

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย และค่าตัวประกอบความหน่วงในพื้นที่ดินเค็ม

Determination of Diffusion-Dispersion Coefficient and Retardation Factor in Saline Soils

ศุภสิทธิ์ คนใหญ่ (Supasit Konyai)^{1*}

วิชัย ศรีบุญลือ (Vichai Sriboonlue)²

วิทยา ตริโลเกศ (Vidhaya Trelo-ges)³

บทคัดย่อ

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (D) และค่าตัวประกอบความหน่วง (R) ในพื้นที่ดินเค็มเขตบ้านนาเพีย ตำบลเมืองเพีย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น สามารถทำได้โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลายเกลือในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งทดลองโดยการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำเกลือด้วยแรงคาพิลลารีขึ้นไปตามช่องว่างของดินที่บรรจุอยู่ในท่อ PVC ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 เมตร และความยาวท่อ 3 ขนาด คือ 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตร ตั้งในอ่างน้ำเค็มซึ่งใช้สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเค็ม 150 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (มช ซม⁻¹) แล้ววัดความชื้น ($\theta(x_i, t)$) และความเค็ม ($C(x_i, t)$) ในดินที่ระยะเวลา 1, 7, 14, 21 และ 30 วัน ทำการฟิตค่า D และ R ในสมการหาความเข้มข้นของสารละลายของ Danckwert กระทั่งกราฟฟิตได้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองมากที่สุด ในพื้นที่ดินร่วนปนทรายบริเวณเชิงเขา (St1) มีค่า D 0.0067 ตารางเมตร วัน⁻¹ และค่า R 0.2970 ในพื้นที่ดินร่วนปนทรายบริเวณไหล่เขา (St2) มีค่า D 0.0094 ตารางเมตร วัน⁻¹ และค่า R 0.2860 และพื้นที่ดินร่วนเหนียวปนทรายบริเวณที่ราบเชิงเขา (St3) มีค่า D 0.0012 ตารางเมตร วัน⁻¹ และค่า R 0.1140 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (D) และค่าตัวประกอบความหน่วง (R) ในพื้นที่ดินเนื้อละเอียดจะมีค่าต่ำ

Abstract

The determination of diffusion-dispersion coefficient (D) and retardation factor (R) in saline soils of Ban Napear, Muang Pear subdistrict, Banphai district, Khon Kaen province can be simulated by mass transport through unsaturated zone modeling. This experiment simulated the solute transport by capillary force through soil pores in a PVC column with diameter 0.05 meter and three lengths i.e. 1.0, 1.5 and 2.0 meters. The dry soil filled tubes were immersed in salt solution (NaCl) of 150 mS cm⁻¹ in bucket containers. Both water content ($\theta(x_i, t)$) and salt concentration ($C(x_i, t)$) of the soil was measured after 1, 7, 14, 21 and 30 days. The determination of diffusion-dispersion coefficient (D) and retardation factor (R) were fitted by the solute transport equation of Danckwert. The best fitting graph after comparism with experimental results should be

¹ นักศึกษาปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และผู้ช่วยนักวิจัยศูนย์วิจัยน้ำบาดาล คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*corresponding author, e-mail: supasit_55@hotmail.com

selected. The diffusion–dispersion coefficient (D) of sandy loam soil in footslope (St1) was $0.0067 \text{ m}^2 \text{ day}^{-1}$ and the retardation factor (R) was 0.2970. In sandy loam soil in shoulder (St2) was $0.0094 \text{ m}^2 \text{ day}^{-1}$ and the retardation factor (R) was 0.2860. Sandy clay loam soil in toeslope (St3) had diffusion–dispersion coefficient (D) of $0.0012 \text{ m}^2 \text{ day}^{-1}$ and the retardation factor (R) was 0.1140. Hence, the diffusion–dispersion coefficient (D) and retardation factor (R) were lower in fine textured soil.

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ค่าตัวประกอบความหน่วง ดินเค็ม

Keywords: Diffusion–Dispersion coefficient, Retardation factor, Saline soils

บทนำ

ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated soil) โดยทั่ว ๆ ไปจะเกี่ยวข้องและมีความสัมพันธ์กับหลายเหตุการณ์ เช่น การสะสมของปริมาณน้ำฝนจากการซึมสู่ดิน น้ำท่า การระเหย การเคลื่อนที่คาพิลลารี การเพิ่มน้ำบาดาลจากการกักเก็บที่ผิวดิน และการเกิดดินเค็ม โดยชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเป็นชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (ground water) จนถึงที่ระดับพื้นผิว (soil surface) ซึ่งเป็นชั้นดินที่มีการเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นของน้ำใต้ดินด้วยแรงคาพิลลารี หากภายในชั้นดินมีเกลืออยู่หรือมีอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน น้ำจะเป็นสารละลาย (solute) และพาเกลือขึ้นมาสู่ผิวดิน ทำให้เกิดและการกระจายดินเค็มได้ด้วย ตามหลักการข้างต้น

