



การเปรียบเทียบวิธีวัดโค้งลักษณะความชื้นดิน A Comparison of Methods for Measuring Soil Moisture Characteristic Curve

ศิวพร สีลเตโช^{1,4*}, วิชัย ศรีบุญลือ², Claude Hammecker³ และ วิทยา ตรีโลเกศ¹
 Siwaporn Siltecho^{1,4*}, Vichai Sriboonlue², Claude Hamecker³ and Vidhaya Trelo-ges¹

¹ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³Institut de Recherche pour le Développement UMR 210, Land Development Department, Office of Science for Land Development

⁴สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 5 กรมพัฒนาที่ดิน

*Correspondent author: aom_siwaporn@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในการคำนวณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำในดินจำเป็นต้องใช้โค้งลักษณะความชื้นดินที่ถูกต้อง การหาโค้งดังกล่าวในปัจจุบันที่นิยมมากที่สุดมี 4 วิธี ได้แก่ tension disc infiltrometer, Beerkan method, evaporation และ pedo-transfer function เนื่องจากยังไม่เคยมีการเปรียบเทียบกันมาก่อน การศึกษานี้จึงทำการเปรียบเทียบความถูกต้องและข้อดีข้อเสีย โดยใช้ดินในพื้นที่สวนยางพารา ในเขต อ.พระยืน จ.ขอนแก่น จากการศึกษาพบว่า Beerkan และ evaporation ให้ค่าสมเหตุสมผลและใกล้เคียงกัน ส่วน tension disc infiltrometer ให้ค่า negative pressure head (NPH) ที่ต่ำเกินจริง ส่วน pedo-transfer function ให้ค่า NPH ที่สูงเกินจริง เมื่อเปรียบเทียบความสะดวกในการใช้งาน Beerkan จะใช้ง่ายและราคาถูกกว่า evaporation มาก

Abstract

Accurate soil water flow modeling is not possible without a corrected soil moisture characteristic curve. At present, the curve is determined by 4 popular methods namely tension disc infiltrometer, Beerkan method, evaporation and pedo-transfer function. Since these 4 methods have never been compared therefore this study compares the accuracy and advantage among the methods. The soils located in a para rubber plantation in Phra Yun District, Khon Kaen Province were chosen for the comparison. We found that the Beerkan and the evaporation gave reasonable and consistant results, while the tension disc infiltrometer gave too low the negative pressure head (NPH) and the pedo-transfer function gave too high NPH values. However, the Beerkan is simpler and cheaper than the evaporation.

คำสำคัญ: โค้งลักษณะความชื้นดิน

Keywords: soil moisture characteristic curve

1. บทนำ

โค้งลักษณะความชื้นดิน (soil moisture characteristic curve) เป็นคุณสมบัติเชิงชลศาสตร์สำคัญอย่างหนึ่งของดินที่จำเป็นสำหรับการศึกษาและจำลองการเก็บกักและการเคลื่อนที่ของน้ำในดินซึ่งจำเป็นต่อการคำนวณเกี่ยวกับการชลประทาน การระบายน้ำ และการจัดการสิ่งแวดล้อม โค้งลักษณะความชื้นดินแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดันของน้ำในดิน (pressure head, h) กับความชื้นของดิน (water content, θ) โดยมักจะแสดงเป็นสมการซึ่งมีหลายรูปแบบแต่ที่นิยมใช้มากในการคำนวณเชิงตัวเลขคือแบบจำลองของ van Genuchten (1) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้ (2)

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + (-\alpha_v h)^n)^{-m} \quad [1]$$

ซึ่ง θ และ θ_s คือ ความชื้นคงค้าง (สัดส่วนปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่เป็นชั้นบางๆ รอบผิวอนุภาคดิน) และความชื้นอิ่มตัวตามลำดับ, α_v กับ m และ n เป็นค่าพารามิเตอร์ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง m กับ n ที่นิยมใช้คือความสัมพันธ์ของ Mualem (3)

$$m = 1 - 1/n \quad [2]$$

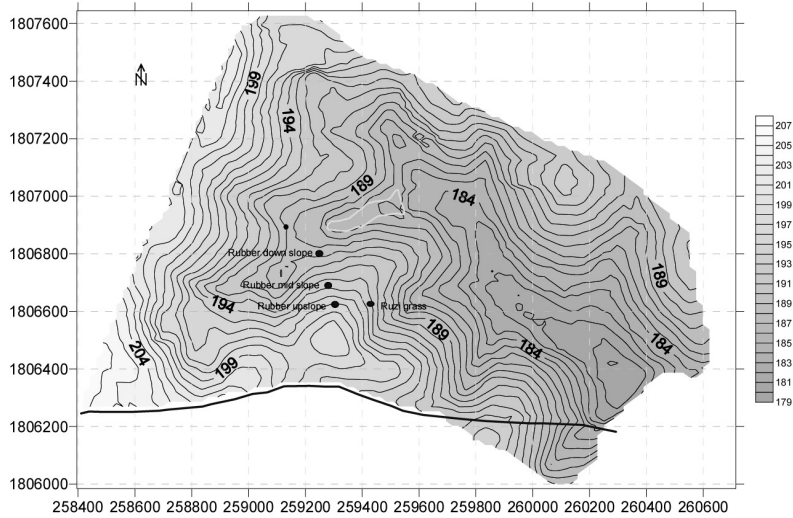
โดยที่ฟังก์ชัน $h(\theta)$ มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตรง และมีช่วงค่าที่ต่างกันมากระหว่างดินเปียกกับดินแห้ง ดังนั้นการหาค่าความสัมพันธ์จึงยุ่งยาก ซับซ้อน และอาจได้ค่าที่ผิดพลาดได้ง่ายการหาโค้งลักษณะความชื้นดินโดยทั่วไปใช้เวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นและพัฒนาวิธีวัดหาโค้งลักษณะความชื้นดังกล่าวของดิน ซึ่งมีอยู่ 4 วิธี ที่

ผู้ศึกษาเห็นว่าเป็นวิธีที่น่าสนใจและไม่ยุ่งยากซับซ้อน ได้แก่ disc infiltrometer (4), Beerkan (5), evaporation (6) และ pedo-transfer function (7) เนื่องจากยังไม่เคยมีการเปรียบเทียบทั้ง 4 วิธีนี้มาก่อน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาทดสอบเปรียบเทียบโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการวัดทั้ง 4 วิธีข้างต้น โดยทดสอบในดินปลูกยางพารา

2. วิธีการวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่างดิน

พื้นที่ศึกษาอยู่ใน บ.โนนคูน อ.พระยืน จ.ขอนแก่น รูปที่ 1 แสดง ตำแหน่ง UTM คือ 259275E, 1806656N ภูมิประเทศและจุดวัดค่าพารามิเตอร์ของดิน พื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาดระดับความสูงประมาณ 187-198 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง มีความชันประมาณ 3.5% พื้นที่ศึกษาเป็นสวนยางพารา ซึ่งปลูกแบบยกร่องขวางกับแนวความลาดชัน ระยะปลูก 3 x 7 เมตร ตำแหน่งที่ศึกษามี 3 จุด จุดตอนบน (upslope) ตอนกลาง (midslope) และตอนล่างของความชัน (downslope) ซึ่งจะเรียกสั้นๆ ว่า จุดบน จุดกลาง และจุดล่าง ตามลำดับ จากการสำรวจดินทั้ง 3 จุดได้ เปรอร์เซ็นต์ sand:silt:clay ดังแสดงในตารางที่ 1 และการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระจายขนาดของเม็ดดินที่จุดต่างๆ ก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก และเนื้อดินค่อนข้างสม่ำเสมอลงไปจนถึงระดับความลึก 94 cm

