5	0.18	0.258
2	0.18	0.283	2	0.18	0.258
1.6	0.18	0.283	1.6	0.18	0.258
4.6	1.846	2.818	12.1	1.807	2.531
6	1.846	2.818	12.5	1.807	2.531
5.3	1.846	2.818	11.3	1.807	2.531
5.7	1.846	2.818	11.4	1.807	2.531
4	1.846	2.818	11	1.807	2.531
8.2	3.925	5.958	22.5	3.951	5.501
9.6	3.925	5.958	25.6	3.951	5.501
7.4	3.925	5.958	23.5	3.951	5.501
7.2	3.925	5.958	22.2	3.951	5.501
8.1	3.925	5.958	22.2	3.951	5.501
12.9	8.158	12.342	46.9	7.566	10.344
14.5	8.158	12.342	47.3	7.566	10.344
12.2	8.158	12.342	44.4	7.566	10.344
11.3	8.158	12.342	44.8	7.566	10.344
12.9	8.158	12.342	43.7	7.566	10.344
17.9	14.334	21.44	51	12.31	16.976
20.7	14.334	21.44	59.1	12.31	16.976
17	14.334	21.44	56.3	12.31	16.976
18.1	14.334	21.44	53.9	12.31	16.976
18.1	14.334	21.44	54	12.31	16.976

ตารางที่ ก-4 ผลการปรับเทียบหัววัดในดินร่วนปนทราย สำหรับรูปที่ 4.4

น้ำใต้ดินจืด (DG)			น้ำใต้ดินเค็ม (DG)		
θ' (%)	w (%)	θ (%)	θ' (%)	w (%)	θ (%)
7	0.570	0.746	7	0.570	0.678
7.8	0.585	0.762	7.8	0.585	0.693
5.4	0.585	0.765	5.4	0.585	0.696
6.3	0.57	0.743	6.3	0.570	0.676
6.3	0.57	0.743	6.3	0.570	0.676
7.3	0.818	1.009	9.1	1.161	1.347
8.6	0.875	1.078	10.2	1.163	1.345
7.2	0.818	1.009	9	1.161	1.347
7.7	0.875	1.078	8.8	1.163	1.345
7.6	0.818	1.009	9.6	1.161	1.347
10.8	1.304	1.664	18.8	2.281	2.334
13.5	1.276	1.6	19	2.262	2.327
9.8	1.304	1.664	18.2	2.281	2.567
10.3	1.276	1.629	20	2.262	2.56
9.1	1.276	1.629	17.9	2.262	2.56
14.5	2.125	2.288	29.6	3.456	4.023
15.8	2.141	2.303	35.4	3.493	4.07
14.4	2.125	2.288	31.9	3.456	4.023
15.6	2.141	2.306	31.8	3.493	4.478
15	2.125	2.288	32.4	3.456	4.023
16.2	2.405	3.021	42.9	4.708	4.951
17.9	2.228	2.762	41.9	4.630	4.907
15.3	2.405	3.021	42.7	4.708	4.951
15.9	2.228	2.8	42.7	4.630	4.907

ตารางที่ ก-4 ผลการปรับเทียบหัววัดในดินร่วนปนทราย สำหรับรูปที่ 4.4 (ต่อ)

น้ำใต้ดินจืด (DG)			น้ำใต้ดินเค็ม (DG)		
θ' (%)	w (%)	θ (%)	θ' (%)	w (%)	θ (%)
16.1	2.405	3.021	42.9	4.630	4.907
20.2	3.108	3.431	69.7	9.53	12.714
21.9	3.216	3.599	66.2	10.08	13.239
18.8	3.108	3.431	65.4	9.53	12.714
21.4	3.216	3.551	66	10.08	13.239
19.7	3.108	3.431	68.4	9.53	12.714
24.7	11.088	13.998			
28	10.373	13.095			
22.3	11.088	13.998			
24.9	10.373	13.095			
25.1	11.088	13.998			
40.6	20.16	33.048			
40.2	19.01	31.167			
39.2	20.16	33.048			
40.4	19.01	31.167			
39.2	20.16	33.048			

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน I

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน I ครั้งที่ 1 (%)					ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน I ครั้งที่ 2 (%)				
(นาที)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3.435	0	0	0	0	4.232	0	0	0	0
15	17.088	0	0	0	0	18.681	0	0	0	0
20	28.26	0	0	0	0	28.598	0	0	0	0
25	28.405	0	0	0	0	28.598	0	0	0	0
30	28.308	0	0	0	0	28.598	0	0	0	0
60	28.211	0	0	0	0	28.646	0	0	0	0
120	28.26	1.772	0	0	0	28.598	2.987	0	0	0
180	28.211	3.019	0	0	0	28.598	4.917	0	0	0
240	28.211	4.821	0	0	0	28.453	5.866	0	0	0
300	28.017	6.068	0	0	0	28.405	6.537	0	0	0
360	28.066	6.346	0	0	0	28.357	7.07	0	0	[illegible]
420	27.968	7.177	0	0	0	28.357	7.468	0	0	[illegible]
480	28.114	7.732	0	0	0	28.308	7.995	0	0	[illegible]
540	28.017	8.286	0	0	0	28.308	8.323	0	0	0

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน I (ต่อ)

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน I ครั้งที่ 1 (%)					ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน I ครั้งที่ 2 (%)				
(นาที)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
600	27.871	8.563	0	0	0	28.211	8.649	0	0	0
660	27.871	8.979	0	0	0	28.26	8.844	0	0	0
720	27.773	8.979	0	0	0	28.26	9.039	0	0	0
780	27.773	8.979	0	0	0	28.211	9.233	0	0	0
840	27.773	9.533	0	0	0	28.163	9.298	0	0	0
900	27.724	9.533	0	0	0	28.211	9.362	0	0	0
960	27.773	10.088	0	0	0	28.211	9.427	0	0	0
1020	27.773	10.088	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0
1080	27.822	10.088	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0
1140	27.773	10.504	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0
1200	27.822	10.642	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0
1260	27.822	10.504	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0
1320	27.871	10.642	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0
1380	27.773	10.504	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0
1440	27.773	10.504	0	0	0	28.211	9.491	0	0	0

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน II

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน II ครั้งที่ 1 (%)					ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน II ครั้งที่ 2 (%)				
(นาที)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	23.51	0	0	0	0	20.22	0	0	0	0
20	25.63	0	0	0	0	24.39	0	0	0	0
25	25.87	0	0	0	0	24.93	0	0	0	0
30	26.06	0	0	0	0	25.09	0	0	0	0
60	26.54	0	0	0	0	25.8	0	0	0	0
120	27.35	4.06	0	0	0	25.8	4.59	0	0	0
180	27.73	9.31	0	0	0	25.8	10.57	0	0	0
240	27.1	12.82	0	0	0	25.8	13.12	0	0	0
300	26.99	14.72	0	0	0	25.8	15.25	0	0	0
360	26.9	15.71	0	0	0	25.8	16.1	0	0	0
420	27.04	16.32	0	0	0	25.8	16.65	0	0	0
480	26.82	16.76	0	0	0	26.57	16.62	0	0	0
540	26.75	17	0	0	0	26.37	16.58	0	0	0

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน II (ต่อ)

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน II ครั้งที่ 1 (%)					ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน II ครั้งที่ 2 (%)				
(นาที)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
600	26.64	17.13	0	0	0	26.18	16.49	0	0	0
660	26.59	17.18	0	0	0	26.18	16.59	0	0	0
720	26.75	17.19	0	0	0	26.33	16.73	0	0	0
780	26.7	17.18	0	0	0	26.41	16.74	0	0	0
840	26.54	17.23	0	0	0	26.49	16.75	0	0	0
900	26.51	17.21	0	0	0	26.49	16.81	0	0	0
960	26.49	17.23	0	0	0	26.53	16.79	0	0	0
1020	26.44	17.25	0	0	0	26.7	16.79	0	0	0
1080	26.51	17.21	0	0	0	26.57	16.79	0	0	0
1140	26.49	17.19	0	0	0	26.57	16.79	0	0	0
1200	26.47	17.21	0	0	0	26.37	16.79	0	0	0
1260	26.47	17.21	0	0	0	26.62	16.79	0	0	0
1320	26.37	17.21	0	0	0	26.18	16.82	0	0	0
1380	26.51	17.21	0	0	0	26.41	16.76	0	0	0
1440	26.51	17.21	0	0	0	26.25	16.78	0	0	0