ในการคำนวณเพื่อการจำลองและการทำนายการเคลื่อนที่ของสารละลาย (solute) ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวจึงมีความสำคัญมาก ในการศึกษาพฤติกรรม การทำนายและการศึกษาการเกิดดินเค็ม ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของสารละลาย (solute transport) ในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นกระบวนการที่สลับซับซ้อนยุ่งยากในการใช้สูตรคำนวณ ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่มีการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่นั้นมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดิน แรงดึงของน้ำในดิน และค่าสภาพนำชลศาสตร์ของดินเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเสถียรภาพของน้ำในดินรวมทั้งค่าสภาพนำชลศาสตร์ในดินยังมีลักษณะเป็นไฮสเทอริซิสด้วย (ไฮสเทอริซิสหมายถึง การที่ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและ

เสถียรภาพดินแตกต่างกัน เมื่อดินมีความชื้นมากขึ้น (wetting) หรือเมื่อดินแห้งมากขึ้น (drying)) (พิมพันธ์, 2526) ดังนั้นการใช้สูตรในการคำนวณ จึงต้องกระทำในทางอ้อม เช่น โดยอาศัยเทคนิคเชิงตัวเลข (numerical technique) หรือใช้วิธีประมาณค่า (approximation method) แทน และในการคำนวณการเคลื่อนที่ของสารละลายจำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย diffusion–dispersion coefficient (D) และ retardation factor (R) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความชื้นและความเร็วการไหล (flux velocity)

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการทดลองและคำนวณค่า parameters diffusion–dispersion coefficient (D) และ ค่าตัวประกอบความหน่วง retardation factor (R) ของการเคลื่อนที่ของสารละลายในชั้นดินเค็มที่ไม่อิ่มตัว โดยใช้วิธีการจำลองให้เกิดการเคลื่อนที่คาพิลลารีขึ้นในในช่องว่างดินโดยใช้แท่งดิน (soil column)

ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของสารละลาย (solute transport) ความเร็วการไหล (flux velocity) ของการเคลื่อนที่ของสารละลายมีความสำคัญต่อการคำนวณค่า D และ R ดังนั้นในการคำนวณมีความจำเป็นต้องต้องทำการศึกษาและเข้าใจในหลักการและสมการดังนี้คือ สมการริชาร์ดส์ (Richards equation) สมการสมดุลน้ำ (water balance equation) และ สมการการเคลื่อนที่ของสารละลาย (solution equation)

สมการริชาร์ดส์

สมการริชาร์ดส์ เป็นสมการสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเมื่ออยู่ในสถานะไม่คงตัว (unsteady flow) และเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) (Scott, 2000) เนื่องจากความชื้น (θ), อัตราการไหลของน้ำ (q) และเฮดชลศาสตร์ (H) ผันแปรไปตามเวลา (t) และ ระยะทาง (x)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right] \quad \dots(1)$$

เมื่อ K คือ ค่าสภาพนำชลศาสตร์

หลักการสมดุลน้ำ

หลักการสมดุลน้ำคือ เมื่ออัตราการไหลเข้าลบด้วยอัตราการไหลออกย่อมเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่เก็บกัก เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I - O = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \dots(2)$$

เมื่อ I คือ อัตราการไหลเข้า (Inflow), O คือ อัตราการไหลออก (Outflow), Δs คือ ปริมาณเก็บกักที่น้ำเปลี่ยนแปลง และ Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง หรือ ช่วงเวลาที่ทำการทดลอง

สมการการเคลื่อนที่ของสารละลาย

ในการเคลื่อนที่ของสารละลายด้วยการพา (convective transport of solutes) การแพร่ของสารละลาย (diffusion of solutes) และการกระจายอุทกพลศาสตร์ของสารละลาย (hydrodynamic dispersion) ได้สมการ (Warrick, 2002)

$$J = v\theta C - D(\theta, v) \frac{d(\theta C)}{dx} \quad \dots(3)$$

เมื่อ J คือ มวลรวมของสารละลายที่เคลื่อนที่ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดของดินต่อหน่วยเวลา [MT/L^2], C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งคิดจากมวลของสารละลายต่อหน่วยปริมาตรของสารละลาย (the volume-averaged solute concentration) [M/L^3], v คือ ความเร็วการไหลเฉลี่ย (average velocity) [L/T], θ คือ

