



การศึกษาความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนของดินในแปลงเกษตรโดยใช้วิธีการทะลุทะลวงของกรวย

A study of shear stress and shear viscosity of agricultural soils using the cone penetrometer method

เกรียงไกร رایณะสุข^{1*}, สามารต บุนอาร์ท¹Kriengkrai Rayanasuk^{1*}, Samart Bun-art¹¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tel: +66-8-1282-7089, E-mail: d5540235@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนของดินในแปลงเกษตร โดยใช้วิธีการทะลุทะลวงของกรวย ซึ่งเป็นวิธีที่กำหนดให้ใช้ในมาตรฐานอังกฤษ (BS 1377-2, 1990) และนำมาประยุกต์ในการทดลองหาค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนของดิน ตัวอย่างดินในแปลงเกษตรที่ใช้เป็นดินร่วนปนทราย มีขีดจำกัดเหลว (liquid limit) เท่ากับ 24.10% และพิกัดพลาสติก (plastic limit) เท่ากับ 9.50% ทำการวัดระยะจมของกรวยที่หยุดหนึ่ง คำนวณหาความเค้นเฉือน และค่าความหนืดเฉือน ผลการศึกษา พบว่า ค่าความเค้นเฉือนของดินมีแนวโน้มลดลงตามระยะจมของกรวยที่เพิ่มขึ้น และแปรผันตามน้ำหนักของกรวย ส่วนค่าความหนืดเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อเทียบกับค่าดัชนีสภาพความเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น วิธีการทะลุทะลวงของกรวยสามารถนำไปใช้หาค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนที่ความชื้นของดินในแปลงเกษตรตามสภาพจริงได้ และนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมเกษตรด้านต่างๆ ต่อไป

คำสำคัญ: ความเค้นเฉือน, ความหนืดเฉือน, ดินร่วนปนทราย, การทะลุทะลวงของกรวย

Abstract

The objective of this research was to study values of shear stress and shear viscosity for agricultural soils. The cone penetrometer method was defined in British Standard (BS 1377-2, 1990). The cone penetrometer method was applied in shear stress and shear viscosity of soil tests. The experiments were performed on sandy loam soil of liquid and plastic limits of 24.10% and 9.50% respectively. The measure was the final depth of penetrated of the cone. These calculate was used to determine the shear stress and shear viscosity. The results show that, the value of shear stress of soil was tendency to decrease related to the depth of penetration of cone increasing and varied the weight of cone. The values of shear viscosity of soil had decreased exponential whereas the values of liquidity index increase. Based on this analysis, the cone penetrometer method can be used for shear stress and shear viscosity at water content of agricultural soil in fieldwork and the data is applied in agricultural engineering work further.

Keywords: Shear stress, Shear viscosity, Sandy loam, Cone penetrometer

1 บทนำ

ในการทำการเกษตรกรรม เกษตรกรต้องเตรียมดินโดยการไถพรวนดินเพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช โดยดินในแปลงเกษตรส่วนมาก มีการไถพรวนอยู่บ่อยครั้ง ส่งผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติทางกลของดิน มีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการออกของเมล็ด การเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตของพืช คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สามารถมองเห็นและสัมผัสได้ ได้แก่ เนื้อดิน (soil

texture) และโครงสร้างดิน (soil structure) เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติรีโอโลยีของดิน (rheological of soil) คือ การเปลี่ยนรูปร่างและการไหลของดินที่มีพฤติกรรมเบี่ยงเบนจากกฎของนิวตันและกฎของฮุก เพื่อให้ดินมีพฤติกรรมที่ตอบสนองแรงกล (mechanical force) ที่มากระทำในเทอมของความยืดหยุ่น (elastic) และความหนืด (viscosity) (Keedwell, 1984)

ในการทดสอบหาคุณสมบัติการไหลของดิน (rheological of soil) ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กำลังต้านทานแรงของดิน (soil strength) ความเค้นเฉือนของดิน (shear stress) อัตราส่วน

ความเครียดเฉือนของดิน (shear strain rate) และ ความหนืดเฉือนของดิน (shear viscosity) การวัดความหนืดทำได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น 1) การใช้กฎความหนืดของนิวตัน (Newton's Law of Viscosity) 2) การใช้สมการฮาเกน-ปัวเซย (Hagen-Poiseuille) 3) การสอบเทียบกับของไหลที่รู้ความหนืด