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน III

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน III (%)				
(วัน)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
0	6.7	7.3	6.3	6.6	5.9
0.04	6.7	7.2	6.2	6.5	5.8
0.08	6.7	7.2	6.2	6.5	5.8
0.13	21.5	7.2	6.2	6.5	5.8
0.17	32	7.2	6.2	6.5	5.8
0.21	31.8	7.1	6.2	6.5	5.8
0.25	28.6	7.1	6.2	6.5	5.7
0.29	26.3	7.1	6.2	6.5	5.7
0.33	25.2	7.1	6.2	6.4	5.7
0.38	24.8	7.1	6.1	6.4	5.7
0.42	23.3	7.1	6.1	6.4	5.7
0.46	22.8	7	6.1	6.4	6.1
0.5	20.2	7	6.1	6.4	6.1
0.54	19.7	7	6.1	6.4	6.1
0.58	17.8	7.1	6.1	6.4	6.1
0.63	16.4	7.1	6.1	6.4	6.1
0.67	15.4	7.1	6.2	6.4	6.2
0.71	14.6	7.3	6.2	6.4	6.2
0.75	13.9	8.7	6.2	6.4	6.2
0.79	13.6	9	6.2	6.5	6.2
0.83	13.5	10.1	6.2	6.5	6.2
0.88	13.5	13.7	6.2	6.5	6.2
0.92	13.5	20.2	6.2	6.5	6.2
0.96	13.7	24.4	6.3	6.5	6.2
1	13.7	33.2	6.2	6.5	6.2
2	13.9	22.8	6.3	6.5	6.2

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน III (ต่อ)

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน III (%)				
(วัน)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
3	13.9	16.8	32.7	6.5	6.3
4	14	14.9	33.6	6.6	6.3
5	14.1	14.8	31.9	6.8	6.1
6	14.2	14.6	20.1	6.9	6
7	14.3	14.8	16.8	7.1	5.9
8	14.4	14.7	14.9	10.1	5.8
9	14.5	14.6	14.8	13.7	5.7
10	14.6	14.7	14.6	20.2	5.7
11	14.7	14.8	14.8	24.4	5.8
12	14.7	14.4	14.7	33.2	5.8
13	14.8	15.1	14.6	33.7	5.6
14	14.9	14.6	14.7	33.5	5.8
15	15	14.9	14.8	33.7	5.7
16	15.1	14.6	14.4	33.3	5.6
17	15.2	14.5	15.1	33.6	5.6
18	15.3	14.5	14.6	33.5	5.7
19	15.4	14.5	14.9	33.4	5.7
20	15.5	14.7	14.6	33.3	5.6
21	15.2	14.7	14.5	33.4	5.4
22	15.2	14.9	14.5	33.3	5.5
23	15.8	14.9	14.5	33.3	5.5
24	14.9	14	14.7	33.3	5.4
25	14.9	14.1	14.7	33.3	5.5
26	14	14.2	14.9	33.3	5.4
27	15.1	14.3	14.9	33.3	5.5
28	15.2	14.4	14	33.2	5.4
29	15.3	14.5	14.1	33.6	5.3
30	15.4	14.6	14.2	33.5	5.3

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน IV และ V

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน IV และ แท่งดิน V (%)					
(วัน)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Temp. Z=-5 ซม.
0.00	7.2	6.7	7.2	6	3.8	27.7
0.02	7.2	6.7	7.2	6	3.8	30.4
0.04	7.2	6.8	7.2	6	3.8	27.3
0.08	9.6	6.7	7.1	6	3.8	26.7
0.13	34	6.7	7.1	6	3.8	27.1
0.17	24.5	6.7	7.1	5.9	3.8	26.9
0.21	22	6.6	7.1	5.9	3.8	25.5
0.25	20.3	6.6	7.1	5.9	3.8	29.3
0.29	19.6	6.7	7.1	5.9	3.8	26.5
0.33	19.2	6.7	7.1	6	3.8	28.7
0.38	19.1	6.7	7.1	6	3.8	27.1
0.42	19.1	6.7	7.1	5.9	3.8	27.1
0.46	19.1	6.7	7.1	5.9	3.8	27
0.50	19.1	6.6	7.1	5.9	3.8	27
0.54	19.1	6.7	7	5.9	3.8	26.9
0.58	19.1	6.7	7	5.9	3.8	26.9
0.63	19.1	6.7	7	5.9	3.8	26.9
0.67	19.2	6.9	7	5.9	3.8	26.9
0.71	19.3	7.4	7	5.9	3.8	25.9
0.75	19.3	8.3	7	5.9	3.8	26.6
0.79	19.3	10.2	7	5.9	3.8	26.8
0.83	19.4	16.3	7	5.9	3.8	26.2
0.88	19.4	21.8	7	5.9	3.8	26
0.92	19.4	24	7.1	5.9	3.8	26.1
0.96	19.5	25.2	7.1	5.9	3.8	26.3
1	19.5	33.2	7	5.7	4	26.4
2	19.9	18.6	30.7	5.8	4	26.6

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน IV และ V (ต่อ)

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน IV และ แท่งดิน V (%)					
(วัน)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Temp. Z=-5 ซม.
3	20.4	19.5	34.6	5.8	3.8	26.7
4	20.6	20	31.9	5.8	3.6	26.9
5	20.8	20.2	20.1	5.7	3.6	27.4
6	21	20.5	19.8	12.7	3.6	27.5
7	21.2	20	20	30.5	3.6	28.5
8	21.1	20.2	20	34.1	3.6	28.5
9	21.6	20.6	20.7	33.6	3.6	28
10	21.8	20.9	21.2	32.2	3.5	29.5
11	21.9	21	21.3	28.2	4.2	27.7
12	21.7	21	21.2	26	19.2	30.4
13	21.9	21.1	21.4	23.5	32.2	27.3
14	21.9	21.2	21.4	22.9	35.5	26.7
15	22	21.3	21.6	22.8	35.8	27.1
16	22	21.3	21.6	22.2	35.5	26.9
17	22.2	21.6	22.1	22.3	35.9	27.1
18	22.3	21.7	22.1	22.2	35.6	27.1
19	22.2	21.8	22	22.1	35.7	27
20	22.1	21.7	21.7	22.4	35.8	27
21	22.1	21.8	21.9	22.3	35	26.9
22	22.1	21.7	21.8	22.2	35.9	26.9
23	22	21.5	21.4	22.5	35.9	26.9
24	22.1	21.6	21.6	22.3	35.9	26.9
25	22.2	21.7	21.8	22.4	35.7	25.9
26	22.3	21.5	21.4	22.2	35.2	26.6
27	22.3	21.5	21.4	22.5	35.6	26.8
28	22.1	21.7	21.7	22.1	35.9	26.2
29	22.1	21.8	21.9	22.3	35.8	26

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน IV และ V (ต่อ)

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน IV และ แท่งดิน V (%)					
(วัน)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Temp. Z=-5 ซม.
30	22.1	21.7	21.8	22.2	35.9	26.1
31	22	21.5	21.4	22.2	41	41.2
32	22.1	21.6	21.6	22.2	39	41
33	22.2	21.7	21.8	22.4	41	40.9
34	22.3	21.5	21.4	22.2	39	41.1
35	22.3	21.5	21.4	22.5	41	41.2
36	22.5	21.1	21.8	22.1	41	41.2
37	22.5	21.2	21.8	22.3	42	41.3
38	22.5	21.3	22	22.2	41	41.5
39	22.5	21.2	21.9	22.2	41	41.9
40	22.5	21.1	21.8	22.4	41	42.4
41	22.5	21.1	21.9	22.2	41	41.5
42	22.4	21.1	21.8	22.5	41	40.9
43	22.4	21.1	21.8	22.1	41	40.9
44	22.2	21	21.6	22.3	41	40.6
45	22.3	21	21.7	22.1	41	40.4
46	22.3	21	21.7	22.3	41	40.3
47	22.5	21.1	21.8	22.2	41	40.2
48	22.5	21	21.8	22.5	41	40.4
49	22.6	21.1	21.9	22.1	41	41.7