ความชื้นของดินโดยปริมาตร (volumetric wetness) [cm^{-1}/cm^{-1}] และ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่และการกระจาย (diffusion-dispersion coefficients)

เมื่อสมการ (3) นี้ สามารถใช้ได้เฉพาะสภาวะคงที่ (steady state) จากการหา solution ได้สมการเป็น (Danckwert, 1953)

$$c(x, t) = 0.50 \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2(DRt)^{1/2}} \right] \quad \dots(4)$$

เมื่อ

$$c(x, t) = \frac{C(x, t) - C_i}{C_0 - C_i} \quad \dots(5)$$

โดยที่ $c(x, t)$ คือ ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t , $C(x, t)$ คือความเข้มข้นที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ที่ได้จากการทดลอง, C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายใน soil column (initial concentration in soil column) และ C_0 คือสารละลายที่มีความเข้มข้นคงที่

โดยที่ $\operatorname{erfc}(y)$ คือ complementary error function ของ y ซึ่งเท่ากับ 1 ลบด้วย error function ของ y คือ $\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y)$ และค่า $\operatorname{erf}(y)$ สามารถหาได้จาก

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y^2} dy \quad \dots(6)$$

ค่าของ $\operatorname{erf}(y)$ และ $\operatorname{erfc}(y)$ สามารถหาได้จากสมการในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ เช่น Matlab หรือ Microsoft Excel เป็นต้น

วิธีการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการหาวิธีการทดลองและคำนวณค่าพารามิเตอร์ diffusion-dispersion coefficient (D) และ retardation factor (R) ของการเคลื่อนที่ของสารละลายในชั้นดินเค็มที่ไม่อิ่มตัว โดยในการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่แรกเป็นการจำลองให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นตามตัวอย่างแท่งดิน

จากระดับ water table ด้วยแรงคาพิลลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของสารละลายกับค่าสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity, EC) และในส่วนที่สองเป็นการคำนวณหาความเร็วการไหล (flux velocity)

การจำลองให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำขึ้นตามตัวอย่างแท่งดินจากระดับ water table ด้วยแรงคาพิลลารี ตัวอย่างดินจะถูกทำให้แห้งในร่มและทุบด้วยมืออย่างให้เป็นดินที่ไม่มีโครงสร้างเพื่อจะได้ดินที่เรียงตัวสม่ำเสมอ นำตัวอย่างดินบรรจุในกระบอก PVC ขนาด 0.05 เมตร ที่ผ่าครึ่งไว้ (รูปที่ 1) ปลายล่างมีฝาเจาะรูและรองด้วยผ้าขาวบาง ใช้กระดาษกาวปิดรอบและรัดท่อให้ประกบกันแน่นด้วยแหวนรัดท่อ ประมาณ 3 ถึง 4 แหวน การบรรจุดินทำด้วยความระมัดระวังเพื่อให้ดินเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอ สูงขึ้นจนถึงระดับดินที่ต้องการ ความสูงของดินแต่ละชนิดมีดังนี้ 1 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง 1.5 และ 2 เมตร จำนวน 1 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ต่อดิน 1 ชนิด เนื่องจากมีดิน 3 ชนิด ดังนั้น จึงมีกระบอกตัวอย่างดินทั้งหมด 15 ตัวอย่าง ตัวอย่างดินทั้งหมดนี้ใช้ในการทดลองการเคลื่อนที่ขึ้นของน้ำเค็มขนาด 150 มิลลิลิตรเมตรต่อเซนติเมตร (มข ซม⁻¹) (ซึ่งเป็นค่าความเค็มที่สูงมาก แต่ก็พบค่าประมาณนี้ในน้ำใต้ดิน ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) นำตัวอย่างดินตั้งในอ่างน้ำเค็มที่ได้รับการปรับความเค็มคงที่ที่ 150 มข ซม⁻¹ ให้ปลายล่างของกระบอกตัวอย่างดินจุ่มลงในน้ำเค็ม 5 ซม. (รูปที่ 2) โดยที่ระดับผิวน้ำและความเค็มของน้ำจะได้รับการปรับให้คงที่อย่างน้อย 2 ครั้งต่อวัน เวลาที่ให้น้ำเค็มเคลื่อนที่ขึ้นมี 1, 7, 14, 21 และ 30 วัน โดยที่ 1, 7 และ 14 วัน ใช้ตัวอย่าง 1 เมตร ส่วน 21 กับ 30 วัน ใช้ตัวอย่าง 1.5 กับ 2 เมตร ตามลำดับ เมื่อถึงกำหนดเวลาระบบตัวอย่างดินจะถูกยกขึ้นจากอ่างน้ำเค็ม วางนอนบนโต๊ะ คลายแหวนรัดท่อ ใช้คัตเตอร์กรีดกระดาษกาวที่ปิดรอบประกบ แล้วแยกส่วนซีกหนึ่งของท่อออกจะเห็นตัวอย่างดินทั้งแท่งทำการวัดความยาวจากระดับผิวน้ำถึงระดับผิวน้ำเปียก (wet front) ชอยแบ่งตัวอย่างดินออกเป็นท่อนๆ ท่อนละ 10 ซม. เริ่มตั้งแต่ระดับผิวน้ำตัวอย่างดินแต่ละท่อนจะถูกแบ่ง

