

# เสถียรภาพเม็ดดิน: การเกิด การพังทลาย และการประเมิน Soil Aggregate Stability: Formation, Breakdown and Assessment

สุรเชษฐ์ อรามรักษ์<sup>1\*</sup>  
Surachet Aramrak<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

<sup>1</sup> Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand

รับเรื่อง: พฤศจิกายน 2559

Received: November 2016

รับตีพิมพ์: มกราคม 2560

Accepted: January 2017

\* Corresponding author: agrscar@ku.ac.th

**ABSTRACT:** Soil aggregate stability (SAS) is an indicator for the strength and cohesiveness of soil aggregates and is widely used in determining soil structural properties and erosion risk. In essence, the higher the aggregate stability, the higher the structural stability. SAS plays a key role in maintaining soil resources for sustainable agriculture. SAS establishes pore size, as well as continuity for mass and energy exchange between soil and the environment, affecting the retention and transport of soil fluids (e.g., air and water), including essential organic and inorganic substances for crop production. Therefore, SAS impacts on agriculture, engineering, and the environment has recently made it an important soil parameter for evaluating soil quality. This article aims to understand and expand on the formation, breakdown and existing assessment of SAS, thereby leading the way of research approach to improve aggregate stability of Thai soils.

**Keywords:** Soil aggregate stability, soil aggregate, soil structure, soil aggregate breakdown, soil

Agricultural Sci. J. (2017) Vol. 48(1): 1–10

ว. วิทย. กษ. (2560) 48(1): 1–10

## บทคัดย่อ

เสถียรภาพเม็ดดิน (soil aggregate stability) เป็นตัวชี้บ่งถึงความคงทนและการเกาะยึดของเม็ดดิน มักใช้เป็นดัชนีประเมินสมบัติเชิงโครงสร้างดิน (soil structure) และความเสี่ยงของการกร่อนดิน (soil erosion) หากเสถียรภาพเม็ดดินมีค่าสูงโครงสร้างดินจะมีเสถียรภาพสูงด้วย เสถียรภาพเม็ดดินมีความสำคัญต่อการบำรุงรักษาทรัพยากรดินเพื่อการเกษตรที่ยั่งยืน เนื่องจากเป็นสิ่งที่กำหนดขนาดและความต่อเนื่องของช่องทางสำหรับการแลกเปลี่ยนมวลและพลังงานระหว่างดินและสิ่งแวดล้อม ส่งผลต่อการเก็บกักและส่ง

ผ่านของไหลในดิน (เช่น อากาศ และน้ำ) รวมถึงสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่จำเป็นต่อการผลิตพืช เสถียรภาพเม็ดดินจึงมีบทบาททั้งในด้านการเกษตร ชลประทาน วิศวกรรม และสิ่งแวดล้อม จัดเป็นหนึ่งในเกณฑ์ทางดินที่สำคัญต่อการประเมินคุณภาพดิน (soil quality) บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อความเข้าใจเชิงลึกเรื่องเสถียรภาพเม็ดดินทั้งในด้านการเกิด การพังทลาย (breakdown) และวิธีการประเมินในปัจจุบัน ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการวิจัยเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพเม็ดดินของประเทศไทยต่อไป

**คำสำคัญ:** เสถียรภาพเม็ดดิน, เม็ดดิน, โครงสร้างดิน การพังทลายของเม็ดดิน, ดิน

## บทนำ

โครงสร้างดินเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ของดินที่มีบทบาทสำคัญต่อการรักษาระดับผลผลิตพืชและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Amézqueta, 1999) หน่วยย่อยโครงสร้างดินคือ เม็ดดิน (soil aggregate) โดยทั่วไปนักปฐพีวิทยาใช้เสถียรภาพเม็ดดิน (soil aggregate stability) เป็นดัชนีประเมินโครงสร้างดิน (Bronick and Lal, 2005) เนื่องจากเป็นค่าที่บอกถึงระดับความคงทนในการเกาะยึดของอนุภาคดิน ซึ่งส่งผลต่อขนาดและความต่อเนื่องของช่องในดิน จึงเป็นสิ่งกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่และเก็บกักของน้ำ การระบายอากาศ การหมุนเวียนธาตุอาหาร การกร่อนดิน ซึ่งสำคัญต่อการเติบโตของพืช เสถียรภาพเม็ดดินมีอิทธิพลอย่างกว้างขวางต่อกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ซึ่งเกิดขึ้นในดินทั้งในระบบนิเวศตามธรรมชาติและระบบนิเวศเกษตร จึงถูกนำมาใช้เป็นดัชนีทำนายพฤติกรรมของดินด้านต่าง ๆ อาทิ การเสื่อมโทรมและการสูญเสียดิน (Igwe *et al.*, 1995) คุณภาพดิน (Herrick *et al.*, 2001) การกร่อนดินและการเกิดแผ่นแข็งที่ผิวดิน (Ding and Zhang, 2016) ความเสี่ยงการไหลบ่าควบคู่การกร่อนดิน (Barthes and Roose, 2002) รูปแบบการจัดการดินที่เหมาะสม (Williams and Petticrew, 2009) ความสัมพันธ์ของรากพืชและไมคอร์ไรซาร์ (Graf and Frei, 2013) และการเก็บกักคาร์บอนในดิน (Wen *et al.*, 2016) เป็นต้น การทราบถึงกลไกที่ทำให้เม็ดดินมีเสถียรภาพหรือถูกทำลาย รวมถึงวิธีการประเมิน มีความสำคัญต่อการหาแนวทางเสริมสร้างและการป้องกันการสูญเสียเสถียรภาพเม็ดดิน เพื่อการรักษาสภาพดิน (soil productivity) ร่วมกับคุณภาพสิ่งแวดล้อมต่อไป