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน IV และ V (ต่อ)

เวลา (วัน)	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน IV และ แท่งดิน V (%)					
	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.	Temp. Z=-5 ซม.
50	22.5	21	21.8	22.3	41	41.9
51	22.4	20.9	21.7	22.2	41	42
52	22.5	21	21.9	22.2	41	42
53	22.5	21	21.9	22.2	41	41.9
54	22.6	21	22	22.2	41	41.8
55	22.6	21	22	22.2	41	41.8
56	22.6	21	22	22.2	41	41.5
57	22.5	21	22	22.4	42	41.6
58	22.4	21	22	22.3	42	41.5
59	22.4	21	21.9	22.5	41	40.9
60	22.4	20.9	21.9	22.1	41	39.8

ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน VI

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน VI (%)				
(วัน)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
0.00	5.3	5.7	5.3	4.8	4.5
0.02	5.3	5.6	5.3	5.2	4.5
0.04	5.2	5.6	5.3	5.2	4.5
0.08	5.2	5.5	5.2	5.1	4.5
0.13	25.4	5.5	5.3	5.1	11.0
0.17	36.1	5.5	5.2	5.1	20.4
0.21	36.1	5.5	5.2	5.1	20.4
0.25	36.5	5.5	5.2	5.1	19.7
0.29	35.5	5.5	5.2	5.1	19.8
0.33	35.6	5.5	5.2	5.1	20.3
0.38	36.6	5.5	5.2	5.1	20.7
0.42	35.5	5.4	5.2	5.1	20.6
0.46	33.3	5.5	5.2	5.0	19.8
0.50	31.5	5.4	5.2	5.0	19.1
0.54	25.9	5.4	5.2	5.1	18.6
0.58	24.5	5.4	5.1	5.1	18.3
0.63	23.7	5.4	5.1	5.0	18.0
0.67	22.3	5.4	5.1	5.0	17.8
0.71	21.7	5.4	5.1	5.0	17.6
0.75	20.7	5.4	5.1	5.0	18.9
0.79	20.2	5.4	5.1	5.0	19.8
0.83	19.4	5.4	5.2	5.0	20.5
0.88	19.1	5.4	5.2	5.0	20.7
0.92	18.6	5.4	5.2	5.1	20.9
0.96	18.4	5.4	5.2	5.1	21.1
1.0	18.0	5.5	5.2	5.0	20.2
2.0	18.0	5.4	5.2	5.0	19.4

ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรกับเวลาที่ระดับดินต่าง ๆ ที่ปรับแก้แล้วของแท่งดิน VI (ต่อ)

เวลา	ความชื้นโดยปริมาตร แท่งดิน VI (%)				
(วัน)	Z=-85 ซม.	Z=-65 ซม.	Z=-45 ซม.	Z=-25 ซม.	Z=-5 ซม.
3.0	18.0	5.4	5.2	5.1	18.9
4.0	18.0	5.5	5.2	5.0	18.5
5.0	17.8	5.5	5.2	5.1	18.2
6.0	17.7	5.5	5.2	5.0	18.0
7.0	17.7	5.5	5.3	5.1	18.8
8.0	17.7	5.5	5.2	4.9	18.6
9.0	17.8	5.5	5.2	4.8	18.2
10.0	17.8	5.6	5.2	4.9	17.8
11.0	17.9	5.6	5.2	4.9	17.7
12.0	17.8	5.6	5.1	4.9	17.7
13.0	17.8	5.6	5.2	4.8	17.6
14.0	17.8	5.7	5.2	4.8	17.6
15.0	17.8	5.7	5.2	4.8	17.5
16.0	17.8	5.7	5.2	4.9	17.5
17.0	17.8	5.8	5.2	4.9	17.5
18.0	17.8	5.7	5.2	5.0	17.4
19.0	17.8	5.8	5.2	5.0	17.4
20.0	17.8	5.8	5.2	5.1	17.3
21.0	17.7	5.8	5.2	5.2	17.3
22.0	17.7	5.8	5.2	5.2	17.2
23.0	17.7	5.9	5.2	5.3	17.2
24.0	17.7	5.9	5.2	5.4	17.1
25.0	17.7	6.0	5.5	5.5	17.1
26.0	17.7	6.0	5.5	5.6	17.0
27.0	17.7	6.1	5.5	5.6	17.0
28.0	17.7	6.1	5.5	5.8	16.9
29.0	17.7	6.2	5.5	5.8	16.9
30.0	17.7	6.2	5.5	5.8	16.8

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

หฤทัย มาศโค้ง ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร และอวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 2554 **การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มภายใต้กระบวนการคาพิวลารีในดินทรายและดินร่วนปนทรายจากพื้นที่ดินเค็ม จ.นครราชสีมา.** วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ. วารสารปีที่ 2 ฉบับที่ 2

หฤทัย มาศโค้ง ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร และอวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 2554 **การศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำเค็มในดินทรายภายใต้กระบวนการคาพิวลารี.** เอกสารประกอบการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16. มหาวิทยาลัยมหิดล (อยู่ระหว่างรอนำเสนอ)

วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
Technical Education Journal King Mongkut's University of Technology North Bangkok

แบบตอบรับบทความเพื่อลงพิมพ์
วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2554

ที่ ๔๗/2554 วันที่ ๔ เมษายน 2554

เรื่อง การรับบทความเพื่อลงพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน คุณหฤทัย มาศโค้ง

ตามที่ท่านได้จัดส่งบทความวิจัย เรื่อง "การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มภายใต้กระบวนการคาพิวลารีในดินทรายและดินร่วนปนทรายจากพื้นที่ดินเค็ม จ.นครราชสีมา" มาเพื่อพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือนั้น ในการนี้ขอเรียนให้ท่านทราบว่ากองบรรณาธิการวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้รับบทความของท่านเพื่อลงพิมพ์ในวารสารปีที่ 2 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2554

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และขอขอบคุณที่ท่านส่งบทความเพื่อลงพิมพ์ในวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือในครั้งนี้

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วิภาวิวัฒน์)
บรรณาธิการวารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 โทรศัพท์ / โทรสาร 0-2913-2500-24 ต่อ 3221
www.journal.fte.kmutnb.ac.th, E-mail: journal.fte@kmutnb.ac.th

การเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มภายใต้กระบวนการคาพิวลารีในดินทราย และดินร่วนปนทรายจากพื้นที่ดินเค็ม จ.นครราชสีมา

หฤทัย มาศโค้ง[1*] ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร[2] และอวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์[3]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของน้ำในดินภายใต้กระบวนการคาพิวลารี โดยการจำลองชั้นดินในห้องปฏิบัติการด้วยการบดอัดดินตัวอย่างลงในท่อทรงกระบอกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 100 ซม. กำหนดระดับน้ำใต้ดิน 85 ซม. ต่ำกว่าผิวดิน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ชั้นดินระดับความลึกต่างๆ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 5 กรณี คือ 1.แท่งดิน I : ดินทราย น้ำใต้ดินจืด 2.แท่งดิน II : ดินทราย น้ำใต้ดินเค็ม 3.แท่งดิน III : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินจืด 4.แท่งดิน IV : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินเค็ม และ 5.แท่งดิน V : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินเค็มจำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย ผลการทดลองพบว่า อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน และความสูงคาพิวลารีระหว่างน้ำใต้ดินจืดและน้ำใต้ดินเค็ม สำหรับดินทรายมีผลไม่แตกต่างกันแต่สำหรับดินร่วนปนทราย ซึ่งเป็นตัวอย่างดินจากพื้นที่ดินเค็ม จ.นครราชสีมา ให้ผลที่ต่างกันมากคือ น้ำใต้ดินเค็มทำให้เกิดความสูงคาพิวลารีที่สูงกว่าและความชื้นเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่า และมากกว่าที่ระดับความลึกของดินเท่ากัน เนื่องจากประจุของโซเดียม (Na+) ในสารละลายเกลือที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะดูดซับน้ำเข้าหาตัวเอง และพบว่าสำหรับดินร่วนปนทรายแท่งดินมีการสะสมความชื้นที่ระดับผิวดินมากกว่าที่ระดับความลึกอื่นๆ ดังนั้นเมื่อเร่งการระเหยของน้ำผิวดินจึงทำให้เกิดคราบเกลือสะสมบนผิวดินได้มากเช่นเดียวกับที่เกิดในสภาพธรรมชาติ