ส่วนหนึ่งใส่กระป๋องโลหะเพื่อนำไปหาความชื้น (รูปที่ 3) ส่วนที่เหลือในแต่ละท่อนถูกนำไปผึ่งให้แห้งในร่มและใช้ในการหาความเค็ม ในการวัดค่าความเค็มจะใช้อัตราส่วน 1:5 คือ ใช้ตัวอย่างดินที่แห้งในร่มขนาด 10 กรัม ใส่ลงในแก้วพลาสติก เติมน้ำกลั่น 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงโดยกวนเป็นระยะๆ แล้ววัดค่าสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity, EC) ของน้ำผสมดินนั้น

ในการพิจารณาหาความเร็วการไหล (flux velocity) โดยใช้หลักการสมมูลน้ำ (รูปที่ 4) โดยที่น้ำเคลื่อนที่ขึ้นจากปลายด้านล่างด้วยแรงคาพิลลารีและสมมุติให้อัตราการไหลออกที่ปลายด้านบนสุด (O_n) เป็นศูนย์ ซึ่งการสมมุตินี้ใช้ได้เมื่อแท่งดินยาวมาก หรือมีการระเหยออกจากแท่งดินน้อยมาก พิจารณาที่ section สุดท้ายด้านบนสุดของแท่งดิน จากสมการ (2) Δs คือ ปริมาณเก็บกักที่น้ำเปลี่ยนแปลงจะมีค่าเท่ากับความชื้นที่เวลา t คือ $\theta_{n,t}$ ลบด้วยความชื้นที่เวลาเริ่มต้น $\theta_{n,0}$ จะได้ดังสมการ (7) คือ

$$I_n - O_n = \frac{(\theta_{n,t} - \theta_{n,0})A\Delta x}{\Delta t} \quad \dots(7)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดินในแท่งดิน และสมมุติให้อัตราการไหลออกที่ปลายด้านบนสุด (O_n) เป็นศูนย์ดังนั้น

$$I_n = \frac{(\theta_{n,t} - \theta_{n,0})A\Delta x}{\Delta t} \quad \dots(8)$$

เนื่องจากอัตราการไหลเข้าของ section ที่ n ก็คืออัตราการไหลออกของ section ที่ $n-1$ หรือ $I_n = O_{n-1}$ ดังนั้นเมื่อทราบ O_{n-1} ก็สามารหาค่า I_{n-1} ได้ ดังสมการลักษณะเดียวกันกับสมการที่ (7) ซึ่งเมื่อคำนวณย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนถึงระดับน้ำ ก็จะได้อัตราการไหลที่ทุกๆ ตำแหน่ง ดังนั้นจากอัตราการไหลดังกล่าวจะสามารถคำนวณอัตราการไหลจำเพาะ (q) ได้ดังนี้

$$q_{in,n} = \frac{I_n}{A} \quad \dots(7a)$$

$$q_{out,n} = \frac{O_n}{A} \quad \dots(7b)$$

ดังนั้นอัตราการไหลจำเพาะเฉลี่ย () หาได้จาก

$$\bar{q}_n = \frac{q_{in,n} + q_{out,n}}{2} \quad \dots(8a)$$

ผลการศึกษา

คุณสมบัติทางกายภาพของดิน

ผลการวิเคราะห์เนื้อดินของดินโดยสามเหลี่ยมจำแนกดินของ USDA และคุณสมบัติทางกายภาพของดินดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ผลการคำนวณค่า D และ R