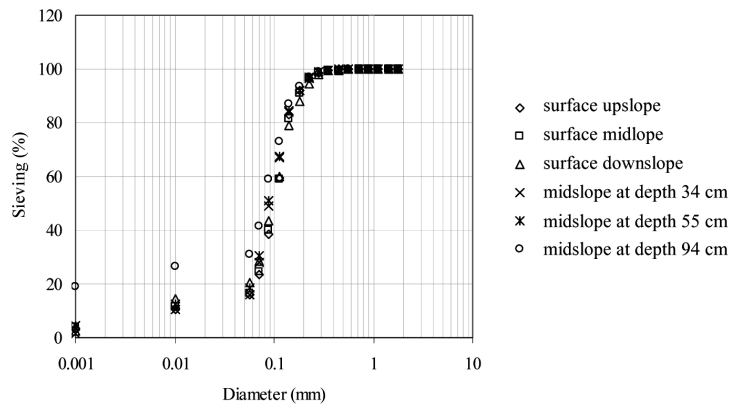


รูปที่ 1. พื้นที่ศึกษาบริเวณ บ.โนนตุน อ.พระยืน จ.ขอนแก่น

ตารางที่ 1. ข้อมูลเนื้อดินและความหนาแน่นรวมของดินที่ใช้ศึกษา

Location	Position	Sand Silt Clay (%)			Texture	ρ_b (g cm ⁻³)
		Upslope	surface	89.3		
Midslope	surface	88.5	7.4	4.1	S	1.38
	34 cm	84.7	11.2	4.1	LS	1.51
	55 cm	87.0	8.5	4.5	LS	1.49
	94 cm	57.7	14.3	28.0	SCL	1.62
Downslope	surface	85.5	12.2	2.3	LS	1.46

หมายเหตุ S=sand, LS=loamy sand, SCL sandy clay loam, pb=bulk density (ความหนาแน่นรวม)



รูปที่ 2. การกระจายขนาดอนุภาคดินในพื้นที่ศึกษา

เก็บตัวอย่างดินเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพที่จุดบน จุดกลาง และจุดล่าง ที่ระดับความลึก ดินบน, 34, 55 และ 94 cm โดยเก็บตัวอย่างดินแบบรักษาโครงสร้าง (undisturbed soil sample) ด้วยกระบอก PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15.5 cm สูงประมาณ 9 cm เพื่อหาโค้งลักษณะความชื้นดินด้วยวิธีการระเหยและความหนาแน่นรวม เก็บตัวอย่างดินแบบทำลายโครงสร้าง (disturbed soil sample) เพื่อหาการกระจายของอนุภาคดินและการจำแนกเนื้อดิน

2.2 การหาโค้งลักษณะความชื้นดิน

การหาโค้งลักษณะความชื้นดินหมายถึงการหาค่าพารามิเตอร์ในสมการ (1) ได้แก่ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v$ และ n ส่วนค่า m หาได้จากสมการ [2] โดยปกติค่า θ_r กับ θ_s มักจะหาโดยตรงจากตัวอย่างดิน เนื่องจาก θ หมายถึงความชื้นของดินที่มีค่าน้อยมากจนอาจจะถือได้ว่าไม่มีการเคลื่อนที่ของน้ำในขณะนั้น ในทางปฏิบัติถือเอาความชื้นของดินที่แห้งในร่ม โดยการทุบก้อนดินด้วยก้อนยางให้ดินแยกเป็นเม็ดๆ ตากไว้ในร่ม จนเห็นว่าแห้งสนิทแล้วจึงนำไปหาความชื้นโดยวิธี gravimetric ส่วน θ_s เป็นความชื้นของดินอิมตัว มักจะหาจากดินที่รู้ปริมาตรรวม (bulk volume) ทำให้เกิดการอิมตัวแล้วนำไปหาความชื้นด้วยวิธี gravimetric ส่วนค่าของ α_v และ n จำเป็นจะต้องหาโดยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1 Tension disc infiltrometer

Tension disc infiltrometer คืออุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการแทรกซึมน้ำ (infiltration) ลงสู่ดิน โดยทำให้

น้ำที่แทรกซึมออกมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ อุปกรณ์นี้มีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน (รูปที่ 3) ได้แก่ ถังจ่ายน้ำจานแทรกซึมและถังปรับความดันซึ่งถังปรับความดันทำหน้าที่ปรับความดันในถังจ่ายน้ำให้มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศตามต้องการ ถังจ่ายน้ำทำหน้าที่ส่งน้ำให้จานแทรกซึมซึ่งมีผิวล่างของจานเป็นวัสดุพรุนสัมผัสกับผิวดินที่ต้องการหาโค้งลักษณะความชื้นดิน น้ำจะแทรกซึมจากจานผ่านรูพรุน ด้วยอัตราการแทรกซึมที่สูงในตอนแรกแล้วลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอัตราการแทรกซึมคงที่ ดังนั้นที่เสดความดันน้ำ ($h_{0(1)}$) ค่าหนึ่งย่อมจะได้ค่าอัตราการแทรกซึมคงที่ (Q_1) ขนาดหนึ่ง

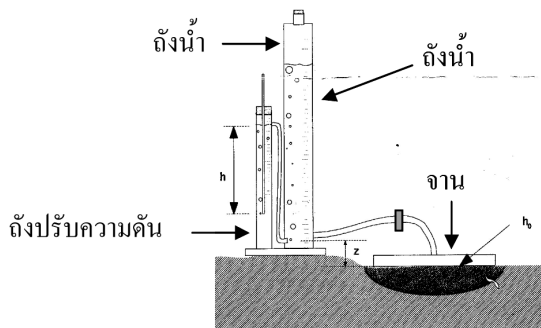
จากข้อมูลอัตราการแทรกซึมคงที่กับความดันน้ำอย่างน้อย 2 ชุด (คือ $h_{0(1)} - Q_1$ และ $h_{0(2)} - Q_2$) จะทำให้สามารถคำนวณโค้งลักษณะความชื้นดินได้โดยคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ α_G ของ Gardner (8) จากสมการ

$$\alpha_G = \frac{\ln(Q_1/Q_2)}{h_{0(1)} - h_{0(2)}} \tag{3}$$

จากนั้นความสัมพันธ์ $h(\theta)$ จะถูกเขียนจากสมการ Gardner ดังนี้

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(\alpha_G h) \tag{4}$$

เมื่อใส่สมการ [1] เข้ากับผลการคำนวณจากสมการ [4] โดยโปรแกรม RETC (ดูหัวข้อ 2.3) แล้วจะได้พารามิเตอร์ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v, m$ และ n ของ van Genuchten (1) ตามต้องการ