คำสำคัญ: ความดันคาพิวลารี แท่งดิน น้ำเค็ม การเคลื่อนที่ของความชื้น

---

[1] นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[2,3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-4422-4421, E-mail:haruetai.m@hotmail.com

Saline ground water movement under capillary in soil column for sand and sandy loam in salinity - affected area, Nakhon Ratchasima province

Haruetai Maskong[1*] Chatchai Jothityangkoon [2] and Avirut Chinkulkijniwat[3]

Abstract

This paper presents experimental results in laboratory based on the investigation of saline groundwater movement influenced by capillary force. Soil layer is simulated by compacted soil sample in transparent tube of diameter 10 cm and 100 cm height and set groundwater level of 85 cm below soil surface. The experimental studies are divided to 5 different cases: 1) Column I: Sand with deionized groundwater(DG) 2) Column II: Sand with saline groundwater(SG) 3) Column III: Sandy loam with DG 4) Column IV: Sandy loam with SG and 5) Column V: Sandy loam with SG and adding artificial sunlight to increase evaporation . The experimental results show that vertical movement rate and capillary pressure head between DG and SG for sand are similar. For sandy loam sampling from salinity – affected area in Nakhon Ratchasima, the results between DG and SG are explicitly different. SG gives high capillary pressure head, high moisture movement rate and high soil moisture content compare to DG at equal level of soil depth. The cause can be that sodium ion (Na^+) brought by saline water and staying in the voids between soil grain can absorb more water content. For sandy loam, soil moisture is accumulated at the soil surface in high water content, compare to the other level of soil depth. If this saline moisture is evaporated by artificial radiation, salt's crystallization will be found on the soil surface.

KEYWORDS : Capillary pressure head, Soil column, Saline water, Soil moisture movement

[1] Master Degree Graduate, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

[2,3] Assistant Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author Tel.0-4422-4420, E-mail:haruetai.m@hotmail.com

1. บทนำ

การแพร่กระจายดินเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรของเกษตรกรลดลง เนื่องจากสภาพธรณีวิทยาของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีเกลือหินใต้ดิน (หมวดหินมหาสารคาม) กระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณตอนกลางของที่ราบสูงโคราช ชั้นเกลือหินถูกดันตัวขึ้นมาเป็นโดมเกลือ หรือแท่งเกลือ ตามแนวขอบเปราะบางหรือรอยแตก ของเปลือกโลก โดยเฉพาะแนวในทิศทาง เหนือ-ใต้ และแนวตะวันตกเฉียงเหนือตะวันออกเฉียงใต้ บริเวณดังกล่าวพบว่ามีเกลืออยู่ที่ระดับลึกประมาณ 70 ถึง 80 เมตร และด้วยอิทธิพลของน้ำบาดาลสามารถพาความเค็มขึ้นสู่ผิวดิน[2] น้ำฝนที่ซึมลงในพื้นที่รับน้ำ (recharge area) สามารถซึมลงลึกถึงชั้นเกลือหินและละลายเอาเกลือไปด้วย เมื่อน้ำใต้ดินเค็มเหล่านี้ไหลซึมขึ้นมาใกล้ผิวดินบริเวณ พื้นที่สูญเสียน้ำ (discharge area) ซึ่งส่วนใหญ่ระดับน้ำใต้ดินจะตื้น (shallow water table) น้ำใต้ดินเค็มที่อิ่มตัวในระดับตื้นจะถูกแรงคาพิวลารี (capillary force) ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวพาความเค็มขึ้นมาสะสมไว้ในช่องว่าง และน้ำในดินที่เค็มจะถูกพาขึ้นมาสู่ผิวดินโดยการระเหยของน้ำที่ผิวดิน และทิ้งคราบเกลือไว้บนผิวดินโดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน[1] ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มภายใต้กระบวนการคาพิวลารี และนำไปสู่แนวทางป้องกันการแพร่กระจายดินเค็ม โดยการศึกษานี้ได้จำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในห้องปฏิบัติการ โดยใช้แท่งดิน (soil Column) ภายใต้สมมติฐานว่าน้ำใต้ดินมีระดับตื้น และน้ำมีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งด้วยแรงคาพิวลารีเท่านั้น

2. วิธีการทดลองและการทดสอบดิน

การออกแบบการทดลอง เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ใช้วิธีที่เหมือนกับการทดลองของ[3] โดยบดอัดดินลงในท่อทรงกระบอกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 100 ซม. ให้ดินมีความสูง 95 ซม. ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้น(θ) และความเค็มที่ระดับ 5 25 45 65 และ 85 ซม. จากผิวดิน แสดงดังรูปที่ 3 กำหนดให้ระดับน้ำใต้ดินคงที่ที่ 85 ซม. จากผิวดิน โดยมีคุณสมบัติของดินและน้ำดังตารางที่ 1 ตัวอย่างดินมี 2 ประเภทคือ 1) ดินทรายจากท่าทราย อ.พิมาย จ.นครราชสีมา แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ค้างเบอร์ 60 และ 2) ดินร่วนปนทรายจากบ้านหนองเขวา ต.ค้างพลู อ.โนนไทย จ.นครราชสีมา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ประสบปัญหาดินเค็ม แล้วนำดินไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ ได้กราฟการกระจายขนาดคละเม็ดดินแสดงดังรูปที่ 1 แล้วจำแนกชนิดของดินด้วยระบบ USDA ได้เป็นดินร่วนปนทราย น้ำที่ใช้ในการจำลองน้ำใต้ดิน ใช้น้ำสองชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันคือ น้ำจืด ใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) และน้ำเค็ม (Saline water) ใช้เกลือโซเดียมคอลไลท์ (NaCl) บริสุทธิ์ ทำให้เป็นสารละลายเกลืออิ่มตัว ซึ่งการทดลองนี้เมื่อปล่อยน้ำใต้ดินเข้าสู่แท่งดิน จะเริ่มเก็บข้อมูลความชื้น ความเค็ม และอุณหภูมิของดินทุกๆ 5 นาที โดยข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูล (Data loger) ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ได้จำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในกรณีต่างๆ 5 กรณี ดังนี้

1) แท่งดิน I : ดินทราย น้ำใต้ดินจืด
2) แท่งดิน II : ดินทราย น้ำใต้ดินเค็ม
3) แท่งดิน III : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินจืด
4) แท่งดิน IV : ดินร่วนปนทราย น้ำใต้ดินเค็ม
5) แท่งดิน V : ดินร่วนปนทรายน้ำใต้ดินเค็ม จำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย

แต่ละกรณีทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ก่อนการทดลองทั้ง 5 กรณี ตัวอย่างดินทั้ง 2 ได้ถูกนำมาตรวจหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงคาพิวลารี โดยการทดสอบแรงดันอากาศในช่องว่างดินด้วยหม้อแรงดัน ASTM D6836-02 ในห้องปฏิบัติการ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงคาพิวลารีดังภาพที่ 2 ผลการทดลองสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ด้วยสมการของ [6] มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 เมื่อ θ คือ ความชื้นของดิน θ_w คือ ความชื้นของดินที่อิ่มตัว