ผลการทดลองค่า Diffusion-dispersion coefficient (D) และ retardation factor (R) ได้จากการฟิตโค้งความเข้มข้นสัมพัทธ์จากสมการที่ 4 ให้เข้ากับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5, ผลการหาค่า D และ R ของดินทั้ง 3 แห่งและ ค่าเฉลี่ยต่ำสุดสูงสุด แสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าค่า D ของแต่ละแห่งเมื่อดูที่ค่าเฉลี่ยแล้วพบว่า ค่าที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่า D_{50} (D_{50} คือ ขนาดเม็ดดินที่เล็กกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินทั้งหมด) (ชินะวัฒน์, 2540) และค่า R ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าความเร็วของการแพร่กระจายของสารละลายมีความเร็วสูงกว่าการเคลื่อนที่ของสารละลาย ($R = v_{\text{ตัวทำละลาย}} / v_{\text{สารละลาย}}$) ทั้งนี้เพราะการเคลื่อนที่ขึ้นด้วยแรงคาพิลลารีในชั้นไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของสารละลายจะมีความเร็วต่ำมาก

วิจารณ์ผลการศึกษา

จากการทำการจำลองการเคลื่อนที่ขึ้นของน้ำเค็มด้วยแรงคาพิลลารีในแท่งดิน ทำให้ทราบค่าความชื้นและค่าความเค็มที่เปลี่ยนไปตามชั้นความสูงที่แบ่งในแท่งดิน และจากผลที่ได้ทำให้สามารถหาค่าความเร็วการไหล (flux velocity) ได้โดยใช้หลักการสมมูลน้ำโดยอาศัยความสัมพันธ์ของความชื้นที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของ

ความสูงของแท่งดิน หลังจากสามารถหาค่าอัตราการไหลทำให้สามารถหาค่า D และ R ได้จากการหาค่าโดยการฟิตเส้นโค้งในสมการ $C(x_i, t) = 0.5 \text{erft}[(Rx - vt) / (4DRt)^{0.5}]$ จากผลการหาค่าทำให้ทราบว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากจะมีผลต่อค่า D และ R กล่าวคือ หากมีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวมากจะทำให้ค่า D และ R ต่ำ

ในการนำผลการทดลองของการหาค่า D และ R เพื่อนำไปหาค่าและคำนวณหาค่าความเค็มที่จะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ขึ้นด้วยแรงคาพิลลารี ควรทำการทดลองเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินหลายๆ ชนิด และควรทำการทดลองหาค่าโดยวิธีอื่นอีกเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ทดลองได้

กิตติกรรมประกาศ

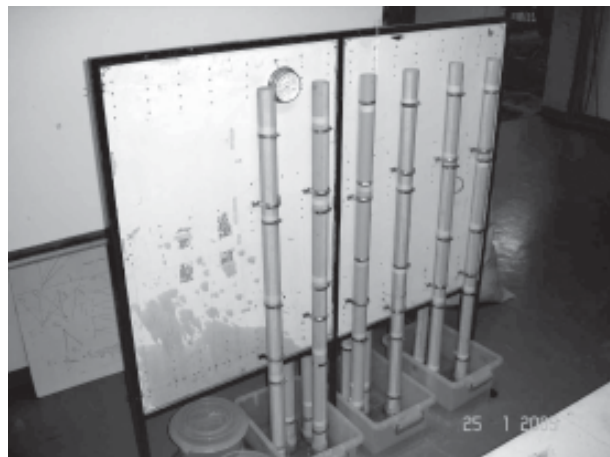
ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยน้ำบาดาลภาควิทยาศาสตร์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในการใช้ห้องปฏิบัติการวัสดุ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

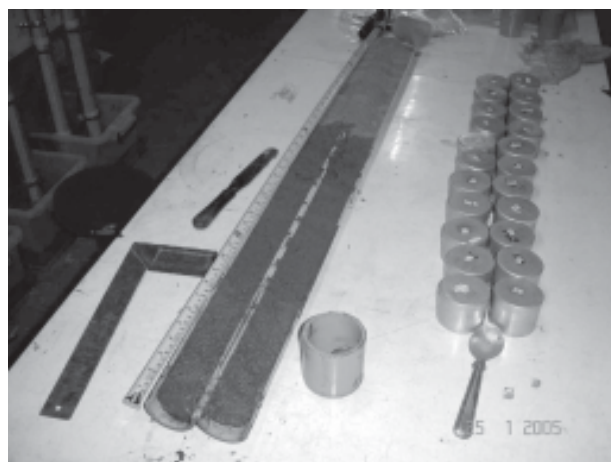
- ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. 2540. ปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 4. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พิมพ์พันธ์ เจิมสวัสดิพงษ์. 2526. ฟิสิกส์ของดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น: คณะเกษตรศาสตร์: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Danckwert, P.V. 1953. Continuous flow system. *Chem Eng Sci* 2(1): 1-13.
- Scott, H. Don. 2000. *Soil physics, agricultural and environmental applications*. Iowa: Iowa State University Press.
- Warrick, A.W. 2002. *Soil physics companion*. Washington D.C.: CRC Press.