### กลไกการเกิดเม็ดดินและเสถียรภาพเม็ดดิน

เม็ดดินเกิดขึ้นจากการเกาะกลุ่มของอนุภาคดิน และแยกตัวออกจากเม็ดดินข้างเคียง Figure 1 แสดง

กระบวนการหลักสองประการคือ 1) การเกาะกลุ่มตกตะกอน (flocculation) ของอนุภาคดินเหนียว ซึ่งอาศัยแรงทางฟิสิกส์ จัดเป็นกระบวนการสร้าง (formation) และ 2) การเชื่อมยึดกัน (cementation) ระหว่างอนุภาคขนาดดินเหนียว ทรายแป้ง และทราย โดยมีสารเชื่อม (cementing agent) ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ จัดเป็นกระบวนการทำให้เม็ดดินมีเสถียรภาพ (stabilization) (Amézqueta, 1999) จากกระบวนการทั้งสองทำให้แบ่งขนาดการเกาะกลุ่มของอนุภาคดินได้สามระดับตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 1) ระดับอนุภาคดินเหนียว (clay level) (< 2 ไมโครเมตร) 2) ระดับเม็ดดินขนาดเล็ก (micro-aggregate level) (2–250 ไมโครเมตร) และ 3) ระดับเม็ดดินขนาดใหญ่ (macro-aggregate level) (>250 ไมโครเมตร) (Tisdall and Oades, 1982) การสร้างเม็ดดินต้องผ่านกระบวนการเกาะกลุ่มตกตะกอนของอนุภาคดินเหนียวซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ต้องมีมาก่อน (prerequisite) กระบวนการเชื่อมยึดกันจึงเกิดตามมา เมื่อกระบวนการเกาะกลุ่มตกตะกอนถูกทำลาย การเชื่อมยึดกันภายในเม็ดดินและระหว่างเม็ดดินก็จะถูกทำลายตามไปด้วย (Dexter, 1988)

ระดับเสถียรภาพเม็ดดินขึ้นกับปัจจัยหลักคือ 1) ปัจจัยภายใน (internal factors) ได้แก่ อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) อัตราส่วนการดูดซับโซเดียม (sodium adsorption ratio: SAR) พีเอช (pH) ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียว แคลเซียมคาร์บอเนต อินทรีย์วัตถุ เหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์ 2) ปัจจัยภายนอก (external factors) ได้แก่ ภูมิอากาศ เวลา ปัจจัยทางชีวภาพ และกิจกรรมทางการเกษตร (Amézqueta, 1999) ทั้งนี้อิเล็กโทรไลต์ พีเอช และอัตราส่วนการดูดซับโซเดียม เป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมการฟุ้งกระจายและการเกาะยึดกันของอนุภาคดินเหนียว (Amézqueta and Aragüés, 1995) สำหรับอิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญต่อเสถียรภาพเม็ดดินทั้งในระดับเม็ดดินขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (Levy and Torrento, 1995; Holthusen *et al.*, 2010)