รูปที่ 3. Tension disc infiltrometer

2.2.2 Beerkan

วิธี Beerkan ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (9)

คือ (i) การหาการกระจายขนาดของเม็ดดิน (particle size distribution) (ii) การหาอัตราการแทรกซึม (infiltration rate)

โค้งการกระจายขนาดเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 2 จะมีรูปร่างคล้ายกับโค้งลักษณะความชื้นดิน ดังนั้นเราจะหาพารามิเตอร์รูปร่าง (m และ n) จากสมการ [5] ดังนี้

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad [5]$$

ซึ่ง F(D) คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวอย่างดินที่มีเม็ดขนาดเล็กกว่า D ต่อน้ำหนักรวมทั้งหมด, D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดิน, ส่วน D_g , N, และ M คือพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฟิตกับโค้งการกระจายขนาดของเม็ดดิน โดยที่

$$M = 1 - \frac{2}{N} \quad [6]$$

Lassabatere และคณะ (9) ได้ให้รายละเอียดในการคำนวณค่า m และ n จาก M และ N ดังนี้ ขั้นแรกหาค่าพารามิเตอร์ s จากความพรุน ϕ จาก

$$(1-\phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad [7]$$

แล้วจึงหาค่า P_m จาก

$$P_m = \frac{MN}{1+M} \left(1 + \frac{2s-1}{2s(1-s)} \right)^{-1} \quad [8]$$

และในที่สุดจะได้พารามิเตอร์รูปร่าง m กับ n จาก

$$m = \frac{1}{P_m} (\sqrt{1+p_m^2} - 1) \quad [9]$$

และ
$$n = \frac{2}{1-m} \quad [10]$$

สมการ [10] เป็นสมการตามแบบจำลองของ Burdine (9) ซึ่งแตกต่างจากสมการ [2] ของ Mualem (3)

ขั้นตอนที่ 2 จากการทดสอบอัตราการแทรกซึม จะได้ค่าการแทรกซึมสะสม (cumulative infiltration, I(t)) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา t ดังนี้ (10)

$$I = St^{0.5} + Ct \quad (11a)$$

หรือในรูปของสมการเส้นตรง

$$\frac{I}{t^{0.5}} = S + Ct^{0.5} \quad (11b)$$

เมื่อ S คือค่าสภาพดูดซึม (sorptivity) และ C เป็นฟังก์ชันของทั้งสภาพดูดซึม S และของสภาพนำชลศาสตร์อิ่มตัว K_s เมื่อพล็อต $I t^{-0.5}$ กับ $t^{0.5}$ ตามสมการ [11b] จะได้กราฟเส้นตรงและ S คือค่าที่ตัดแกน $I t^{-0.5}$ ส่วน C คือค่าความชัน

ในที่สุดพารามิเตอร์ α จะหาได้ตามลำดับขั้นดังนี้ ขั้นแรกหาพารามิเตอร์ η จาก

$$\eta = \frac{2}{mn} + 3 \quad [12]$$

ต่อมาหาค่า K_s จาก

$$K_s = \frac{C - AS^2}{B} \quad [13]$$

เมื่อ A และ B คือค่าคงที่ หาได้จากสมการ [14] และ [15] ตามลำดับ เมื่อ $\theta_0 < 0.25 \theta_s$ (9, 10)

$$A = \frac{0.75}{r_d(\theta_s - \theta_0)} \quad [14]$$

$$B = 0.47 \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right] + \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \quad [15]$$

เมื่อ r_d คือรัศมีของถังแทรกซึมในหน่วย mm, θ_0 และ θ_s คือความชื้นดินเมื่อเริ่มทดสอบและเมื่ออิ่มตัวตามลำดับ

หาค่าคงที่ C_p จาก (9, 10)

$$C_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left\{ \frac{\Gamma \left(m\eta - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(m\eta)} + \frac{\Gamma \left(m\eta + m - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(m\eta + m)} \right\} \quad [16]$$

และหาค่า α ได้จาก

$$\alpha = - \left\{ C_p (\theta_s - \theta_0) (1 - (\theta_0 / \theta_s)^\eta) K_s \right\} / S^2 \quad [17]$$

ค่าพารามิเตอร์ของ van Genuchten [1] ซึ่งได้แก่ m, n, และ α จากสมการ [9], [10] และ [17] ตามลำดับนั้น มีพื้นฐานบนแบบจำลองของ Burdine (11) แต่เนื่องจากแบบจำลองที่เป็นที่นิยมโดยทั่วไปเป็นของ Mualem (3) ดังนั้นจึงต้องหาค่าพารามิเตอร์ m, n,

และ α ใหม่ โดยการพิศพารามิเตอร์ดังกล่าวบนพื้นฐาน Mualem ดังสมการ [9] เข้ากับโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จาก Burdine (11) โดยโปรแกรม RETC แล้วจะได้พารามิเตอร์ θ_r , θ_s , α_v , m และ n ตามต้องการ

2.2.3 การวัดด้วยวิธี evaporation

วิธี evaporation ใช้หลักการกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำในตัวอย่างดินด้วยการระเหยน้ำออกจากดินตัวอย่างแล้ววัดค่าที่เกี่ยวข้องต่างๆ จึงนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์โค้งลักษณะความชื้นดิน

ในการศึกษานี้ ใช้กระบอกพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.5 cm สูง 9 cm ปลายเปิดทั้งบนและล่าง ผึงด้านข้างมีรูสำหรับเสียบเทนซิโอมิเตอร์ (tensiometer) ที่ระดับ 1.13, 3.38, 5.63, และ 7.88 cm จากปลายด้านล่าง เก็บตัวอย่างดินแบบไม่ทำลายโครงสร้างดินจากสนามมายังห้องปฏิบัติการ โดยใช้กระบอกพีวีซีดังกล่าวแช่ตัวอย่างดินทั้งกระบอกบรรจุดินและหัวเทนซิโอมิเตอร์ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ยาว 15 mm) ในน้ำที่ใส่อากาศ แล้วจุ่มตัวเสียบเทนซิโอมิเตอร์เข้าในตัวอย่างดินตามรูด้านข้าง ลึกประมาณ 6 cm ทั้ง 4 ระดับ ปิดปลายล่างของตัวอย่างดินด้วยซิลิโคนเพื่อให้เกิดการระเหยจากปลายบนของตัวอย่างดินตามธรรมชาติ วัดน้ำหนักของตัวอย่างดินและอ่านค่าเสดความดันทุกๆ 30 นาที เริ่มตั้งแต่เวลา 0 เมื่อดินจุ่มตัว ไปจนกระทั่งเทนซิโอมิเตอร์ไม่สามารถอ่านค่าได้ (ราวๆ -800 cm) จึงนำตัวอย่างดินไปหาปริมาณน้ำที่เหลือในตัวอย่างดินด้วยวิธีชั่ง (gravimetric method)