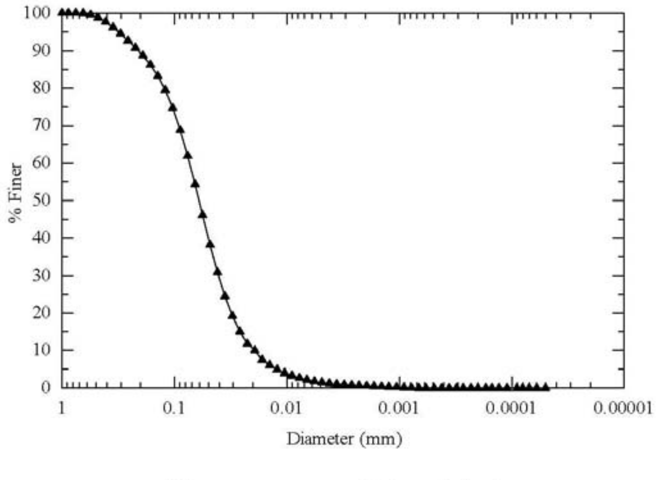
ด้วยน้ำ ψ_m คือ แรงดึงดูดเมทริก h_r , a_f , n_f และ m_f คือ พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างสมการตามเส้นของกราฟ จากความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงคาพิวลารีแสดงให้เห็นว่าที่ความชื้นเท่ากันตัวอย่างดินทรายนี้มีค่าแรงคาพิวลารีน้อยกว่าดินร่วนปนทราย

$$\theta = \theta_w \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi_m}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\left\{ \ln\left[\exp(1) + \left(\frac{\psi_m}{a_f} \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \right]$$

______(1)

อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวเองของดินยังมีแรงดึงดูดออสโมทิก ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดินด้วย โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมาก ความสามารถในการดูดน้ำของดินจะมากขึ้นด้วย[5] ความสัมพันธ์ของแรงดึงดูดน้ำในดิน (soil suction, ψ) น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน จะอยู่ใต้สภาวะแรงดึงดูดที่เรียกว่าแรงดึงดูดเมทริกหรือแรงคาพิวลารี $(\psi_m \text{ or } u_a - u_w)$ และ แรงดึงดูดออสโมทิก (π) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 โดยที่ u_a คือแรงดันอากาศในช่องว่างดิน และ u_w คือ แรงดันน้ำในดิน

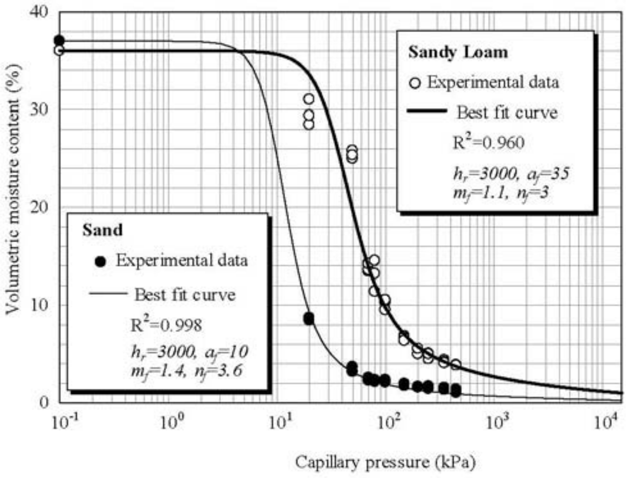
$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \qquad (2)$$



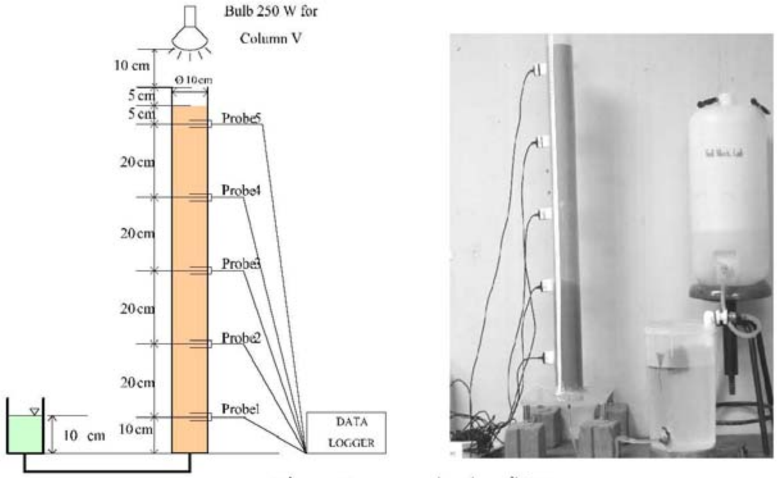
รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละเม็ดดิน ของดินร่วนปนทราย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินและน้ำที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่า
ดินทราย (sand)		
ขนาดเม็ดดิน,d	มม.	0.250 - 0.450
ความถ่วงจำเพาะ	-	2.67
ความหนาแน่นแห้ง, ρ_d	กรัม/ลบ.ซม	1.68
ความพรุน		0.37
ดินร่วนปนทราย (sandy loam)		
ดินเหนียว	%	1
ดินตะกอน	%	37
ดินทราย	%	62
ความถ่วงจำเพาะ	-	2.64
ความหนาแน่นแห้ง, ρ_d	กรัม/ลบ.ซม.	1.70
ความพรุน		0.36
น้ำเค็มและน้ำจืด		
ความเข้มข้นของน้ำเค็ม (NaCl)	%	10
ความเค็มเริ่มต้นของดิน, EC	เดซิซีเมน/เมตร	0
ความหนาแน่นของน้ำเค็ม, ρ_{w_Saline}	กรัม/ลบ.ซม.	1.10
ความหนาแน่นของน้ำจืด , ρ_{w_DI}	กรัม/ลบ.ซม.	1.00



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงคาพิวลารีกับความชื้นดิน (SWCC)

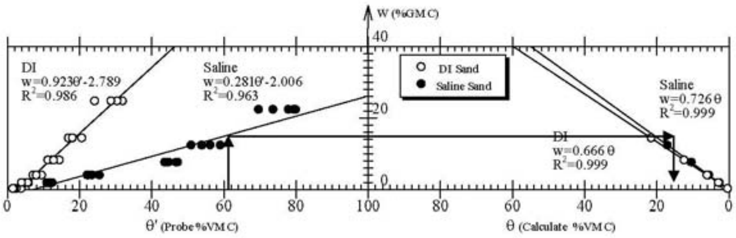


รูปที่ 3 การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน

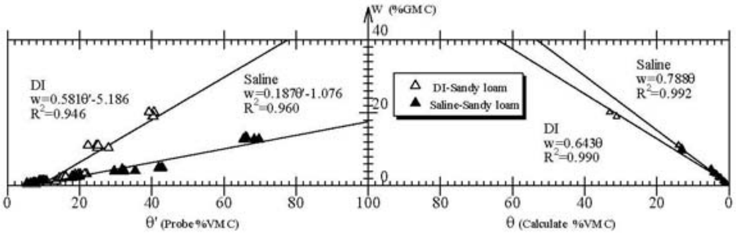
อุปกรณ์วัดข้อมูลดินใช้หัวรับข้อมูลชนิด Frequency Domain Reflectrometry (FDR) รุ่น 5TE ซึ่งสามารถวัดค่าความชื้น ความเค็ม และอุณหภูมิ ของดิน เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อนำมาใช้กับดินที่มีความเค็มจึงต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์ เพราะในดินที่มีความเค็มจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น และจะทำให้ค่าความชื้นของดินมีค่ามากเกินจริง[7] ใช้วิธีสอบเทียบตาม[9] เมื่อทำการสอบเทียบอุปกรณ์แล้วได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากอุปกรณ์วัดความชื้น(θ') กับความชื้นโดยน้ำหนัก (gravimetric moisture content, w) ความสัมพันธ์ระหว่าง w กับความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้อง(θ)ความสัมพันธ์โดยทั่วไประหว่าง w และ (θ)เป็นไปตามสมการที่ 3 [8] เมื่อ ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้งของดิน (กรัม/ลบ.ซม) และ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กรัม/ลบ.ซม)