Wood and Wroth (1978) และ Stone and Phan (1995) ได้เสนอวิธีการหาพิกัดพลาสติกโดยใช้เครื่องมือการทะลุทะลวงด้วยกรวย (cone penetrometer test) และได้กำหนดในมาตรฐานอังกฤษ (BS 1377-2, 1990) เพื่อนำมาใช้หาค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index) และค่าดัชนีสภาพพลาสติก (plasticity index)

Mahajan and Budhu (2008) แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้วิธี fall cone test ในการหาคุณสมบัติการไหลของดินได้ โดยมีพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ คือค่าความหนืดเฉือนในดินเหนียว และ พบว่า เครื่องมือวัดความหนืด (viscometers) ใช้สำหรับวัดค่ากำลังต้านทานแรง (yield strength) และความหนืดเฉือน (shear viscosity) เช่น เครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน (rotary viscometers) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความแข็งแรงของดินเหนียวที่มีความอ่อนนุ่ม มีความชื้นของดินสูง และใช้วัดกำลังต้านทานแรงเฉือน (shear strength) แบบต่างๆ การวัดค่าความหนืดเฉือนสำหรับวิธีดังกล่าวทำได้ยากและมีข้อจำกัดของเครื่องมือวัดความหนืด คือ ค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index, LI) ต้องมีค่ามากกว่า 1.5 ดังนั้น วิธีการทดสอบโดยใช้ fall cone test จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้หาค่าความหนืดเฉือนของดินที่มีค่า liquidity index (LI) น้อยกว่า 1.5 แทนวิธีดังกล่าว ในขณะที่ดินในแปลงเกษตรนั้น คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินที่สามารถหาค่าได้หรือมีการใช้เครื่องมือวัดมาก่อน เช่น ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง ความพรุน และความชื้นของดิน แต่ยังไม่เคยมีการหาความหนืดของดิน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการไหลของดิน โดยเฉพาะการวัดค่าความหนืดเฉือนของดิน

จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการหาคุณสมบัติการไหลของดิน ที่เน้นศึกษาค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนของดิน โดยเฉพาะดินในแปลงเกษตรที่ใช้วิธีการทะลุทะลวงด้วยกรวย (cone penetrometer method) ทดสอบหาคุณสมบัติการไหลของดิน (rheological of soil) เป็นอีกวิธีหนึ่ง โดยดินที่ใช้ทดสอบเป็นดินในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อนำค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดเฉือนของดินที่ได้มาใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณออกแบบหรือพัฒนาแบบจำลองสำหรับงานทางวิศวกรรมเกษตรในด้านต่างๆ ต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ประกอบด้วยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างดิน เพื่อใช้ในการเก็บดินในแปลงเกษตร ตะแกรงร่อนดิน (sieve) เพื่อใช้แยกกรวดและทราย

เครื่องไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) เพื่อใช้สำหรับการจำแนกดิน เครื่องทดสอบการทะลุทะลวงด้วยกรวย (cone penetrometer) เพื่อใช้สำหรับทดลองหาขีดจำกัดเหลว (liquid limit) พิกัดพลาสติก (plastic limit) ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง และระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ อุปกรณ์ตรวจวัดแบบเซนเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวผ่านแบบเชิงเส้น (linear variable differential transformer, LVDT) ที่ได้ผ่านการสอบเทียบ (calibrated) เพื่อใช้วัดค่าระยะจมของกรวยเทียบกับเวลาที่กรวยจมลงในดิน อุปกรณ์บันทึกข้อมูล data acquisition system (DAQ) ที่มีสัญญาณความถี่ 1 kHz เพื่อใช้สำหรับบันทึกข้อมูลที่ต่อเนื่องของระยะการจมเทียบกับเวลาที่ส่งค่ามาจากอุปกรณ์ตรวจวัดแบบเซนเซอร์ คอมพิวเตอร์แบบพกพา เพื่อใช้สำหรับการแสดงผลทางหน้าจอ ดังแสดงใน Figure 1