จากข้อมูลข้างต้นจะสามารถหาค่าความชื้นโดยปริมาตรของตัวอย่างดินและเสดความดันทั้ง 4 ระดับ ทุกๆ ช่วง 30 นาที เมื่อเฉลี่ยค่าเสดความดันทั้ง 4 ระดับ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น θ กับเสดความดัน h เมื่อพิศสมการที่ [1] เข้ากับข้อมูลที่ได้โดยโปรแกรม RETC ก็จะได้ค่าพารามิเตอร์ θ_r , θ_s , α_v , m และ n ตามต้องการ

2.2.4 วิธี pedo-transfer function

วิธี pedo-transfer function เป็นวิธีการประมาณค่าคุณสมบัติของดิน (ที่มีวิธีการหายุ่งยาก ซับซ้อน) จากคุณสมบัติอื่นของดินที่สามารถหาได้ง่ายกว่า Arya และคณะ (7) ได้เสนอวิธีหาโค้งลักษณะ

ความชื้นดินจากข้อมูลการกระจายขนาดของเม็ดดิน โดยปกติดินจะประกอบเม็ดดินขนาดต่างๆ ประปนกันอยู่ น้ำจะแทรกอยู่ในช่องว่างของดิน โดยช่องว่างของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถดูดยึดน้ำได้แรงกว่าช่องว่างของเม็ดดินขนาดใหญ่ เรียกแรงนี้ว่าแรง capillary

เราอาจเทียบเคียงการดูดยึดของน้ำในดินกับน้ำในหลอดแก้วได้ เมื่อพิจารณาจุ่มหลอดแก้วขนาดเล็กลงในน้ำ น้ำจะเคลื่อนที่ขึ้นมาในหลอดแก้ว และหยุดเมื่อแรง capillary สมดุลกับแรงโน้มถ่วง เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความสูง h_c กับรัศมีของหลอดแก้ว r ได้เป็น

$$h_c = \frac{2 \gamma \cos \theta}{\rho_w g r} \quad [18]$$

ซึ่ง γ คือ แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับอากาศ, ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ, g คือความโน้มถ่วง, θ คือมุมที่ผิวหน้าทำกับผนังหลอดแก้วซึ่งมักจะมีค่าน้อยมาก อนุโลมให้เท่ากับ 0 ดังนั้น $\cos 0$ มีค่าเท่ากับ 1 ค่าความสูง capillary ก็คือค่าเสดความดันที่เป็นลบหรือ $h = -h_c$ และเป็นสัดส่วนผกผันกับรัศมี r

จากคำจำกัดความของความพรุน (porosity, ϕ) และอัตราส่วนช่องว่าง (void ration, e) ประกอบกับความสัมพันธ์ในสมการ [18] ทำให้สามารถหาโค้งลักษณะความชื้นดินได้จากโค้งการกระจายขนาดเม็ดดิน (รูปที่ 2) ชั้นแรกแบ่งโค้งการกระจายออกเป็นช่วงๆ ราว 5-10 ช่วง จะได้ค่าสัดส่วนสะสม F_i (ของมวลดินที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง D_i ต่อมวลของตัวอย่างดินทั้งหมด) ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของเม็ดดิน R_i กับสัดส่วนสะสม F_i

ทุกๆ สัดส่วนสะสม F_i จะสามารถคำนวณความชื้นโดยปริมาตรจาก (7)

$$\theta_i = \phi F_i \quad [19]$$

เมื่อ ϕ คือค่าความพรุน

ในแต่ละช่วงที่แบ่งไว้จะได้จำนวนเม็ดดินทรงกลม n_i (หน่วย g^{-1}) จาก

$$n_i = \frac{3(F_i - F_{i-1})}{4\pi\rho_s R_i^3} \quad [20]$$

เมื่อ ρ_s คือความหนาแน่นของอนุภาคดิน มักมีค่าประมาณ 2.65 g cm^{-3} เนื่องจาก n_i คือจำนวนเม็ดดินที่มีรูปร่างกลม แต่ในธรรมชาติเม็ดดินไม่ใช่รูปร่างกลม ดังนั้นการแปลงค่าจำนวนเม็ดดินทรงกลมไปเป็นรูปร่างตามธรรมชาติต้องใช้พารามิเตอร์มาตราส่วน α_A ซึ่งหาได้จาก (7)

$$\alpha_A = \left[\frac{a + b \log((F_i - F_{i-1}) / R_i^3)}{\log n_i} \right] \quad [21]$$

เมื่อ a และ b คือพารามิเตอร์แปลงค่าซึ่งแปรผันไปตามชนิดของดิน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ค่าพารามิเตอร์ a และ b สำหรับเนื้อดินต่างๆ Arya และคณะ (7)

Textural class	a	b
Sand	-2.478	1.490
Sandy loam	-3.398	1.773
Loam	-1.681	1.395
Clay	-2.600	1.305

2.3 โปรแกรม RETC

โปรแกรม RETC เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ในสมการที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของดิน เช่น การวัดโค้งลักษณะความชื้นดิน เพื่อหาพารามิเตอร์ในสมการ [1] ได้แก่ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v, n$ และ m แบ่งขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เลือกที่จะวัดโค้งลักษณะความชื้นดิน จากนั้นเลือกสมการที่ต้องการใช้วัด เช่น ในการศึกษานี้เลือกสมการของ van Genuchten (1) บนพื้นฐานของ Mualem (3) จากนั้นนำเข้าข้อมูลเสถียรความชื้นและความชื้นดินที่ได้จากการวัด ส่วนที่ 2 การคำนวณของโปรแกรมใช้วิธี nonlinear least-squares ในการประเมินพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจำนวน 5 พารามิเตอร์ในสมการ [1] ได้แก่ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v, n$ และ m โดยโปรแกรมจะประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเหล่านี้จากข้อมูลเสถียรความชื้นและความชื้น

ในที่สุดจะสามารถหา pressure head ที่ช่วงต่างๆ ได้ดังนี้

$$h_i = \frac{-0.18}{R_i \sqrt{e n_i} (1 - \alpha_A)} \quad [22]$$

นั่นคือเราได้โค้งลักษณะความชื้นดินจากสมการ [19] และ [22] เมื่อใส่สมการ [1] เข้ากับข้อมูลโดยใช้โปรแกรม RETC จะได้พารามิเตอร์ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v, n$ และ m

ของดิน โดยหาพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุด ขณะเดียวกันก็ลดความแปรปรวนของส่วนที่เหลือ ในที่นี้ความแปรปรวนของส่วนที่เหลือถูกแทนที่ด้วย $O(b)$ ซึ่ง (b คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v, n$ และ m) หาจากสมการ [23]

$$O(b) = \sum_{i=1}^N \left\{ w_i \left[\theta_i - \hat{\theta}_i(b) \right] \right\}^2 \quad [23]$$

โดยที่ θ_i และ $\hat{\theta}_i$ คือค่าความชื้นของดินที่ได้จากการวัดและการฟิตตามลำดับ w_i คือ weighing factor และ N คือจำนวนของข้อมูล

ส่วนที่ 3 การแสดงผลคำนวณเปรียบเทียบในรูปข้อมูลและการฟิต แกน Y เป็นความชื้นดินส่วนแกน X เป็นค่าเสถียรความชื้น รวมทั้งแสดงผลการคำนวณ r^2