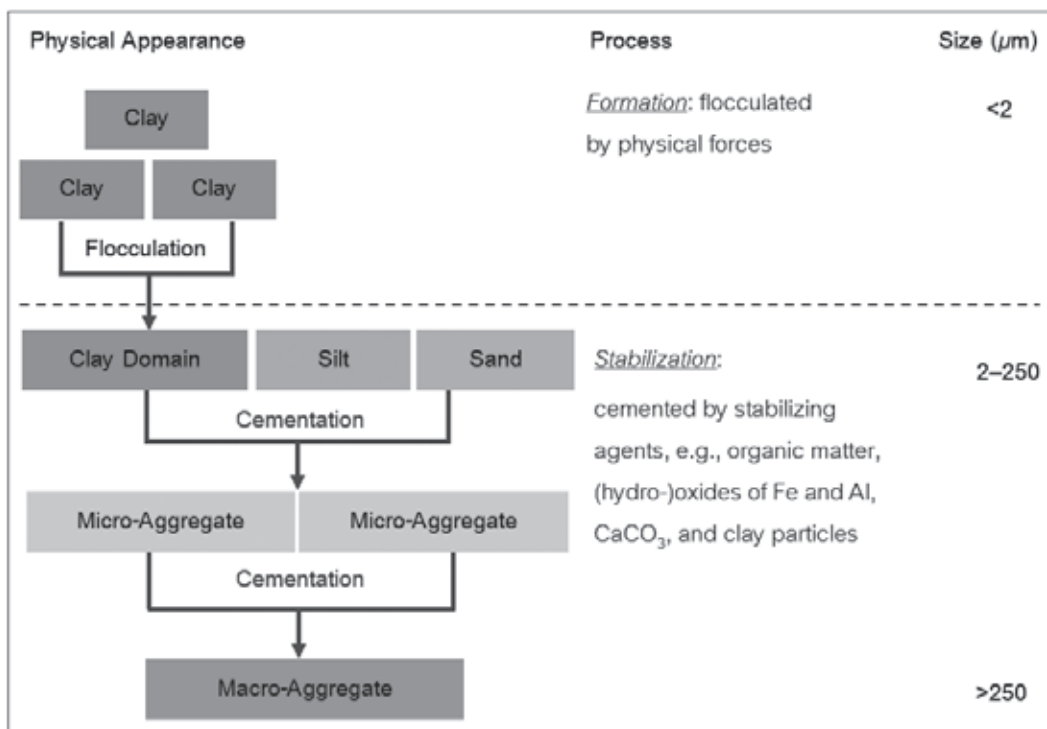


Figure 1 Schematic of soil aggregate formation and stabilization (after Tisdall and Oades, 1982)

### กลไกการพังทลายของเม็ดดิน

กลไกที่สำคัญต่อการพังทลายของเม็ดดินมีสี่ประการหลัก (Le Bissonais, 2016) ดังนี้ 1) *slaking* คือ การตีตัวของมวลอากาศที่ถูกบีบอัดภายในเม็ดดินแห่งขณะเปียกน้ำฉับพลัน ส่งผลให้เม็ดดินขนาดใหญ่แตกออกเป็นเม็ดดินขนาดเล็ก (Yoda, 1936) การพังทลายโดยกลไกนี้จะลดลงเมื่อดินมีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวอยู่ในพิสัย 100–300 กรัมต่อกิโลกรัม (Truman *et al.*, 1990) 2) *differential swelling* คือ การยืดขยายตัวของอนุภาคดินเหนียวภายในเม็ดดิน ส่งผลให้เม็ดดินขนาดใหญ่แตกออกเป็นเม็ดดินขนาดเล็ก แต่การพังทลายโดยกลไกนี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวที่ยึดเหนี่ยวได้เพิ่มขึ้น (Le Bissonais, 2016) 3) *raindrop impact* คือ ผลกระทบจากเม็ดฝนทำให้เกิดการพังทลายของเม็ดดิน (Bradford and Huang, 1992) ความรุนแรงเพิ่มขึ้นเมื่อผิวดินขาดสิ่งปกคลุม แรงปะทะของเม็ดฝน

จะทำให้เม็ดดินขนาดใหญ่แตกออกเป็นเม็ดดินขนาดเล็กหรือจนกลายเป็นอนุภาคเดี่ยว และ 4) *electro-chemical dispersion* คือ การกระจายเชิงเคมีไฟฟ้าที่เกิดจากความเครียดออสโมติก (osmotic stress) ภายในเม็ดดิน โดยเมื่อเม็ดดินเปียกน้ำจะเกิดการผลักกันของชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้น (electrical double layer) ที่อยู่รอบอนุภาคดินเหนียวแต่ละอนุภาค ก่อให้เกิดการพังทลายของเม็ดดินเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ (Shainberg, 1992) จัดเป็นกลไกที่มีอิทธิพลสูงต่อการพังทลายของเม็ดดิน

การพังทลายโดยกลไกทั้งสี่เกี่ยวข้องกับแรงทั้งจากภายในและภายนอกเม็ดดินที่กระทำต่ออนุภาคดิน การพิจารณาแรงที่เกี่ยวข้องดังกล่าวจึงสามารถอธิบายกลไกเชิงเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบกลไกหลักในการควบคุมการพังทลายของเม็ดดินได้ โดยทฤษฎีที่ใช้ทำนายการดูดหรือการผลักของอนุภาคดินภายในเม็ดดินคือ ทฤษฎี Derjaguin–Landau–Verwey–