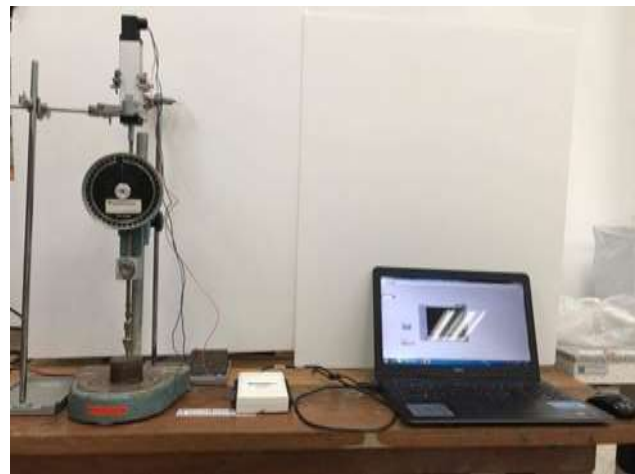


Figure 1 Modified experimental setup for the cone penetrometer test.

2.2 การเก็บตัวอย่างดินและการจำแนกดิน

ทำการเก็บตัวอย่างดินในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อนำมาแยกกรวดและทรายออกจากกันด้วยตะแกรงร่อนดิน โดยนำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ประมาณ 300 g มาวิเคราะห์การจำแนกดินด้วยเครื่อง Hydrometer

2.3 วิธีการหาค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL)

นำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ที่ผ่านการร่อนแล้วประมาณ 200-250 g หาค่า liquid limit (LL) และ plastic limit (PL) โดยใช้เครื่องมือทดสอบการทะลุทะลวงด้วยกรวย (cone penetrometer) ตามมาตรฐานอังกฤษ (BS 1377-2, 1990) ทำการทดสอบหาค่า liquid limit โดยใช้กรวยมีมุมที่ปลายแหลม 30° พื้นผิวเรียบ น้ำหนัก 80 g ปลอ่ยกรวยให้ตกจมลงไปในตัวอย่างดินที่ผสมน้ำไว้แล้วในภาชนะทรงกระบอกเป็นเวลา 5 s จึงอ่านค่าระยะจมตัวของกรวยในดิน เก็บตัวอย่างไปหาค่าความชื้น ทำการทดลองซ้ำแบบเดิมอีก 3 ครั้ง (รวม 4 ครั้ง) ทุกๆ ครั้งให้เพิ่มปริมาณน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) โดยให้ได้การทดลองของกรวยจมอยู่ที่ระยะระหว่าง 15-25 mm เมื่อ

ทำการทดลองเสร็จแล้ว คำนวณค่าความชื้นของดินในแต่ละครั้ง การทดลอง แล้วนำมาพล็อตกราฟ ในแกนนอนเป็นค่าความชื้น ส่วนในแกนตั้งเป็นค่าระยะจมของกรวย จากนั้น ลากเส้นตรงเฉลี่ยผ่านจุดที่เขียน ที่ค่าระยะจมของกรวย 20 mm ในสเกล ลากเส้นตัดกราฟที่เขียนไว้แล้วมาตัดแกนค่าความชื้น จะเป็นค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit) ของดิน สำหรับการหาค่าพิกัดพลาสติก (plastic limit) ให้เพิ่มน้ำหนักกรวย เป็น 240 g และทำเหมือนขั้นตอนของ Wood and Wroth (1978) จะได้ค่า plasticity index (PI) ซึ่งนำไปหาค่า liquidity index (LI) (ASTM D4318-17, 2017) ดังสมการ (1)

$$LI = \frac{w - PL}{PI} \quad (1)$$

โดย w คือ ความชื้นของตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบ หน่วย %, PL คือ พิกัดพลาสติก (plastic limit) หน่วย % และ PI คือ ดัชนีสภาพพลาสติก (Plasticity index) มีค่าเท่ากับ $LL - PL$ หน่วย %

2.4 วิธีการหาค่าความเค้นเฉือน

เริ่มจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบเซนเซอร์ชนิด LVDT ที่ส่วนบนของเครื่องทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ DAQ ที่ส่งสัญญาณต่อไปยังคอมพิวเตอร์แบบพกพา ตาม Figure 1 จากนั้นนำดินที่ผ่านการร่อนแล้วมาทำการทดสอบเหมือนกับวิธีการหาค่า liquid limit โดยใช้น้ำหนักของกรวยเริ่มต้นที่รวมกับน้ำหนักแกนเพลลาของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบเซนเซอร์ LVDT เท่ากับ 119 g ต่อจากนั้น ทำการทดสอบโดยการเพิ่มน้ำหนักของกรวยอีก 80 g และ 160 g ตามลำดับ โดยทำการทดลองให้ค่าความชื้นของดินต่างกัน 4 ระดับความชื้น เขียนโปรแกรมที่ใช้สำหรับการอ่านค่าประมวลผลสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม LabView ได้ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง (final depth of penetration, h) โดย Hansbo (1957) อ้างถึงใน Mahajan and Budhu (2008) ได้นำเสนอวิธีการหาค่าความเค้นเฉือน (shear stress) ที่มีความสัมพันธ์กับระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ดังสมการ (2)