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดัน (h) กับความชื้นดิน (θ) สามารถแสดงผลได้สองแบบคือแบบกราฟและแบบตัวเลข ในการศึกษานี้จะแสดงผลทั้งสองแบบ ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดัน (h) กับความชื้นของดิน (θ) ด้วยวิธี disc infiltrometer, Beerkan, evaporation และ pedo-transfer function แสดงผลแบบตัวเลขดังตารางที่ 3 และแสดงผลแบบกราฟดังรูปที่ 4-6

วิธี evaporation เป็นวิธีที่วัดเสดความดันและความชื้นดินจากตัวอย่างดินโดยตรง ดังนั้นโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากวิธี evaporation จึงถือว่าเป็นมีความถูกต้องและสามารถใช้เพื่อเปรียบเทียบกับโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากวิธีอื่นๆ ผลการศึกษาเปรียบเทียบโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการวัด 4 วิธี ในดินเหนียว ได้แก่ ดินทราย และดินร่วนทราย (รูปที่ 4-5) พบว่าโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการวัดด้วยวิธี Beerkan มีลักษณะใกล้เคียงกับโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการวัดด้วยวิธี evaporation ส่วนในดินเหนียวโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการวัดทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันไปบ้างแต่ก็ยังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน (รูปที่ 6) ดังนั้นจะเห็นว่าวิธี Beerkan เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้หาโค้งลักษณะความชื้นดินได้อย่างถูกต้อง อีกสองวิธีที่เหลือคือโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการวัดด้วยวิธี disc infiltrometer และวิธี pedo-transfer function แตกต่างจากวิธี evaporation อย่างมาก ทั้งในดินทราย ดินร่วนทราย และดินเหนียว โดยวิธี disc infiltrometer โค้งลักษณะความชื้นดินให้ค่า NPH (negative pressure head) ต่ำสุด (รูปที่ 4-6) และวิธี pedo-transfer function โค้งลักษณะความชื้นดินให้ค่า NPH สูงสุด (รูปที่ 4-6) เช่นที่ระดับความชื้นดินประมาณ $0.2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ในดินทรายที่จุดตอนบน วิธี disc infiltrometer และวิธี pedo-transfer function ให้ค่า NPH ประมาณ 9 และ 250 cm ตามลำดับ ขณะที่วิธี evaporation และวิธี Beerkan ให้ค่า NPH ประมาณ 71 และ 90 cm ตามลำดับ ในกรณีของ disc infiltrometer ที่อ่านค่า NPH ได้สูงอาจเนื่องมาจากอิทธิพล

ของสมการ Gardner (สมการ (4)) ซึ่งเป็นสมการ exponential ทำให้โค้งลักษณะความชื้นดินมีลักษณะการลดลงแบบทอดยอดไม่เป็นลักษณะของ S-shape ดังนั้นถึงแม้จะพิดด้วยสมการ van Genuchten แต่ก็ยังแสดงอิทธิพลของสมการ Gardner จึงทำให้โค้งลักษณะความชื้นดินมีค่า NPH ต่ำสุด ส่วนวิธี pedo-transfer function โค้งลักษณะความชื้นดินให้ค่า NPH สูงสุดโดยก่อนมาทางดินร่วนอาจเนื่องมาจาก h_i ถูกคำนวณจากรัศมีของอนุภาคซึ่งในการศึกษานี้การกระจายขนาดอนุภาคประมาณร้อยละ 60 อยู่ในช่วง $0.08-0.05 \text{ mm}$ ซึ่งอยู่ในช่วงของอนุภาคขนาดทรายละเอียดมากซึ่งใกล้เคียงอนุภาคดินขนาดทรายแป้งทำให้การคำนวณโค้งลักษณะความชื้นดินมีลักษณะก่อนมาทางดินร่วนหรือดินเนื้อละเอียดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโค้งลักษณะความชื้นดินจากทั้ง 4 วิธีกับ Guymon (12) พบว่าโค้งลักษณะความชื้นดินที่วัดจากวิธี disc infiltrometer มีค่าใกล้เคียงกับ Guymon (12) มากที่สุด อย่างไรก็ตามโค้งลักษณะความชื้นดินจาก Guymon (12) อาจแตกต่างจากโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการวัดได้ เนื่องจากเนื้อดินแต่ละชนิดอาจมีสัดส่วนอนุภาคขนาด sand:silt:clay ที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นโค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จึงอาจแตกต่างกันอย่างมากได้ แม้ว่าจะมีเนื้อดินเหมือนกันก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดทั้ง 4 วิธี จะพบข้อสังเกตดังนี้คือวิธี disc infiltrometer มักจะเกิดการรั่วซึมของน้ำในรอยข้อต่อต่างๆ และระหว่างพื้นผิวดินกับผิวของจาน วิธีนี้ นอกจากต้องการความชำนาญในการวัดแล้ว เครื่องมือมีความประปราย อุปกรณ์บางชิ้นต้องสั่งจากต่างประเทศ เช่น porous membrane เป็นต้น วิธี evaporation มีข้อควรระวังคือการอ่านค่าของ tensiometer ซึ่งมีขนาดเล็กอาจมีความแปรปรวนได้ง่ายเมื่อสกปรกและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดส่วนใหญ่ต้องสั่งจากต่างประเทศและมีราคาแพง การบันทึกค่าน้ำหนักและความดันอาจมีปัญหาถ้าไม่มี data logger และเนื่องจากลิมิตของ tensiometer จึงมีปัญหาในการวัดเสดความดันในดินเหนียววิธี Beerkan เป็นวิธีที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน คือหาการกระจายขนาดอนุภาคดินในห้องปฏิบัติการและหาอัตราการแทรกซึม น้ำในแปลงทดลอง การปฏิบัติทั้ง 2 วิธีนี้ เป็นพื้นฐานใน

ห้องปฏิบัติการปฐพีศาสตร์และปฐพีกลศาสตร์โดยทั่วไป ดังนั้นวิธี Beerkan จึงสะดวก ประหยัด และสามารถทำได้ทุกสถานที่ ส่วนวิธี pedo-transfer function นั้นหาการกระจายขนาคอนนุภาคดินในห้องปฏิบัติการและหาค่าความหนาแน่นดิน ซึ่งแม้จะสะดวกและประหยัดเช่นเดียวกับวิธี Beerkan แต่อาจไม่เพียงพอที่จะให้ค่าได้ถูกต้องเนื่องจากไค่งลักษณะความชื้นดินไม่ขึ้นอยู่กับเนื้อดินเพียงอย่างเดียวแต่โครงสร้างดินมีความสำคัญอย่างมากที่ทำให้ไค่งลักษณะความชื้นดินแตกต่างจากที่คำนวณได้