Overbeek (DLVO) (Adamczyk and Weronki, 1999) ซึ่งอธิบายแรง (อาจแสดงในรูปของพลังงาน หรือ ความดัน) ในรูปฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างอนุภาค ดินสองอนุภาค (separation distance,  $h$ ) (Figure 2) ดังสมการต่อไปนี้

$$F_{DLVO}(h) = F_{EDL}(h) + F_{vdW}(h) \quad (1)$$

แรง DLVO ( $F_{DLVO}$ ) ประกอบด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งเกิดจากการผลักกันของชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้น (electrical double layer,  $F_{EDL}$ ) และแรงแวนเดอร์

วาลส์ (van der Waals force,  $F_{vdW}$ ) ซึ่งจัดเป็นแรงที่เหนี่ยวนำให้เกิดการเกาะกัน (attraction) ระหว่างอนุภาคดิน (Holthusen *et al.*, 2010) ผลรวมแรงทั้งสองมีผลลัพธ์เป็นแรง DLVO ซึ่งมีผลเป็นการผลักระหว่างอนุภาคดินเนื่องจากอิทธิพลของความหนาของชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้น (EDL thickness) ที่มาก (Figure 2a) หรือผลลัพธ์เป็นการดูดกันระหว่างอนุภาคดินเนื่องจากอิทธิพลของแรงแวนเดอร์วาลส์ ในกรณีซึ่งประจุไฟฟ้าสองชั้นมีความหนาที่น้อย จะส่งผลให้แรงผลักระหว่างอนุภาคดินเหนียวลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทาง (Figure 2b)

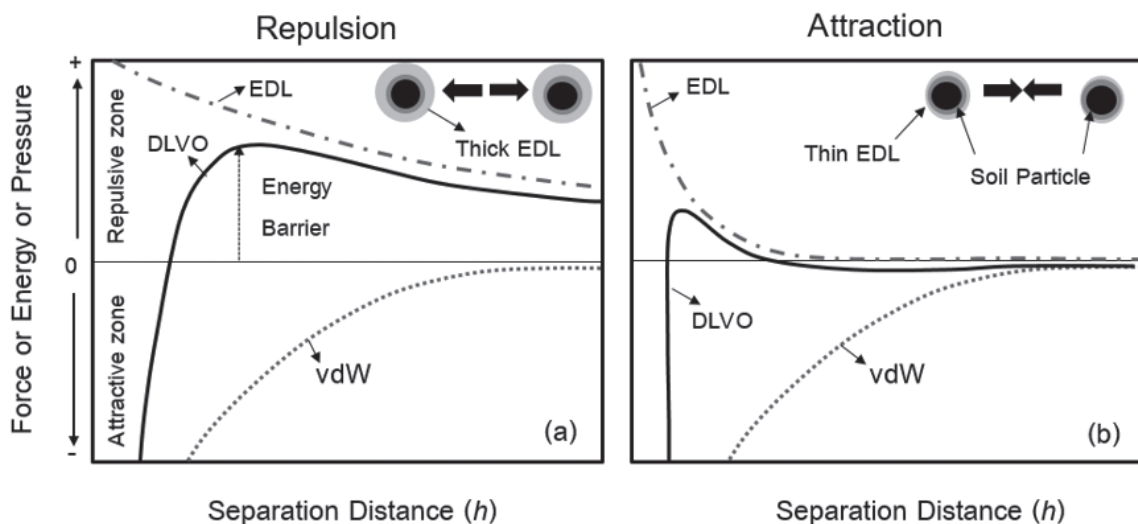


Figure 2 Schematic of DLVO profiles for particle repulsion (a) and particle attraction (b)

เมื่อพิจารณาแรงปะทะของเม็ดฝนที่กระแทกเม็ดดินมีผลโดยตรงต่อการทำลายเม็ดดิน คิดเป็นหน่วยความดันเท่ากับ 1-3 บรรยากาศ (Nearing *et al.*, 1987) ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับความดันที่ทำให้อนุภาคดินเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,000 บรรยากาศ แสดงให้เห็นว่าแรงปะทะของเม็ดฝนหรือแรงจากภายนอกอื่นๆ มีผลต่อการพังทลายของเม็ดดินน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่มาจากภายในเม็ดดิน และหากพิจารณา