$$\tau_{cs} = \frac{KW}{h_f^2} \quad (2)$$

โดย τ_{cs} คือ ค่าความเค้นเฉือนของดินที่สภาวะวิกฤตหรือสภาวะที่ดินไม่ระบายน้ำ (undrained) ซึ่งเหมือนกับค่าความเค้นครากของของไหล (yield stress, τ_y) มีหน่วย kPa, W คือ น้ำหนักของกรวย หน่วย N และ K คือ ค่าคงที่ของกรวยที่มีผิวเรียบ โดยใช้ค่าคงที่ของ Koumoto and Houlsby (2001) ที่นำเสนอไว้ มีค่าเท่ากับ 2.00 ส่วนการหาค่าระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ ทำได้โดยการหาความเร็วของกรวยที่จมลง ในดินที่เป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น คำนวณหาความเร็วของกรวยได้จากค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่งต่อเวลาที่ใช้ในการ

เคลื่อนที่ของกรวยที่จมลงที่ดิน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่ค่าความเร็วสูงสุดในกราฟ ลากเส้นตรงลงมา ได้ค่าระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ (dynamic equilibrium depth, h_{eq}) หาค่าความเค้นเฉือนของดินจากการประยุกต์ใช้กฎข้อที่ 2 ของนิวตันกับการตกของกรวยที่จมลงที่ดิน ทำให้เกิดระยะจมของกรวย (penetration depth, h) และดินยกตัวออกรอบๆ ข้างของกรวย แสดงดัง Figure 2 และได้ตามสมการ (3)

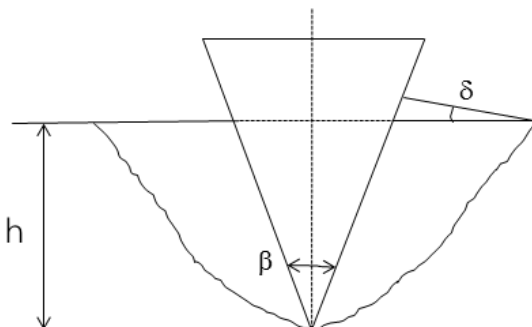


Figure 2 Schematic diagram of fall cone test (Adapted from Koumoto and Houlsby, 2001.)

$$mg - F \sin \theta = ma \quad (3)$$

เมื่อเกิดสภาวะสมดุลทางพลศาสตร์ ทำให้ความเร่งเท่ากับ ศูนย์ ($a = 0$) ได้สมการ (4)

$$mg = F \sin \theta_{eq} \quad (4)$$

ดังนั้น ความเค้นเฉือนหาได้จากสมการ (5)

$$\tau = \frac{mg}{F \sin \theta_{eq}} \quad (5)$$

โดย τ คือ ความเค้นเฉือนของดิน หน่วย kPa, m คือ มวลของกรวย หน่วย kg, g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หน่วย m/s^2 และ F คือ ค่าคงที่ของความต้านทานความหนืดของกรวย ไม่มีหน่วย หาได้จากสมการ (6)

$$F = \pi N_{ch} \tan^2(\theta) \quad (6)$$

N_{ch} คือ ค่าความสามารถในการรับรองของกรวย (bearing capacity of the cone) ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 4.992 (Koumoto and Houlsby, 2001), θ คือ มุมที่มีค่าครึ่งหนึ่งของมุมกรวย หรือ $\beta/2$ หน่วย ° และหาอัตราส่วนความเครียดเฉือน (shear strain rate) ได้จากวิธีการของ Koumoto and Houlsby (2001) ดังสมการ (7).