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเสดความดัน (h_p) กับความชื้นของดิน (θ) ในแบบตัวเลขในรูปของพารามิเตอร์ θ_r , θ_s , α_v และ n แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญในการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน พารามิเตอร์เหล่านี้มีความอ่อนไหวต่อการคำนวณการไหลของน้ำใต้ผิวดินไม่เท่ากันหรืออาจกล่าวได้ว่าค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลต่อการจำลองหรือการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำในดินไม่เท่ากัน โดยพารามิเตอร์ n มีผลมากที่สุดหรือมีความอ่อนไหวมากที่สุด ตามด้วยพารามิเตอร์ θ_s , θ_r และ α_v ตามลำดับ (13) จากผลการศึกษาในดินทรายและดินทรายร่วนพบว่า 2 พารามิเตอร์แรกคือ θ_r และ θ_s มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 วิธี ดังนั้นในกรณีศึกษาที่ θ_r และ θ_s จึงไม่มีผลต่อความแตกต่างกันของรูปร่างของไค่งลักษณะความชื้นดิน พารามิเตอร์ที่ 3 คือ α_v มีค่าสูงสุดในวิธี disc infiltrometer โดยมีค่าอยู่ในช่วง $0.113-0.233 \text{ cm}^{-1}$ และมีค่าต่ำสุดในวิธี pedo-transfer function โดยมีค่าอยู่ในช่วง $0.002-0.005 \text{ cm}^{-1}$ ส่วนวิธี evaporation และวิธี Beerkan มีค่าใกล้เคียงกันคือมีค่าอยู่ในช่วง $0.015-0.020 \text{ cm}^{-1}$ และ $0.015-0.016 \text{ cm}^{-1}$

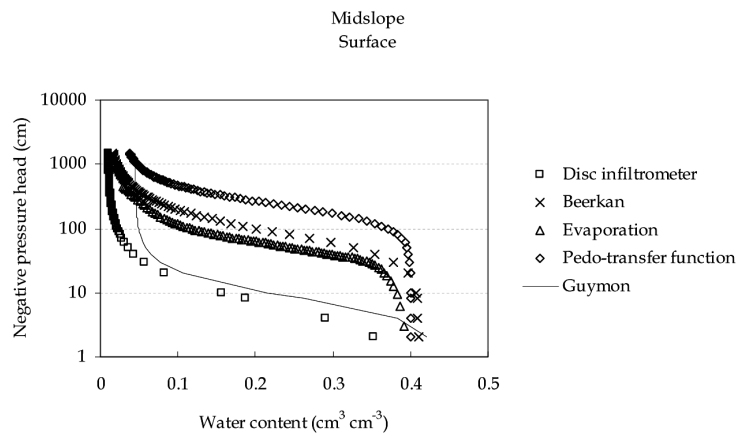
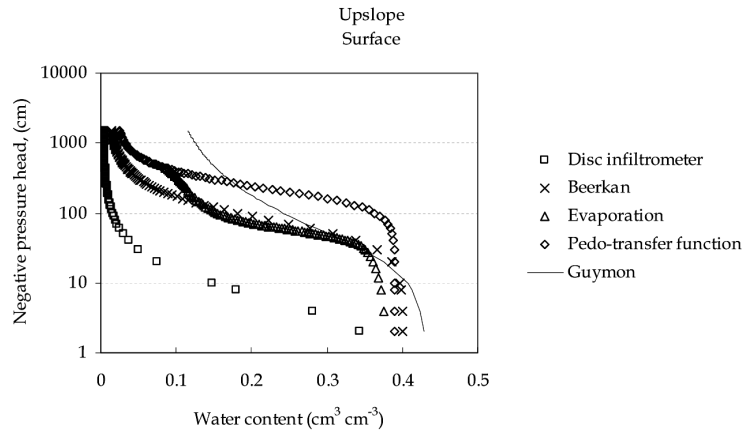
ตามลำดับ พารามิเตอร์ α_v เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter) ดังนั้นเมื่อ α_v มีค่าต่ำถึงสูงจะมีผลทำให้รูปร่างของไค่งลักษณะความชื้นดินแตกต่างกัน (ดูตัวอย่างรูปที่ 7) และเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ที่ 4 คือพารามิเตอร์ n ซึ่งมีค่าสูงสุดในวิธี evaporation โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.643-3.319 มีค่าต่ำสุดในวิธี pedo-transfer function โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.092-1.155 ส่วนวิธี disc infiltrometer และวิธี Beerkan มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.935-2.164 และ 2.006-2.409 ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ n เป็น scale parameter เมื่อ n มีค่าต่ำจะมีผลต่อรูปร่างของไค่งลักษณะความชื้นดิน (ดูตัวอย่างรูปที่ 8) ดังนั้นเมื่อรวมอิทธิพลของพารามิเตอร์ α_v ที่มีค่าต่ำและพารามิเตอร์ n ที่มีค่าสูงทำให้ไค่งลักษณะความชื้นดินสำหรับวิธี pedotransfer function มีค่า NPH สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4-5 ส่วนวิธี disc infiltrometer เนื่องจากอิทธิพลของพารามิเตอร์ α_v ที่มีค่าสูงทำให้ไค่งลักษณะความชื้นดินมีค่า NPH ต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4-5

ในดินร่วนเหนียวปนทราย พารามิเตอร์ α_v มีค่าสูงสุดในวิธี disc infiltrometer (0.593 cm^{-1}) ส่วนวิธี Beerkan วิธี evaporation และ วิธี pedo-transfer function มีค่าใกล้เคียงกัน พารามิเตอร์ n จากทั้ง 4 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน (1.480-2.189) ในกรณีนี้เฉพาะพารามิเตอร์ α_v ที่มีค่าสูงทำให้ไค่งลักษณะความชื้นดินของวิธี disc infiltrometer มีค่า NPH ต่ำสุด และแตกต่างจากวิธี Beerkan วิธี evaporation และวิธี pedotransfer function ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ (6)