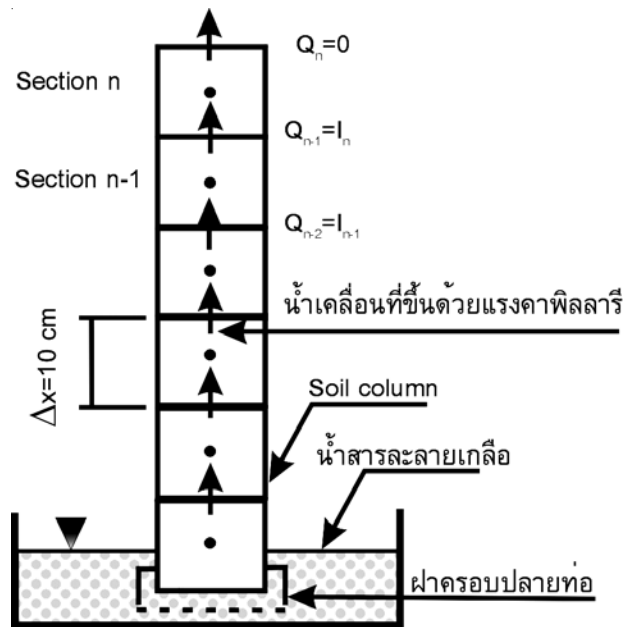
รูปที่ 1 การบรรจุตัวอย่างดินในแท่งดิน



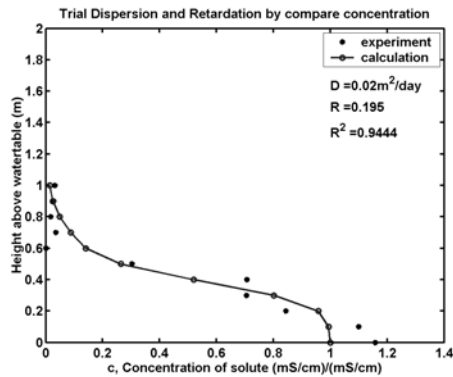
รูปที่ 2 การติดตั้งแท่งดินในสารละลายเกลือ



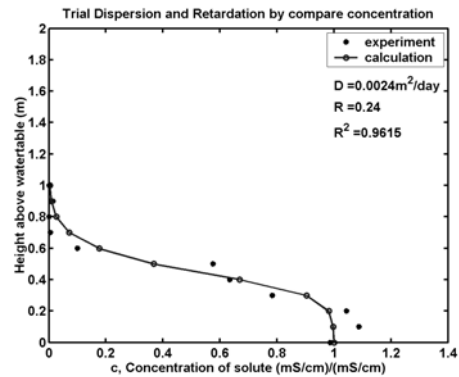
รูปที่ 3 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อหาความชื้น



รูปที่ 4 การแบ่ง section ของแท่งดิน

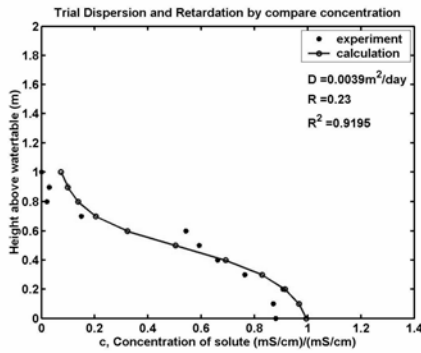


ก. St1 ที่ 1 วัน

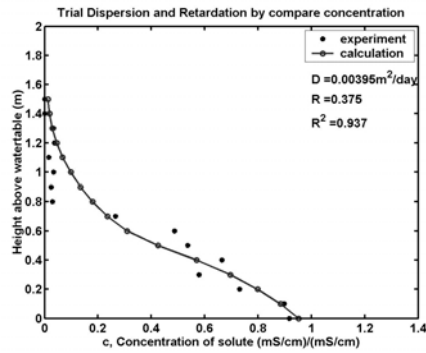


ข. St1 ที่ 7 วัน

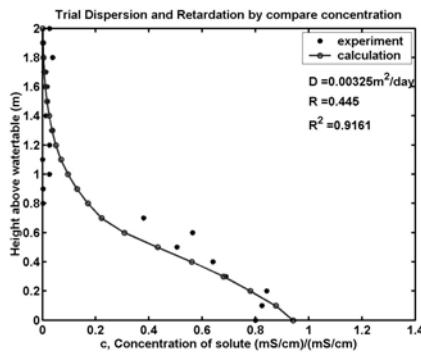
รูปที่ 5 การฟิตโค้งความเข้มข้นสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดลอง



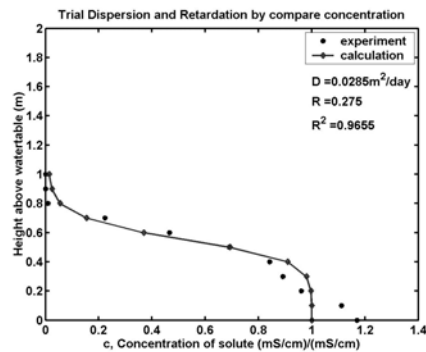
ค. St1 ที่ 14 วัน



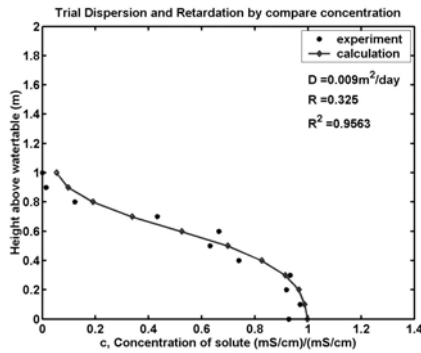
ง. St1 ที่ 21 วัน



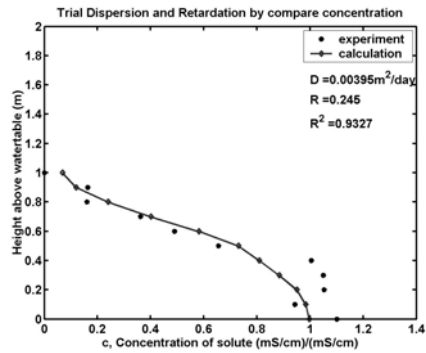
จ. St1 ที่ 30 วัน



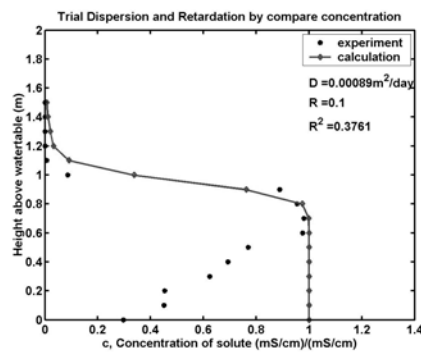
ฉ. St2 ที่ 1 วัน



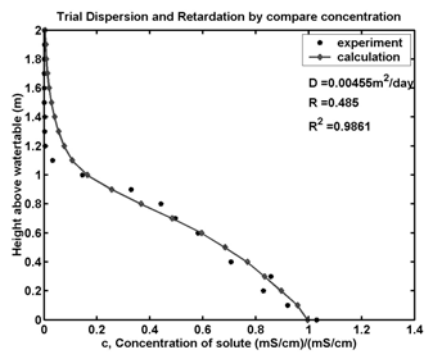
ช. St2 ที่ 7 วัน



ซ. St2 ที่ 14 วัน

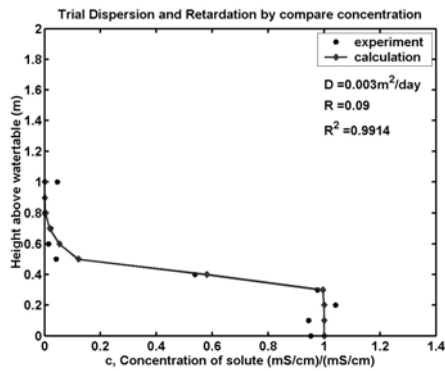


ณ. St2 ที่ 21 วัน

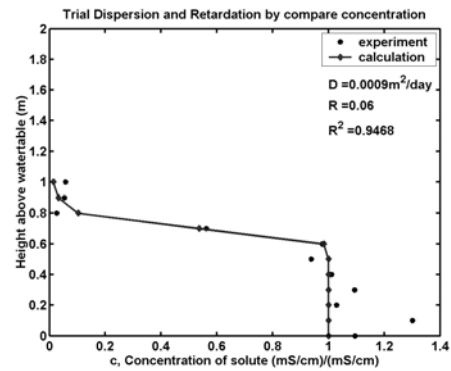


ญ. St2 ที่ 30 วัน

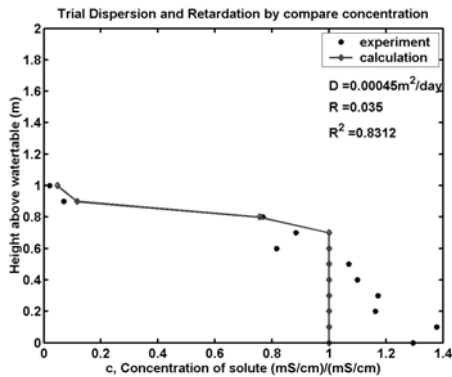
รูปที่ 5 การฟิตโค้งความเข้มข้นสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)