$$\dot{\gamma} = \frac{2\delta}{2.44} \sqrt{\frac{g\sqrt{3}}{hf}} \quad (7)$$

โดย $\dot{\gamma}$ คือ อัตราส่วนความเครียดเฉือน หน่วย s^{-1} , δ คือ มุมเอียงที่ผิวดินยกตัวขึ้นจากการตกของกรวยที่มีมุม 30° ผิวเรียบ (Koumoto and Houlsby, 2001) หน่วย rad

2.5 วิธีการหาค่าความหนืดเฉือน

เริ่มจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแบบเซนเซอร์ชนิด LVDT ที่ส่วนบนของเครื่องทดสอบการทะลุทะลวงด้วยกรวย และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ DAQ ที่ส่งสัญญาณต่อไปยังคอมพิวเตอร์แบบพกพา ตาม Figure 1 จากนั้น นำดินที่ผ่านการร่อนแล้วมาทำการทดสอบเหมือนกับวิธีการหาค่าขีดจำกัดเหลว (liquid limit) โดยใช้น้ำหนักของกรวยเริ่มต้น และเพิ่มน้ำหนักของกรวยอีก 80 g และ 160 g ตามลำดับ โดยทำการทดลองให้ค่าความชื้นของดินต่างกัน 4 ระดับความชื้น เขียนโปรแกรมสำหรับใช้ในการอ่านค่าประมวลผลสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม LabView จะได้ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง (final depth of penetration)

จากนั้นหาค่าระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ โดยการหาความเร็วของกรวยที่จมลงในดิน เป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น คำนวณหาความเร็วของกรวยได้จากค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่งต่อเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของกรวยที่จมลงในดิน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่ค่าความเร็วสูงสุดในกราฟลากเส้นตรงลงมา ได้ค่าระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ (dynamic equilibrium depth) และการไหลของดิน มีคุณสมบัติ Non-Newtonian ที่มีพฤติกรรมของของไหลแบบ Bringham plastic fluids กล่าวคือ พฤติกรรมเหมือนของแข็งในระยะเริ่มต้น เมื่อถูกความเค้นเฉือนมากกระทำจนกระทั่งถึงจุดคราก (yield point) จะเปลี่ยนเป็นคุณสมบัติเหมือนของไหล Newtonian งานวิจัยในครั้งนี้ ใช้แบบจำลองของไหล Casson (Casson fluid model) ที่ได้พัฒนามาจาก Bringham plastic model สามารถอธิบายพฤติกรรมของของไหลแบบ Non-Newtonian ที่เหมาะกับวัสดุชีวภาพ (biological materials) (Chhabra and Richardson, 2008) ดังสมการ (8)

$$\tau^{0.5} = \tau_y^{0.5} + (\mu\dot{\gamma})^{0.5} \quad (8)$$

จากความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือน ความเค้นคราก และอัตราส่วนความเครียดเฉือน หาค่าความหนืดเฉือนของดินได้ตามสมการ (9)

$$\mu = 2.17KW\sqrt{hf}\left(\frac{0.67}{h_{eq}} - \frac{1}{hf}\right)^2 \quad (9)$$

โดย μ คือ ความหนืดเฉือนของดิน หน่วย Pa s, W คือ น้ำหนักของกรวย หน่วย N, h_f คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง หน่วย mm และ h_{eq} คือ ระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ หน่วย mm ส่วนค่า 0.67 และ 2.17 คือค่าคงที่ ที่ได้จากการแทนค่าต่างๆ จากสมการ (2), (5), (6) และ (7) ลงในสมการ (8)

3 ผลและวิจารณ์

ผลการจำแนกดิน พบว่า ดินในแปลงเกษตรเป็นดินชนิดดินร่วนปนทราย (sandy loam) เนื้อดินประกอบด้วยอนุภาคดินทราย (sand) 63.84% อนุภาคดินตะกอน (silt) 21.50% และอนุภาคดินเหนียว (clay) 14.66% ซึ่งมีพิกัดพลาสติก (plastic limit) เท่ากับ 9.50% และขีดจำกัดเหลว (liquid limit) เท่ากับ 24.10% ที่ระดับความลึกดิน 40 cm ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้งของดินเฉลี่ย เท่ากับ 1.45 g cm^{-3} ความชื้นของดิน เท่ากับ 13.62% (d.b.) ความต้านทานการแทงทะลุดิน (cone penetration resistance) เท่ากับ 2.0 MPa