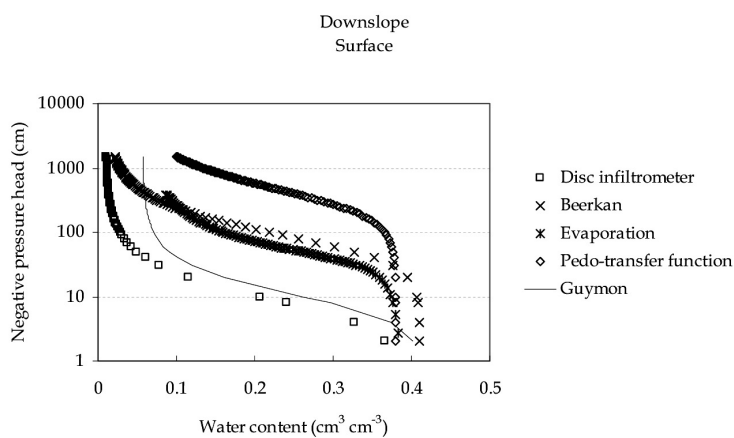
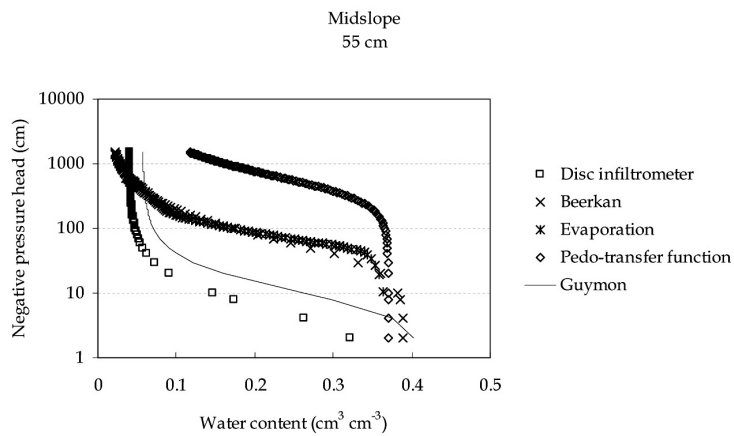
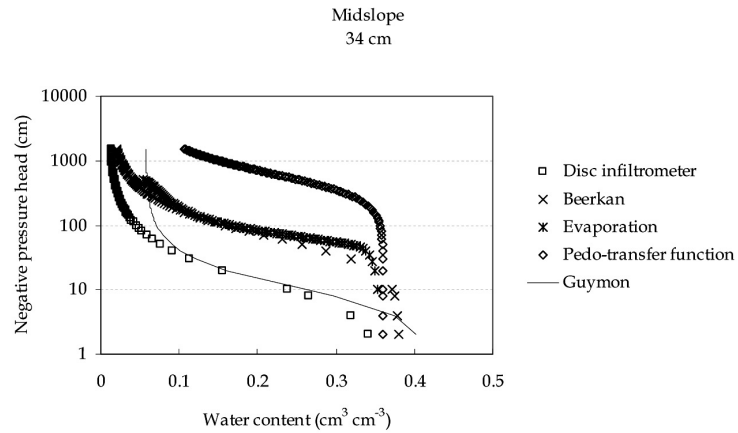
ดังนั้นจากผลการศึกษาจึงสามารถสรุปว่าพารามิเตอร์ของ van Genuchten มีผลต่อรูปร่างของไค่งลักษณะความชื้นดิน

ตารางที่ 3. พารามิเตอร์ของ van Genuchten

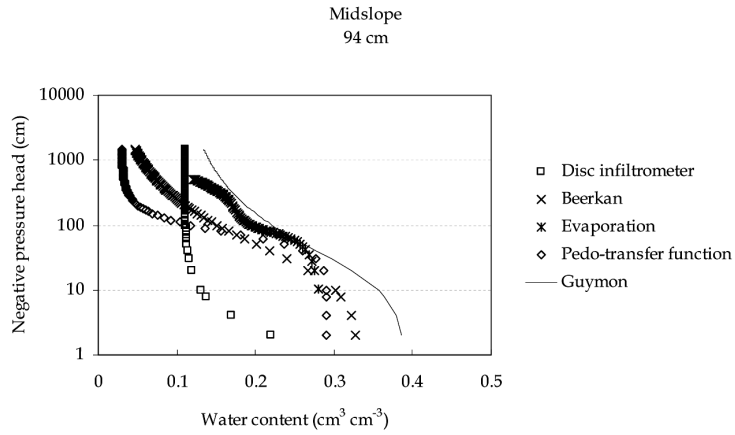
Texture	Position	Method	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	
Sand	Upslope Surface	Disc infiltrometer	0.004	0.37	0.209	2.134	
		Beerkan	0.01	0.40	0.016	2.409	
		Evaporation	0.11	0.38	0.020	3.319	
		Pedo-transfer function	0.02	0.39	0.005	1.155	
	Midslope Surface	Disc infiltrometer	0.01	0.38	0.209	2.125	
		Beerkan	0.01	0.41	0.015	2.352	
		Evaporation	0.03	0.39	0.019	2.959	
		Pedo-transfer function	0.03	0.40	0.005	1.152	
			Guymon (1994)	0.045	0.43	0.145	2.68
	Loamy sand	Midslope 34 cm	Disc infiltrometer	0.01	0.35	0.113	1.935
Beerkan			0.01	0.38	0.022	2.038	
Evaporation			0.06	0.37	0.015	3.324	
Pedo-transfer function			0.04	0.37	0.002	1.134	
Midslope 55 cm		Disc infiltrometer	0.04	0.35	0.233	2.164	
		Beerkan	0.01	0.39	0.021	2.006	
		Evaporation	0.03	0.35	0.015	2.643	
		Pedo-transfer function	0.04	0.37	0.002	1.137	
Downslope Surface		Disc infiltrometer	0.01	0.38	0.150	2.104	
		Beerkan	0.01	0.41	0.015	2.148	
		Evaporation	0.07	0.38	0.020	3.202	
		Pedo-transfer function	0.03	0.38	0.003	1.092	
			Guymon (1994)	0.057	0.41	0.124	2.28
Sandy clay loam	Downslope 94 cm	Disc infiltrometer	0.11	0.29	0.593	2.189	
		Beerkan	0.01	0.33	0.047	1.510	
		Evaporation	0.10	0.29	0.018	1.803	
		Pedo-transfer function	0.03	0.29	0.015	1.529	
		Guymon (1994)	0.100	0.39	0.059	1.48	



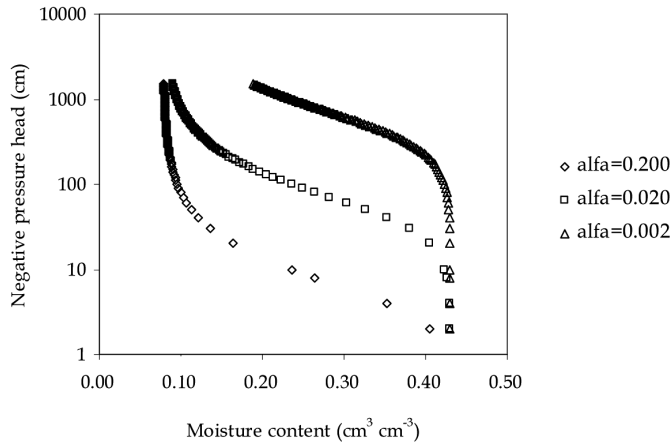
รูปที่ 4. โค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการคำนวณจาก 4 วิธี ที่วัดในดินทราย (ก) จุดบน ที่ระดับความลึก 0-5 cm (ข) จุดกลาง ที่ระดับความลึก 0-5 cm



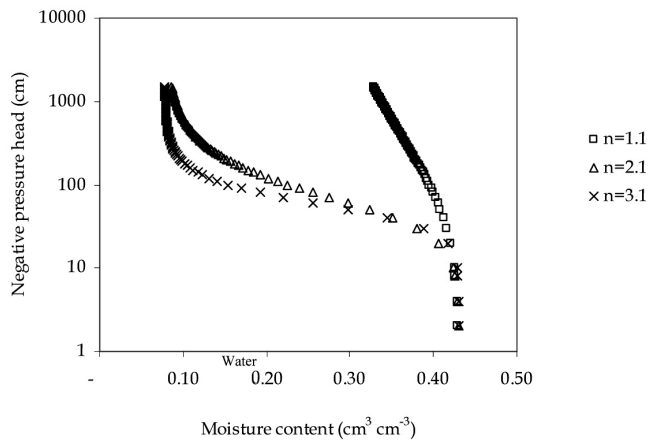
รูปที่ 5. โคลงลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการคำนวณจาก 4 วิธี ที่วัดในดินทรายร่วน (ก) จุดกลาง ที่ระดับความลึก 34 cm (ข) จุดกลางที่ระดับความลึก 55 cm (ค) จุดล่างที่ระดับความลึก 0-5 cm