ที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคสองอนุภาคเท่ากับ 0.1 นาโนเมตร จะพบว่าความดันที่ทำให้อนุภาคดินเกาะกันมีค่าสูงเท่ากับ 20,000 บรรยากาศ (Li *et al.*, 2009) ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากจนอาจกล่าวได้ว่าการเกาะกันของอนุภาคดินเป็นเม็ดดินมีความคงทนตลอดหรือเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ (irreversible process) ซึ่งในความเป็นจริงเม็ดดินยังคงมีการพังทลายจนกลายเป็นอนุภาคเดี่ยวได้ จึงน่าจะมีแรงผลักรั้งนอกจากแรงไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดจากการผลักกันของ

ชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้นของแต่ละอนุภาคดิน ซึ่งต่อมามีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมพบว่าที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคดินเท่ากับ 1.5–2.0 นาโนเมตร การพังทลายของเม็ดดินที่อนุภาคดินภายในมีการเกาะกันด้วยแรงดูดยึดที่สูงมาก สามารถอธิบายได้ด้วยแรงไฮเดรชัน (hydration force) ซึ่งเป็นแรงผลักรันเกิดจากการซ้อนเหลื่อม (overlap) ของชั้นน้ำที่ล้อมรอบผิวอนุภาคแต่ละอนุภาค จึงทำลายการเกาะกันของอนุภาคดินที่ระยะดังกล่าวได้ (Li *et al.*, 2013) แรงผลักรันที่มีบทบาทต่อการพังทลายของเม็ดดินจึงมีสองแรงหลักก็คือ แรงไฟฟ้าสถิตย์และแรงไฮเดรชัน (Hu *et al.*, 2015)

### การประเมินเสถียรภาพเม็ดดิน

แนวทางในการประเมินเสถียรภาพเม็ดดินขึ้นกับความแตกต่างของระดับการเกาะกลุ่มอนุภาคดิน โดยทั่วไปแบ่งการประเมินเป็น 2 ระดับคือ 1) การประเมินเสถียรภาพเม็ดดินขนาดใหญ่หรืออาจเรียกว่า การทดสอบเสถียรภาพเม็ดดิน (soil aggregate stability test) และ 2) การประเมินเสถียรภาพเม็ดดินขนาดเล็ก ซึ่งพิจารณาการเกาะกลุ่มที่มีขนาดตั้งแต่อนุภาคดินเหนียวจนถึงเม็ดดินขนาดเล็ก มักทดสอบการกระจายของอนุภาคดินเหนียว (clay dispersion test) (Table 1) การศึกษาเรื่องเสถียรภาพของเม็ดดินจำเป็นต้องประเมินทั้งสองระดับ (Kay and Dexter, 1990) และอาจประเมินจากเสถียรภาพเม็ดดินหรือการแจกกระจายขนาดเม็ดดิน (aggregate size distribution) (Amézqueta, 1999)

การแจกกระจายขนาดเม็ดดินทำได้โดยการร่อนเม็ดดินผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ ทั้งในสภาวะแห้งและในสภาวะที่เม็ดดินแช่ในน้ำ โดยการแจกกระจายขนาดเม็ดดินแห้งสามารถใช้บ่งชี้อิทธิพลของการไถพรวนขณะดินแห้งและการร่อนดินโดยลม Kemper and Chepil (1965) เริ่มพัฒนาวิธีวิเคราะห์การแจกกระจายขนาดเม็ดดินแห้ง ซึ่งต่อมามีการอาศัยเทคนิคเชิงกลเพื่อแยกขนาดเม็ดดินแห้งอย่างต่อเนื่อง

(Kemper and Rosenau, 1986) และได้มีการศึกษาเพิ่มเติมจนพบว่าเม็ดดินแห้งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเล็กกว่า 0.84 มิลลิเมตร จะมีความเสี่ยงต่อการร่อนดินโดยลม (Campbell *et al.*, 1993)

สำหรับการประเมินขนาดเม็ดดินในน้ำนับเป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมสูง โดยเม็ดดินที่คงค้างบนตะแกรงร่อนหลายขนาดเรียงซ้อนกันจะสะท้อนให้เห็นระดับเสถียรภาพเม็ดดิน เนื่องจากสามารถทนต่อแรงที่ทำลายโดยน้ำและแรงเฉยของตะแกรงร่อน (Jastrow and Miller, 1991) วิธีการดังกล่าวเริ่มพัฒนาโดย Yoder (1936) ซึ่งรายงานผลเป็นปริมาณดินที่คงค้างบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ต่อมา Van Bavel (1949) เสนอให้รายงานผลการแจกกระจายขนาดเม็ดดินเป็นขนาดเม็ดดินโดยเฉลี่ยที่ถ่วงด้วยน้ำหนักของเม็ดดินเอง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเม็ดดิน (mean weight diameter, MWD) ขณะที่ Mazurak (1950) เสนอให้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของเม็ดดิน (geometric mean diameter, GMD) เพราะอธิบายการแจกกระจายขนาดเม็ดดินได้ครอบคลุมมากกว่า แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ MWD ทำได้ง่ายกว่าจึงได้รับความนิยมสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ทั้ง GMD และ MWD สามารถใช้แทนกันได้ เนื่องจากค่าทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างกันสูงมาก ( $r = 0.9$ ) (Schaller and Stockinger, 1953) นอกจากนี้ยังมีการรายงานผลการแจกกระจายขนาดเม็ดดินเป็นมิติเศษส่วน (fractal dimension, FD) ซึ่งสัมพันธ์กับการแจกกระจายขนาดอนุภาคดินและการร่อนดิน (Tyler and Wheatcraft, 1992)