ผลการทดลองวัดค่าระยะจมของกรวยในดินที่มีความชื้นต่างๆ กัน และน้ำหนักของกรวยต่างๆ กัน พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของกรวยที่จมลงในดินเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นแบบโพลีโนเมียลอันดับ 5 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mahajan and Budhu (2008) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9995 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.0096 ซึ่งสมการแนวโน้มนี้ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าจริงหรือค่าที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ และหลังจากนั้นกรวยหยุดนิ่งในเวลาใดๆ ตาม Figure 3

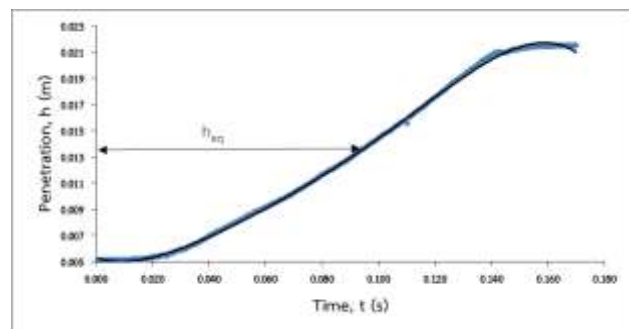


Figure 3 Penetration – time relationship of the cone (test C1).

ผลการหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยเทียบกับระยะจมของกรวย พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความเร็วสูงสุด และลดลงตามระยะจมของกรวยที่เพิ่มขึ้น ได้กราฟเป็นเส้นโค้งแนวโน้มแบบโพลีโนเมียล และที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยสูงสุด พบว่า ระยะจมของกรวยเป็นระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ (dynamic equilibrium depth, h_{eq}) ตาม Figure 4

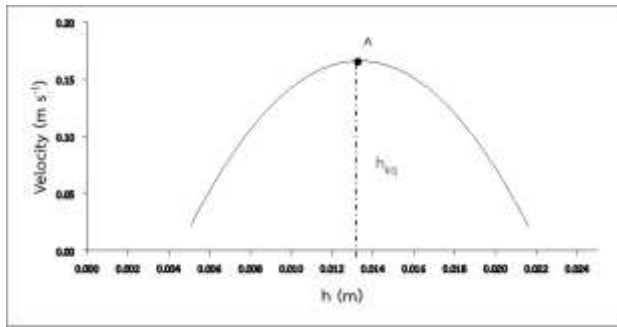


Figure 4 Velocity of the cone (test C1).

ผลการทดลองหาค่าความเค้นเฉือนของดิน พบว่า เมื่อความชื้นของดินเพิ่มสูงขึ้น ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่งเพิ่มขึ้น และระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อใช้น้ำหนักของกรวยที่แตกต่างกัน 3 ค่า ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง และค่าความเค้นเฉือนที่ได้แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองตาม Table 1-3 เมื่อนำค่าความเค้นเฉือนกับค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ พบว่า ความเค้นเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในขณะที่ค่าระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mahajan and Budhu (2008) ได้กราฟตาม Figure 5 และได้สมการจากการทดลอง 3 สมการที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของกรวยต่างๆ กัน ดังสมการ (10), (11) และ (12)

$$\tau_{119} = 71.97e^{-0.116hf} \quad (10)$$

โดย τ_{119} คือ ความเค้นเฉือนของดิน หน่วย kPa และ h_f คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่มีน้ำหนักของกรวย 119 g หน่วย mm มีค่า R2 เท่ากับ 0.9848 และค่า RMSE เท่ากับ 0.0397.

$$\tau_{199} = 72.019e^{-0.093hf} \quad (11)$$

โดย τ_{199} คือ ความเค้นเฉือนของดิน หน่วย kPa และ h_f คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่มีน้ำหนักของกรวย 199 g หน่วย mm มีค่า R2 เท่ากับ 0.9999 และค่า RMSE เท่ากับ 0.0316.

$$\tau_{279} = 292.66e^{-0.137hf} \quad (12)$$

โดย τ_{279} คือ ความเค้นเฉือนของดิน หน่วย kPa และ h_f คือ ระยะจมของกรวยที่หยุดนิ่ง ที่มีน้ำหนักของกรวย 279 g หน่วย mm มีค่า R2 เท่ากับ 0.9561 และค่า RMSE เท่ากับ 0.4099.