รูปที่ 6. โค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการคำนวณจาก 4 วิธี ที่วัดในดินร่วนเหนียวปนทราย ที่จุดกลาง ที่ระดับความลึก 94 cm



รูปที่ 7. โค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ θ_r , θ_s และ n มีค่าคงที่



รูปที่ 8. โค้งลักษณะความชื้นดินที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ θ_r , θ_s และ α_V มีค่าคงที่

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 วิธี Beerkan เป็นวิธีที่ใช้หาโค้งลักษณะความชื้นดินได้ดีเช่นเดียวกับวิธี evaporation ซึ่งเป็นวิธีอ้างอิงที่ใช้ในการศึกษานี้ เนื่องจากได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 2004 (14) แต่วิธี Beerkan เป็นวิธีที่ง่ายกว่าและไม่ยุ่งยากซับซ้อน คือทำการกระจายขนาดอนุภาคดินซึ่งสามารถทำได้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการทางปฐพีศาสตร์และปฐพีกลศาสตร์ และหาอัตราการแทรกซึมน้ำในแปลงทดลอง ซึ่งวิธีนี้จึงสะดวก ประหยัด และสามารถทำได้ทุกสถานที่

4.2 วิธี evaporation เป็นวิธีที่ใช้หาโค้งลักษณะความชื้นดินในห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 2004 (14) โดยวิธีนี้วัดหาค่าความดันกับความชื้นดินวิธีนี้สามารถใช้หาโค้งลักษณะความชื้นดินได้ดี แต่ต้องการความชำนาญของผู้ปฏิบัติเนื่องจากอุปกรณ์บางชนิด เช่น micro tensiometer มีขนาดเล็กและมีความเปราะบางแตกหักง่าย จึงต้องใช้ความระมัดระวัง นอกจากนี้การอ่านค่าของ micro tensiometer ซึ่งมีขนาดเล็กอาจมีความแปรปรวนได้ง่ายเมื่อสกรุป จึงต้องมีความชำนาญในการสังเกตการอ่านค่าของ pressure transducer และการบันทึกข้อมูลด้วย data logger ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง ควรมีการใช้อุปกรณ์อื่นทดแทน

4.3 วิธี disc infiltrometer หาโค้งลักษณะความชื้นดินจากการคำนวณหลายขั้นตอนจากอัตราการแทรกซึม น้ำ ซึ่งทำให้โค้งลักษณะความชื้นดินที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนไป นอกจากนั้นตัวอุปกรณ์เองมักเกิดปัญหาการรั่วซึมของน้ำในรอยข้อต่อต่างๆ และระหว่างพื้นผิวดินกับผิวของจาน ดังนั้นจึงต้องการความชำนาญของผู้ปฏิบัติและอุปกรณ์บางชิ้น เช่น porous membrane ต้องสั่งจากต่างประเทศจึงมีราคาแพง

4.4 วิธี pedo-transfer function หาโค้งลักษณะความชื้นดินจากการกระจายขนาดอนุภาคดินในห้องปฏิบัติการและค่าความหนาแน่นดิน ซึ่งปฏิบัติได้ง่ายเช่นเดียวกับวิธี Beerkan แต่ข้อมูลการกระจายขนาดอนุภาคอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้การคำนวณโค้งลักษณะความชื้นดินได้ถูกต้องเนื่องจากโค้งลักษณะความชื้นดิน

ไม่ขึ้นอยู่กับเนื้อดินแต่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างดิน ถึงแม้จะแก้ปัญหาด้วยการนำค่าความหนาแน่นรวมมาใช้ในการคำนวณด้วย แต่ลักษณะความต่อเนื่องและการกระจายขนาดของช่องว่างในดินอาจไม่เป็นไปตามทฤษฎี

4.5 ถึงแม้ว่าวิธีการทั้ง 4 วิธี สามารถใช้หาโค้งลักษณะความชื้นดินได้ แต่สุดท้ายสิ่งที่ดีที่สุดในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v$ และ n จากทั้ง 4 วิธี คือการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำในดินเพื่ออธิบายได้อย่างชัดเจนว่าค่าพารามิเตอร์ $\theta_r, \theta_s, \alpha_v$ และ n จากวิธีใดที่สามารถให้ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำในดินได้ถูกต้องมากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัย IRD และศูนย์วิจัยน้ำบาดาล มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำงานวิจัย คุณอภิชัย เจ้าของสวนยางพาราที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ คุณวัชร ผู้จัดการสวนยางพาราที่ให้ความอนุเคราะห์ในการติดต่อประสานงาน รวมทั้งอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำงาน ผู้ช่วยวิจัยของสถาบันวิจัย IRD ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานในสนามและห้องปฏิบัติการ และกลุ่มวิเคราะห์ดิน สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 5 ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ดินในห้องปฏิบัติการ

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) van Genuchten, M.Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1980;44: 892-898.
- (2) Sriboonlue, V. Hydrology. Khon Kaen: Khon Kaen University. 2009. Thai.
- (3) Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 1976;12: 513-522.

- (4) Perroux, K.M. and I White. Design for disc permeameters and soil dispersion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1988;48: 50-55.
- (5) Harverkamp, R.; F.J. Leij, C. Fuentes, A. Sciortino and P.J. Ross. Soil water retention: I. Introduction of a shape index. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2005;69: 1881-1890.
- (6) Wind G.P. Capillary conductivity data estimated by a simple method. *Proceedings of the Wageningen symposium; 1968 June, IASH Gentbrugge/Unesco Paris.*
- (7) Arya, L.M., F.J. Leij, M.Th. van Genuchten and P.J. Shouse. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1999;63: 510-519.
- (8) Gardner, W.R. Some steady state solution of the unsaturated moisture flow equation with the application to evaporation from water table. *Soil Sci.* 1958;85: 228-232.
- (9) Burdine, N.T. Relative permeability calculation from pore size distribution data. *Petr. Trans. Am Inst. Min. Metall. Eng.* 1953;198: 71-77.
- (10) Xu, X., G. Kiely and C. Lewis. Estimation and analysis of soil hydraulic properties through infiltration experiments: comparison of BEST and DL fitting method. *Soil Use and Management.* DOI: 10.1111/j.1475-2743.2009.00218.x. 2009.
- (11) Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J.M.S. Ugalde, R. Cuenca, I. Braud and R. Haverkamp. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006; 70: 521-532.
- (12) Guymon, G.L. *Unsaturated Zone Hydrology.* New Jersey: PTR Prentice Hall. 1994.
- (13) Rocha D., F. Abbasi and J. Feyen. Sensitivity analysis of soil hydraulic properties on subsurface water flow in furrows. *J. Irrig. Drain Eng.* 2006;132 (4): 418-424.
- (14) ISO. *Soil Quality-Determination of the Unsaturated Hydraulic Conductivity and Water Retention Characteristic -Wind's Evaporation Method.* ISO 11275. 2004.