$$\theta = \frac{w\rho_d}{\rho_w} \quad (3)$$

การใช้กราฟความสัมพันธ์ในการปรับแก้ความชื้นแสดงดังรูปที่ 4 สำหรับปรับแก้ความชื้นของดินทราย และรูปที่ 5 สำหรับปรับแก้ความชื้นของดินร่วนปนทรายยกตัวอย่างในการปรับแก้ความชื้นของดินทรายกรณีน้ำใต้ดินเค็ม การใช้กราฟในรูปที่ 4 เพื่อปรับแก้ความชื้น เช่น ถ้าอ่านค่าความชื้นในกรณีน้ำใต้ดินเค็มจากอุปกรณ์วัดความชื้น (θ') ได้ 60 % ให้ลากเส้นตรงขึ้นไปชนกับเส้น Saline Sand แล้วลากเส้นตรงไปทางขวามือให้ชนกับเส้นกราฟ แล้วลากเส้นตรงลงมาชนกับแกน x อ่านค่าความชื้น (θ) ได้ประมาณ 20 % หรือสามารถใช้สมการที่ 4 ปรับแก้ในกรณีที่เป็นน้ำจืด สมการที่ 5 ในกรณีที่เป็นน้ำเค็ม สำหรับปรับแก้ดินทราย และสำหรับปรับแก้ดินร่วนปนทรายใช้สมการที่ 6 ปรับแก้ในกรณีที่เป็นน้ำจืด สมการที่ 7 ในกรณีที่เป็นน้ำเค็ม



รูปที่ 4 กราฟปรับแก้ความชื้นระหว่างความชื้นโดยปริมาตรจากการวัด ความชื้นโดยน้ำหนัก และความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้องกรณีน้ำจืดและน้ำเค็ม สำหรับดินทราย



รูปที่ 5 กราฟปรับแก้ความชื้นระหว่างความชื้นโดยปริมาตรจากการวัด ความชื้นโดยน้ำหนัก และความชื้นโดยปริมาตรที่ถูกต้องกรณีน้ำจืดและน้ำเค็ม สำหรับดินร่วนปนทราย

สมการปรับแก้ความชื้นในดินทราย

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (DI sand)

$$\theta = 1.386\theta' - 4.188 \qquad (4)$$

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม (Saline sand)

$$\theta = 0.387\theta' - 2.763 \qquad (5)$$

สมการปรับแก้ความชื้นในดินร่วนปนทราย

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (DI sandy loam)

$$\theta = 0.904\theta' - 8.065 \qquad (6)$$

กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม (Saline sandy loam)

$$\theta = 0.237\theta' - 1.365 \qquad (7)$$

3. ผลการศึกษา

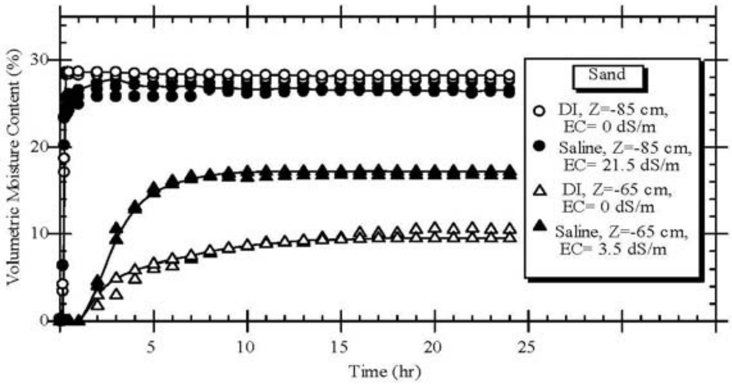
3.1 แท่งดินเป็นดินทราย

เปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินภายใต้กระบวนการคาพิวลารี(แท่งดินI,II) ของน้ำใต้ดินสองชนิด ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความลึก 85 ซม. จากผิวดิน ซึ่งอยู่ที่ระดับน้ำใต้ดินพอดี ทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม ดินทรายมีความชื้นเพิ่มขึ้นและคงที่อย่างรวดเร็วเหมือนกัน คงที่ที่ 27 % ซึ่งในกรณีน้ำใต้ดินเค็มมีค่าความเค็มของดินเพิ่มขึ้นเท่ากับ 21.5 เดซิซีเมน/เมตร (dS/m) แต่ที่ระดับความลึก 65 ซม. จากผิวดินหรือเหนือระดับน้ำใต้ดิน 20 ซม. เมื่อความชื้นดินคงที่ความชื้นของดินในกรณีเป็นน้ำเค็มมีค่ามากกว่า

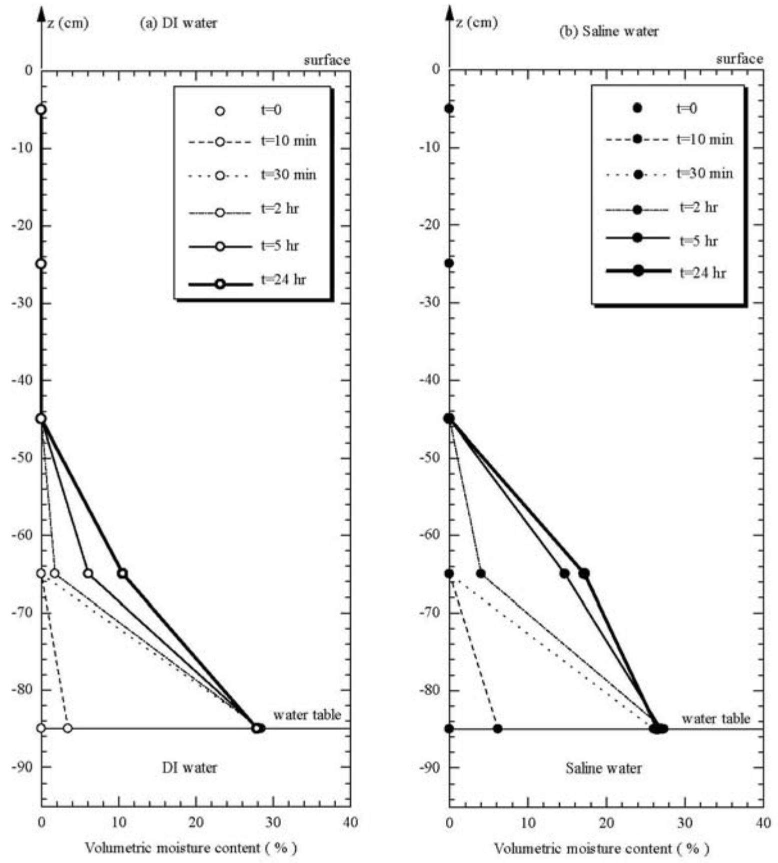
ความชื้นของดินกรณีที่เป็นน้ำจืด และกรณีเป็นน้ำเค็มมีผลทำให้ค่าความเค็มของดิน เพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.5 เดซิซีเมน/เมตร เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามระดับความลึกจากผิวดินระหว่างน้ำใต้ดินเค็มและจืด ดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าที่ความลึกเหนือระดับน้ำใต้ดินเท่ากัน ที่เวลาเดียวกัน ความชื้นของดินในกรณีน้ำเค็มมีค่ามากกว่าน้ำจืด และน้ำสามารถเคลื่อนที่ขึ้นมาได้สูงสุดประมาณ 30 ซม. จากระดับน้ำใต้ดินไม่ต่างกัน ทั้งกรณีที่เป็นน้ำใต้ดินจืดและน้ำเค็ม ดังนั้นที่ระดับดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินมากขึ้นค่าความเค็มที่สะสมในดินจะน้อยลง