การศึกษาในเวลาต่อมาพบว่าการร่อนเม็ดดินในน้ำผ่านตะแกรงร่อนเพียงขนาดเดียว ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูตะแกรงเท่ากับ 250 ไมโครเมตร ที่ระยะชั้นลงของตะแกรงร่อนในแนวตั้งเท่ากับ 1.3 เซนติเมตร ความเร็ว 35 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที มีผลทำให้ค่าเสถียรภาพเม็ดดินมีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าเสถียรภาพเม็ดดินในภาคสนาม

**Table 1** Some methods proposed for analyzing soil aggregate stability and clay dispersion

Type of method	Aggregate size	Results	Abbreviation	References
<i>Soil aggregate stability</i>				
Wet sieving	3–5 mm	Retained soils on each sieve	-	Yoder (1936)
	< 8 mm	Mean weight diameter	MWD	Van Bavel (1949)
	< 8 mm	Geometric mean diameter	GMD	Mazurak (1950)
	1–2 mm	% > 250 µm	SAS (WAS)	Kemper and Rosenau (1986)
	< 10 mm	Fractal dimension	FD	Tyler and Wheatcraft (1992)
Dry sieving	< 4 mm	Mean weight diameter	MWD	Kemper and Chepil (1965)
Raindrops	Whole soil	% < 125 µm	-	Loch (1994)
Ultrasonic dispersion	4–5 mm	Dispersion rate	-	Edwards and Bremner (1967)
	4–5 mm	Inter-aggregate pore volume	-	Grieve (1980)
	0.25–2 mm	Ultrasonic energy output	-	Schomakers <i>et al.</i> (2011)
Wet and Dry sieving	< 10 mm	Aggregate stability index	ASI	Jerzy and Barbara (2003)
<i>Clay dispersion</i>				
Pipette method	< 2 mm	Clay fraction	-	Gee and Bauder (1986)
Turbidimetric method	1–2 mm	% Dispersed clay	DC	Pojasok and Kay (1990)
Light scattering method	< 2 mm	Particle size distribution	PSD	Levy <i>et al.</i> (1993)

เช่นเดียวกับแบบที่ใช้ตะแกรงร่อนหลายขนาด (Kemper and Koch, 1966) และได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวจนได้ชุดอุปกรณ์ที่เรียกว่า wet sieving apparatus ทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเม็ดดินสะดวกรวดเร็วขึ้น (Kemper and Rosenau, 1986) การเลือกใช้แบบตะแกรงร่อนขนาดเดียวจึงมีประสิทธิภาพสูง ประหยัดเวลาและแรงงาน และกลายเป็นวิธีมาตรฐาน (Amézqueta, 1999) วิธีดังกล่าวคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\%SAS = (SF / (SF + UF)) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ %SAS คือ เปอร์เซ็นต์เสถียรภาพเม็ดดิน SF คือ ส่วนเสถียร (stable fractions) ของเม็ดดินที่คงค้างบนตะแกรงขนาดรูเท่ากับ 250 ไมโครเมตร ภายหลังจาก

ที่มีการเขย่าด้วย wet sieving apparatus ขณะที่ UF คือส่วนไม่เสถียร (unstable fractions) ของเม็ดดินที่แตกออกและผ่านรูตะแกรงออกมา อนึ่งทั้งน้ำหนักของ SF และ UF คือน้ำหนักที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ สำหรับน้ำหนักของ SF จะไม่รวมน้ำหนักของส่วนที่เป็นอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และเศษอินทรีย์วัตถุ ซึ่งมีขนาดโตกว่า 250 ไมโครเมตร ซึ่งแยกออกโดยสารละลายโซเดียมเมตาฟอสเฟต ((NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>) สำหรับดินที่มีพีเอชสูงกว่า 7 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สำหรับดินที่มีพีเอชต่ำกว่า 7 หรือใช้วิธีอัลตราซอนิกส์ (ultrasonics) แทนได้ (Kemper and Rosenau, 1986)