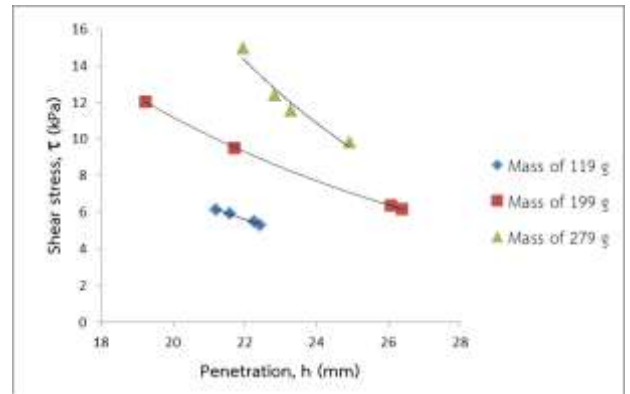


Figure 5 Shear stress – penetration relationship for agricultural soils (sandy loam) used in this study.

เมื่อหาค่าพลังงานศักย์และค่าพลังงานจลน์ พบว่า พลังงานศักย์มีค่าลดลงเมื่อระยะจมของกรวยเพิ่มขึ้นในลักษณะแบบเส้นตรง ส่วนพลังงานจลน์มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ตำแหน่งระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์และลดลงมาในลักษณะแบบเส้นโค้ง ทำให้พลังงานรวมที่ได้มีเส้นกราฟ ตาม Figure 6 และที่ตำแหน่ง A ใน Figure 6 เป็นตำแหน่งพลังงานรวม ณ ระยะจมของกรวยที่สมดุลทางพลศาสตร์

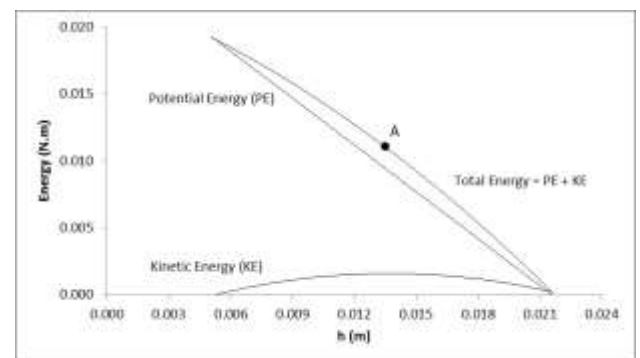


Figure 6 Total energy of the cone penetration depth (test C1).

ผลการทดลองหาค่าความหนืดเฉือนของดิน พบว่า เมื่อใช้น้ำหนักของกรวยที่แตกต่างกัน 3 ค่า ค่าความชื้นของดินที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 18.25% ถึง 23.35% (d.b.) และค่าดัชนีสภาพเหลว (liquidity index) ที่ได้แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองตาม Table 1-3 เมื่อนำค่าความหนืดเฉือนกับค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index) มาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ พบว่า ค่าความหนืดเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในขณะที่ค่าดัชนีสภาพความเหลว (liquidity index) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mahajan and Budhu (2008) ได้กราฟตาม Figure 7 และได้สมการจากการทดลอง ดังสมการ (13) และสมการ (13) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าความหนืดเฉือนที่ความชื้นของดินตามสภาพจริงได้ หรือใช้กับค่า LI น้อยกว่า 1 ได้เช่นกัน

$$\mu = 9,204.5e^{-7.89LI} \quad (13)$$

โดย μ คือ ความหนืดเฉือนของดิน หน่วย Pa s และ LI คือ ดัชนีสภาพความเหลว (Liquidity index) ไม่มีหน่วย มีค่า R2 เท่ากับ 0.9643 และค่า RMSE เท่ากับ 1.8662.

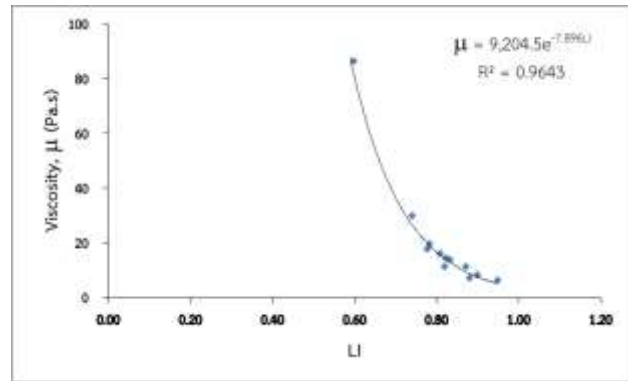


Figure 7 Shear viscosities – liquidity index relationship for agricultural soils (sandy loam) used in this study.