3.2 แท่งดินเป็นดินร่วนปนทราย

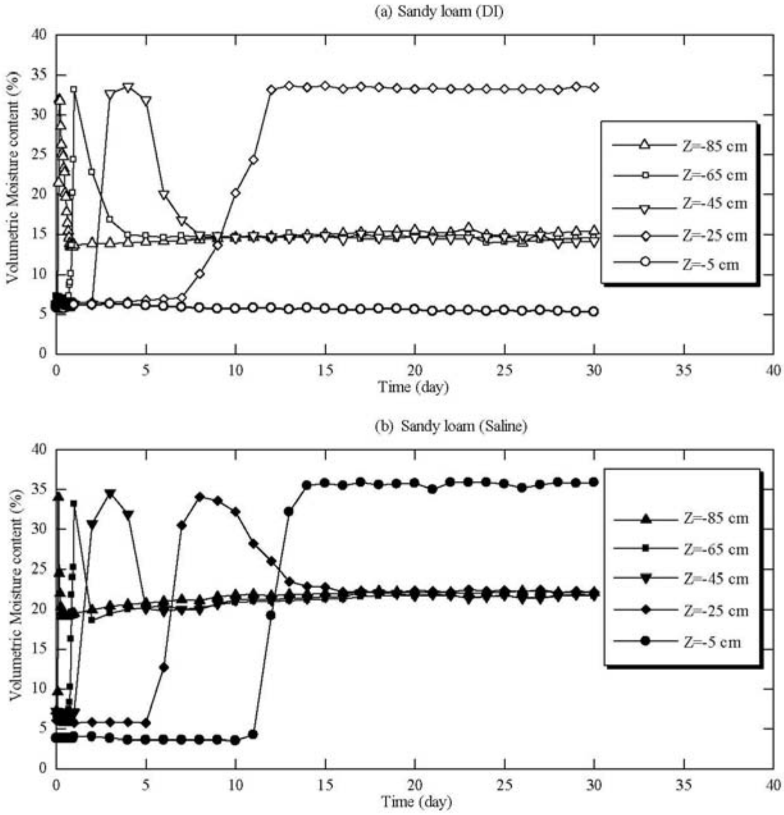
เปรียบเทียบอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินภายใต้กระบวนการคาพิวลารี(แท่งดิน III,IV) ของน้ำใต้ดินสองชนิด ดังรูปที่ 8 ที่ระดับดินลึก (Z=-85, -65 ซม.) ความชื้นของดินเพิ่มขึ้นในเวลาที่ใกล้เคียงกันระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม แต่ที่ระดับดินตื้นขึ้น(Z=-45, -25 ซม.) ความชื้นของดินที่เป็นน้ำเค็มเพิ่มขึ้นในเวลาที่รวดเร็วกว่าน้ำจืด และพบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของความชื้นที่ความลึกต่าง ๆ ของดินร่วนปนทรายแตกต่างจากดินทรายคือความชื้นของดินร่วนปนทรายจะเพิ่มจนถึงความชื้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วความชื้นจะลดลงมาคงที่ที่ค่าหนึ่งเหมือนกันทุกระดับความลึกของดินยกเว้นดินที่อยู่ระดับตื้นที่สุด (Z=-5 ซม.) ที่ความชื้นเพิ่มขึ้นจนถึงความชื้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว แต่จะคงที่ที่ความชื้นนี้ ไม่ลดลงเหมือนดินที่ระดับความลึกมากกว่า ดูรูปที่ 6 เปรียบเทียบกับรูปที่ 8 พบว่าที่ระดับความลึก 65 ซม. จากผิวดิน กรณีน้ำเค็มความชื้นของดินร่วนปนทรายกว่าจะเพิ่มขึ้นจนคงที่ใช้เวลาประมาณ 3 วัน ขณะที่ดินทรายใช้เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าที่ความลึกต่าง ๆและที่เวลาต่าง ๆ น้ำเค็มมีผลทำให้ความชื้นของดินมากกว่าน้ำจืดเสมอ โดยเฉพาะเมื่อความชื้นเพิ่มจนคงที่แล้ว และน้ำเค็มสามารถขึ้นไปจนถึงผิวดิน แต่น้ำจืดขึ้นไปไม่ถึง แต่หากเป็นดินทรายทั้งกรณีน้ำจืดและน้ำเค็มความชื้นขึ้นไปได้สูงสุดที่ระดับความลึก 65 ซม. จากผิวดินเท่านั้น (Z= -65 ซม.) ดูรูปที่ 7



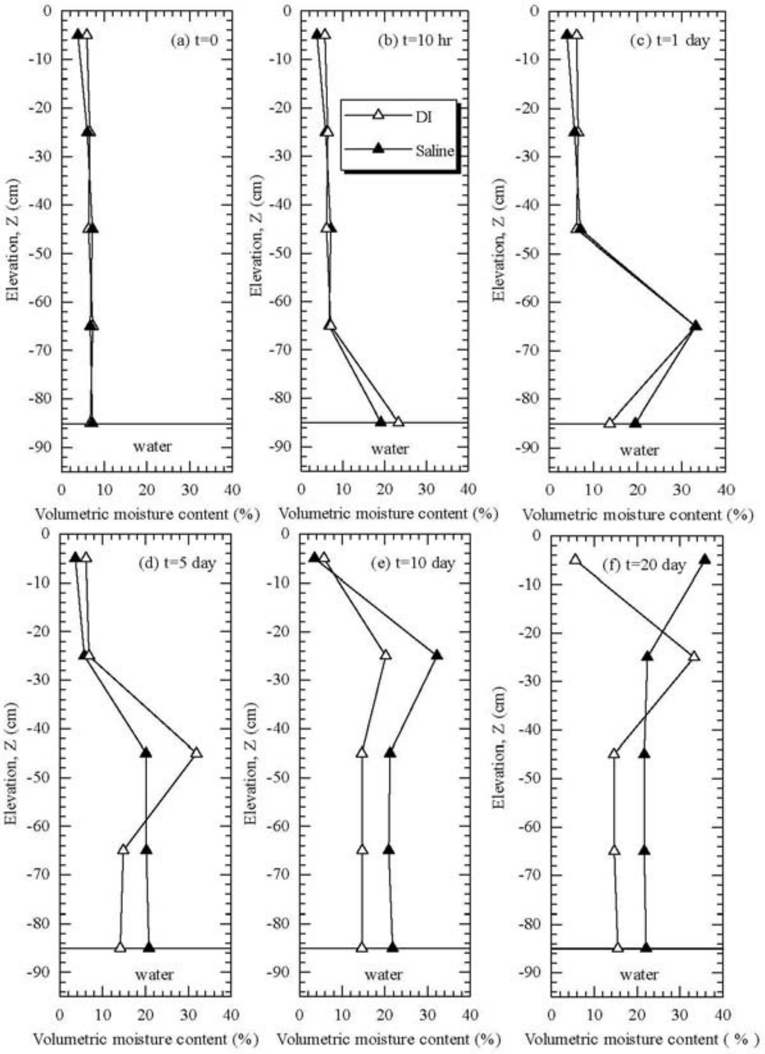
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลากรณีเป็นน้ำจืดและน้ำเค็มที่ระดับความลึก 65 และ 85 ซม. จากผิวดิน สำหรับแท่งดินที่เป็นดินทราย



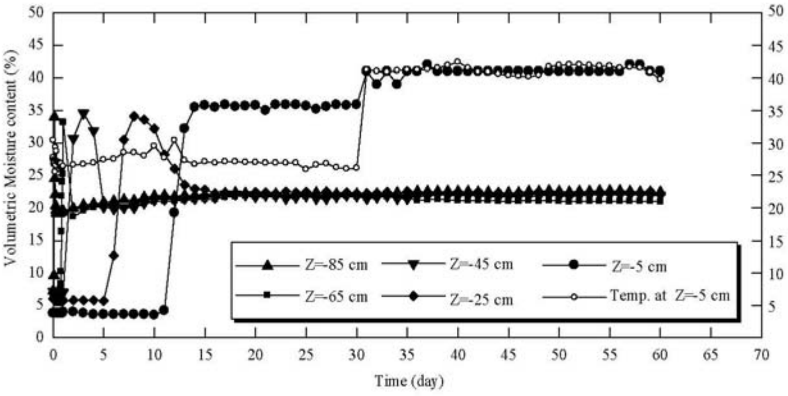
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของดินกับความชื้นเชิงปริมาตรที่เวลาต่างๆ
(a) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (b) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินที่ระดับต่างๆ สำหรับแท่งดินที่เป็นดินร่วนปนทราย (a) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำจืด (b) กรณีน้ำใต้ดินเป็นน้ำเค็ม