นอกจากวิธีมาตรฐานที่กล่าวมา Loch (1994) เสนอวิธีการประเมินปริมาณเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า

125 ไมโครเมตร ภายหลังจากการใช้แรงปะทะจากเม็ดดินที่จำลองเพื่อทำให้ดินซึ่งไม่ผ่านการร่อนแยกขนาด (whole soil) เกิดการพังทลาย หากเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 125 ไมโครเมตร มีปริมาณสูงแสดงว่าแนวโน้มการเกิดช่องว่างที่มีขนาดเล็กกว่า 15 ไมโครเมตรสูงด้วย นั่นคือเม็ดดินมีเสถียรภาพต่ำ ทั้งยังมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดแผ่นแข็งที่ผิวดิน (surface crust) สูงอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการใช้อัลตราโซนิกส์ (ultrasonics) ในการประเมินอัตราการพังทลายของเม็ดดินจากการกระจายของอนุภาคดินเหนียว (Edwards and Bremner, 1967) ปริมาตรของช่องระหว่างเม็ดดิน (Grieve, 1980) และระดับพลังงานอัลตราโซนิกส์ที่สัมพันธ์กับการพังทลายของเม็ดดิน (Schomakers *et al.*, 2011) รวมถึงวิธีการที่เสนอโดย Jerzy and Barbara (2003) ซึ่งผนวกสภาวะเปียกและแห้งของเม็ดดินในการประเมินดัชนีเสถียรภาพเม็ดดิน (aggregate stability index, ASI) ร่วมกับวิธีโอนย้ายเมทริกซ์ (matrix transfer method) ระหว่างการแจกกระจายขนาดเม็ดดินที่ร่อนในน้ำและที่ร่อนในสภาพแห้ง ทำให้ ASI เป็นค่าดัชนีซึ่งเป็นผลรวมความเป็นได้ของขนาดเม็ดดินที่คงค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาดที่สามารถแสดงเสถียรภาพเม็ดดินจากค่าต่ำสุดขณะเม็ดดินเปียกน้ำจนถึงค่าสูงสุดขณะเม็ดดินแห้ง

สำหรับการทดสอบการกระจายอนุภาคขนาดดินเหนียว (clay dispersion test) โดยทั่วไปมีการแนะนำให้ตรวจสอบจากตัวอย่างดินที่ผ่านการทดสอบเสถียรภาพเม็ดดินขนาดใหญ่มาแล้ว (Pojasok and Kay, 1990) จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณอนุภาคดินเหนียวที่ฟุ้งกระจาย ภายหลังจากอนุภาคขนาดทรายและทรายแป้งตกตะกอนแล้วตามกฎของสโตกส์ ซึ่งสามารถใช้วิธีปิเปต (Gee and Bauder, 1986) หรือการวัดความขุ่น (turbidity) โดยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร สำหรับการวัดความขุ่นจำเป็นต้องทำเส้นโค้งเปรียบเทียบ (calibration curve) จากสารคอลลอยด์อนุภาคดินเหนียวที่แยกไว้ล่วงหน้าของแต่ละ

ดินที่ทำการศึกษา เพื่อสามารถชี้วัดปริมาณอนุภาคดินเหนียวที่ฟุ้งกระจาย (dispersed clay, DC) (Pojasok and Kay, 1990) นอกจากนี้ยังมีวิธีที่รวดเร็วและแม่นยำสูงโดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสง (light scattering) (Levy *et al.*, 1993) ซึ่งเป็นผลรวมของการสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) และการเลี้ยวเบน (diffraction) ของแสง เมื่อแสงตกกระทบอนุภาค ทำให้สามารถใช้หลักการนี้วิเคราะห์การแจกกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution, PSD) ซึ่งรวมถึงปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวที่สนใจด้วย ในปัจจุบันยังมีการพัฒนาวิธีการให้มีขั้นตอนย่อยจากหลายวิธีร่วมกันเพื่อก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการประเมินเสถียรภาพเม็ดดินที่มีความสัมพันธ์กับสภาพเกิดแผ่นแข็งได้ (crustability) และสภาพร่อนได้ (erodibility) ของดิน (Le Bissonnais, 2016)