Table 1 Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 119 g).

Test	Water content (%)	h_f (mm)	h_{eq} (mm)	τ_y (kPa)	τ (kPa)	$\dot{\gamma}$ s^{-1}	LI	μ (Pa s)
C1	21.65	21.59	13.25	5.01	5.91	3.13	0.83	13.44
C2	22.22	22.27	13.75	4.71	5.48	3.08	0.87	11.06
C3	21.54	21.19	13.00	5.20	6.13	3.16	0.82	13.93
C4	22.63	22.42	14.00	4.64	5.29	3.07	0.90	8.03

Table 2 Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 199 g).

Test	Water content (%)	h_f (mm)	h_{eq} (mm)	τ_y (kPa)	τ (kPa)	$\dot{\gamma}$ s^{-1}	LI	μ (Pa s)
80C1	21.30	21.70	13.50	8.29	9.51	3.12	0.81	15.70
80C2	23.35	26.37	16.75	5.61	6.18	2.83	0.95	5.94
80C3	20.86	19.24	12.00	10.55	12.04	3.32	0.78	17.49
80C4	22.37	26.07	16.50	5.74	6.37	2.85	0.88	6.91

Table 3 Test data estimated shear stress and shear viscosities (total mass of 279 g).

Test	Water content (%)	h_f (mm)	h_{eq} (mm)	τ_y (kPa)	τ (kPa)	$\dot{\gamma}$ s^{-1}	LI	μ (Pa s)
160C1	18.25	21.95	12.75	11.36	14.95	3.10	0.60	86.01
160C2	20.31	22.83	14.00	10.50	12.40	3.04	0.74	29.51
160C3	21.48	24.92	15.75	8.81	9.80	2.91	0.82	10.90
160C4	20.94	23.29	14.50	10.09	11.56	3.01	0.78	19.38

4 สรุป

วิธีการทะลุทะลวงของกรวยสามารถใช้หาค่าความเค้นเฉือนของดินและค่าความหนืดเฉือนของดินในแปลงเกษตรได้ โดยเฉพาะดินที่มีทรายปน โดยค่าความเค้นเฉือนของดินมีแนวโน้มลดลงตามระยะการจมของกรวยที่เพิ่มขึ้น และแปรผันตามน้ำหนักของกรวย ส่วนความหนืดเฉือนของดินจะลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้งที่มีค่าลดลงแบบเอกซิโพเนนเชียล เมื่อเทียบ

กับค่าดัชนีสภาพความเหลวที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ค่าความเค้นเฉือนของดินในแปลงเกษตรจึงขึ้นอยู่กับน้ำหนักของกรวย และระยะจมของกรวยที่มีผลมาจากความชื้นของดิน ส่วนค่าความหนืดเฉือนของดินขึ้นอยู่กับความชื้นของดิน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าความหนืดเฉือนที่ความชื้นของดินตามสภาพจริงได้ และใช้ได้กับค่าดัชนีสภาพความเหลว (LI) น้อยกว่า 1 เช่นกัน

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์คธา วาทกิจ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำการใช้โปรแกรม LabView และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- ASTM D4318-17. 2017. The methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. Annual book of American Standard Testing Methods. Philadelphia, PA. ASTM International.
- BS 1377-2. 1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2: classification tests. London: British Standards Institution (BSI).
- Chhabra, R.P., Richardson, J.F. 2008. Non-newtonian flow and applied rheology: engineering applications. (2nd ed.). Hungary: Butterworth-Heinemann.
- Keedwell, M.J. 1984. Rheology and soil mechanics. New York. ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHERS.
- Koumoto, T., Houlsby, G.T. 2001. Theory and practice of the fall cone test. Geotechnique 51(8), 701-712.
- Mahajan, S.P., Budhu, M. 2008. Shear viscosity of clays to compute viscous resistance. Proceedings of the Twelfth International Working Conference on International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). 1516-1523. 1-6 October 2008, Goa, India.
- Stone, K.J.L., Phan, K.D. 1995. Cone penetration test near the plastic limit. Geotechnique 45(1), 155-158.
- Wood, D.M., Worth, C.P. 1978. The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils. Ground Engng 11(3), 37.