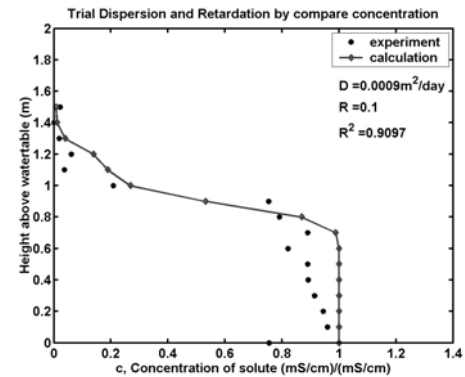
ฎ. St3 ที่ 1 วัน



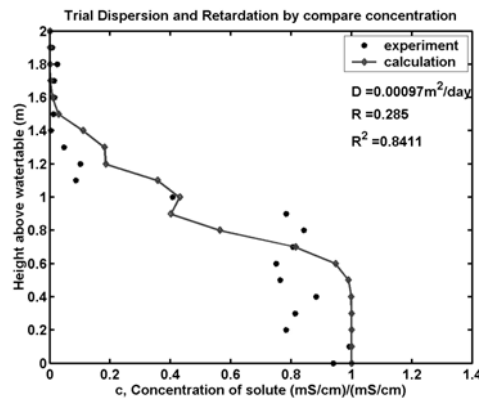
ฐ. St3 ที่ 7 วัน



ฑ. St3 ที่ 14 วัน



ฒ. St3 ที่ 21 วัน



ณ. St3 ที่ 30 วัน

รูปที่ 5 การฟิตโค้งความเข้มข้นสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

ตารางที่ 1 การกระจายตัวของเม็ดดินและการจำแนกดิน

site	Particle size distribution (%)			Texture
	Sand	Silt	Clay	
St1	78.40	12.70	8.70	ดินร่วนปนทราย
St2	64.80	26.70	8.50	ดินร่วนปนทราย
St3	59.80	18.60	21.60	ดินร่วนเหนียวปนทราย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่ใช้ในการทดสอบ

site	θ_r	D ₅₀ (mm)	Bulk density (kg m ⁻³)	Porosity	k _{sat} (cm d ⁻¹)	Electrical conductivity (mS cm ⁻¹)
St1	0.062	0.080	1,676	0.330	113.68	38.40
St2	0.030	0.085	1,516	0.350	315.92	1.20
St3	0.069	0.070	1,609	0.480	4.27	36.90

ตารางที่ 3 ค่า Diffusion–dispersion coefficient (D) และ retardation factor (R) ที่ได้จากการฟิตโค้ง

site	ตำแหน่ง ดิน (m)	Diffusion–dispersion coefficient (D) (m ² day ⁻¹)					retardation factor (R)				
		1 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	30 วัน	1 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	30 วัน
St1	1.0	0.020	0.0024				0.195	0.24			
	1.5			0.0039	0.0039				0.23	0.375	
	2.0					0.0032					0.445
	R ²	0.9444	0.9616	0.9195	0.9370	0.9161	0.9444	0.9616	0.9195	0.9370	0.9161
St2	1.0	0.0285	0.009				0.275	0.325			
	1.5			0.0039	0.0008	0.0045			0.245	0.10	0.485
	2.0										
	R ²	0.9655	0.9563	0.9327	0.3761	0.9861	0.9655	0.9563	0.9327	0.3761	0.9861
St3	1.0	0.003	0.0009				0.90	0.06			
	1.5			0.00045	0.0009				0.035	0.1	
	2.0					0.00097					0.2850
	R ²	0.9914	0.9468	0.8312	0.9097	0.8411	0.9914	0.9468	0.8312	0.9097	0.8411

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด Diffusion–dispersion coefficient และ retardation factor

site	Textures	D (m ² day ⁻¹)			R		
		average	min	max	average	min	max
St1	ดินร่วนปนทราย	0.006700	0.00240	0.02000	0.29700	0.1950	0.4450
St2	ดินร่วนปนทราย	0.009378	0.00089	0.02850	0.28600	0.1000	0.4850
St3	ดินร่วนเหนียวปนทราย	0.001244	0.00045	0.00300	0.11400	0.0350	0.2850