รูปที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความลึกและความชื้นดิน และระหว่างน้ำใต้ดินจืดและน้ำใต้ดินเค็ม กรณีดินร่วนปนทราย ที่ (a)ที่เวลาเริ่มต้น (b) 10 ชั่วโมง (c) 1 วัน (d) 5 วัน (e) 10 วัน (f) 20 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาที่ความลึกของดินระดับต่างๆ สำหรับแท่งดินที่เป็นดินร่วนปนทราย กรณีน้ำใต้ดินเค็ม และเพิ่มการจำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย

3.3 แท่งดินเป็นดินร่วนปนทรายและเร่งการระเหย

จากการทดลองทั้ง 4 กรณี แท่งดิน I ถึง IV เป็นการทดลองในร่ม อุณหภูมิห้อง แต่ในสภาพธรรมชาติของพื้นที่ดินเค็ม ดินจะได้รับแสงแดด ลม ซึ่งมีส่วนสำคัญในการทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวดิน ดังนั้นเพื่อจำลองการระเหยจากพลังงานที่ผิวดินได้รับเพิ่มขึ้น จึงกำหนดให้มีการทดลองกรณีที่ 5 (แท่งดิน V) หลังจากจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มในดินร่วนปนทรายเหมือนแท่งดิน IV จนความชื้นคงที่ ใช้เวลาประมาณ 30 วัน จึงได้จำลองแสงเพื่อเพิ่มการระเหย แสดงการจำลองแสงดังรูปที่ 3 โดยใช้หลอดไฟขนาด 250 วัตต์ ที่สามารถปรับแสงได้ ทำให้เกิดอุณหภูมิบนผิวดิน 45 ถึง 50 °C ทดสอบต่อไปอีก 30 วัน ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาดังรูปที่ 10 พบว่าเมื่อผิวดินมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการระเหยเพิ่มขึ้น แต่กลับมีผลทำให้ความชื้นของดินที่ระดับผิวดินสูงขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะที่บริเวณผิวดินเท่านั้น ส่วนที่ระดับอื่นๆ ของดินที่ลึกลงไป ความชื้นคงที่ ที่ผิวดินมีคราบเกลือเกิดขึ้น คราบเกลือมีลักษณะเป็นฟิล์มเคลือบผิวดินไว้ มีลักษณะแข็ง เมื่อลอกเอาคราบเกลือออกมาจากผิว พบว่ามีคราบเกลือ ความหนาประมาณ 0.2 ซม. ถึง 1 ซม.

4. สรุปผลการทดลอง

อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน และความสูงคาพิวลารีระหว่างน้ำใต้ดินที่เป็นน้ำจืดและน้ำเค็ม ในแท่งดินทรายให้ผลคล้ายคลึงกัน เนื่องจากดินทรายที่ใช้ทดสอบมีแรงคาพิวลารีน้อยจึงยังไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ และความสูงคาพิวลารีเป็นผลมาจากแรงคาพิวลารี เมื่อทดลองการเคลื่อนที่ในดินร่วนปนทรายที่มีแรงคาพิวลารีสูงกว่าดินทราย พบว่าความสูงคาพิวลารีของน้ำใต้เค็มน้ำเค็มสูงกว่าน้ำใต้ดินจืด ที่ระดับความลึกของดินเท่ากันที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น น้ำใต้ดินเค็มจะมีอิทธิพลทำให้ดินมีความชื้นมากกว่าน้ำใต้ดินจืด เนื่องจากสารละลายเกลือ (NaCl) ที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ประจุของโซเดียม (Na^+) จะดูดซับน้ำเข้าหาตัวเองด้วยแรงดึงดูดออสโมทิก ดังนั้นจากผลการทดลองระหว่างดินทรายและดินร่วนปนทรายแสดงให้เห็นว่าแรงคาพิวลารีมีความแตกต่างกันตามชนิดและโครงสร้างดิน

นอกจากนี้ยังพบว่าดินร่วนปนทรายซึ่งเป็นดินจากพื้นที่ดินเค็มเป็นดินที่สามารถเก็บความชื้นไว้ที่ระดับผิวดินได้มากกว่าดินที่ระดับความลึกอื่นๆ ดังนั้นเมื่อเกิดการระเหยของน้ำบนผิวดินจึงทำให้เกิดคราบเกลือสะสมบนผิวดินได้มาก จากความเข้าใจพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็มมากขึ้นแล้ว การศึกษาต่อไปจะนำดินร่วนปนทรายที่มีน้ำใต้ดินเค็ม มาจำลองการเคลื่อนที่และทดลองหาวิธีเพื่อตัดกระบวนการคาพิวลารี เพื่อนำไปสู่การป้องกันการเคลื่อนที่ขึ้นมาที่ผิวดินของน้ำใต้ดินเค็ม นำไปสู่การแก้ไขปัญหาดินเค็มของพื้นที่ดินเค็มที่ ต.ค้างพลู อ.โนนไทย จ.นครราชสีมา และพื้นที่ใกล้เคียงต่อไป อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาต่อไปถึงปัจจัยที่ควบคุมกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินเค็ม สมดุลของน้ำและเกลือของชั้นดินในระดับต่างๆ และสามารถสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ได้ในที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับนางสาวหฤทัย มาศโค้ง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2551 โครงการศึกษา HYDROGEOLOGICAL MODEL เพื่อคาดคะเนการกระจายดินเค็มและน้ำเค็มระยะยาว โครงการโขง-ชี-มูล , รายงานฉบับสมบูรณ์กรมชลประทานฯ

[2] สำนักธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี,2548 ธรณีวิทยาพื้นที่โครงการศึกษาปัจจัยทางธรณีวิทยาที่ทำให้เกิดดินเค็มภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

[3] Akudago J.A., Nishigaki M., Chegbeleh L.P., Komatsu M., and Alim M.A. 2009. Capillary cut design for soil groundwater salinity control'. Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology Okayama University, Vol.14 No 1:17-22

[4] American Society for Testing and Materials, 2008. Test Designation D 6836 – 02, Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. Using Hanging Colomn, Pressure Extractor,Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. ASTM, USA.

[5] Fredlund D.G., and Rahardjo H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons.

[6] Fredlund D.G., and Xing A. 1994. Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal. 31:521-532

[7] Inoue M., Ould Ahmed B.A., Saito T. and Irshad M., 2008. Comparison of Twelve Dielectric Moisture Probes for Soil Water Measurement under Saline Conditions. American Journal of Environmental Sciences 4 (4): 367-372.

[8] Scoot ,H.D., 2000. Soil physics : agricultural and environmental applications. Ames : Iowa State University Press.

[9] http://www.decagon.com/education/video-custom -soil-calibration-for-vwc-sensors/

ประวัติผู้เขียน

นางสาวหฤทัย มาศโค้ง เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ.2525 ที่จังหวัดนครราชสีมา บิดาชื่อนายชนะ มาศโค้ง มารดาชื่อนางยุพิน มาศโค้ง สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนสุริยาอุทัย ตำบลในเมือง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2537 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนพิมายวิทยา ตำบลในเมือง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2548 ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาตรีได้มีความสนใจเกี่ยวกับการเขียนแบบโดยใช้โปรแกรม AutoCAD ในภาคการศึกษาสุดท้ายของการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เป็นนักศึกษาจ้างงานของบริษัท คริสเตียนี และนีลเส็น (ไทย) ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร โครงการก่อสร้างสนามกีฬาเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา โดยงานส่วนใหญ่เป็นการเขียนแบบ shop drawing เมื่อสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกรขนส่ง บริษัท เคไลท์ ประเทศไทย จำกัด (กุมภาพันธ์–กันยายน พ.ศ. 2549) หลังจากนั้นได้ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จนถึงเดือนเมษายน พ.ศ.2551 จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2551 ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ มีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ข.