## สรุป

เสถียรภาพเม็ดดินเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ดินที่มีความสำคัญต่อการเกษตรยั่งยืน เพราะสะท้อนการคงอยู่และความต่อเนื่องของช่องว่างเพื่อกักเก็บมวลสารและพลังงานของดินและการแลกเปลี่ยนระหว่างดินกับสภาพแวดล้อม แต่เนื่องจากกระบวนการเกิดและกระบวนการทำให้เม็ดดินมีเสถียรภาพมีความสลับซับซ้อนจากปัจจัยด้านฟิสิกส์เคมี และชีวภาพที่หลากหลาย ทำให้เม็ดดินในเขตร้อน โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งมีสภาพภูมิอากาศแปรปรวน ระยะเวลาของฤดูฝนและปริมาณฝนมีความแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคและระดับความสูง ทั้งยังมีการทำการเกษตรอย่างเข้มข้นเพื่อการส่งออก จึงมีแนวโน้มการสูญเสียเสถียรภาพเม็ดดินได้อย่างรวดเร็วหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม

กลไกที่ทำให้เม็ดดินถูกทำลายโดยน้ำเกิดขึ้นเมื่อเม็ดดินเปียกฉับพลัน ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ภายในเม็ดดินจึงลดลงอย่างรวดเร็ว

ชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้น (electrical double layer) มีความหนาเพิ่มขึ้น เกิดสนามไฟฟ้าสถิตย์รอบอนุภาคดิน แต่ละอนุภาคดินจึงผลักกันให้ห่างออกจากกันมากขึ้น จนกระทั่งเม็ดดินถูกทำลายลงกลายเป็นเม็ดดินขนาดเล็กหรืออนุภาคเดี่ยวกระจายตัวออกจากกัน การจัดการดินเพื่อรักษาระดับอินทรีย์วัตถุภายในเม็ดดินจึงน่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญต่อความต้านทานการพังทลายของเม็ดดิน เพราะช่วยลดการพังกระจายของอนุภาคดินเหนียว แต่แนวทางดังกล่าวอาจใช้ไม่ได้ผลกับดินที่มีปริมาณอนุภาคดินเหนียวต่ำมาก ทั้งนี้การศึกษาวิจัยเชิงลึกด้านความเสี่ยงของการพังทลายของเม็ดดินซึ่งอาจมีกลไกในการควบคุมแตกต่างกันในดินแต่ละพื้นที่ซึ่งมีปัจจัยสภาพแวดล้อมแตกต่างกันจึงเป็นสิ่งที่จะต้องทำ และเป็นสิ่งกำหนดแนวทางที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสอดคล้องกับดินนั้น

วิธีการประเมินเสถียรภาพเม็ดดินในห้วงปฏิบัติการยังต้องพัฒนาให้มีความแม่นยำสูงขึ้น เนื่องจากยังมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันของแต่ละวิธี และต้องเลือกใช้ให้สัมพันธ์กับกลไกหลักในการพัง

ทลายของเม็ดดินด้วย อย่างไรก็ตามทุกวิธีที่มีน้ำเกี่ยวข้องกับประเมินจะต้องดำเนินการด้วยความระมัดระวัง เพราะน้ำหรือความชื้นมีผลต่อเสถียรภาพเม็ดดินโดยตรง ในขณะที่วัดจึงต้องมีขั้นตอนปรับค่าความชื้นภายในเม็ดดินให้สม่ำเสมอก่อนทำการตรวจวัดเสมอ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนการจัดการดินให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ จำเป็นต้องพัฒนาวิธีการประเมินเสถียรภาพเม็ดดินในภาคสนามให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับสมบัติดินและการใช้ทรัพยากรดินของประเทศไทยต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้โครงการวิจัย รหัส ก-ช(ต)63.59 ประจำปีงบประมาณ 2559–2560 ที่สนับสนุนงบประมาณการตีพิมพ์บทความวิชาการนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Adamczyk, Z. and P. Weronki. 1999. Application of the DLVO theory for particle deposition problems. *Adv. Colloid Interface Sci.* 83: 137–226.
- Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *J. Sustainable Agric.* 14: 83–151.
- Amézketa, E. and R. Aragüés. 1995. Flocculation-dispersion behavior of arid-zone soil clays as affected by electrolyte and composition. *Invest. Agr.: Prod. Prot. veg.* 10(1): 101–112.
- Barthés, B. and E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena.* 47: 133–149.
- Bradford, J.M. and C. Huang. 1992. Mechanisms of crust formation: physical components. pp. 55–72 *In* M.E. Sumner and B.A. Stewart (eds.). *Soil Crusting: Physical and Chemical Processes*, Lewis, FA.
- Bronick, C.J. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 124: 3–22.
- Campbell, C.A., A.P. Moulin, D. Curtin, G.P. Lafond and L. Townley-Smith. 1993. Soil aggregation as influenced by cultural practices in Saskatchewan: I. Black Chernozemic soils. *Can. J. Soil Sci.* 73: 579–595.



- Dexter, A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11: 199–238.
- Ding, W.F. and X.C. Zhang. 2016. An evaluation on using soil aggregate stability as the indicator of interrill erodibility. *J. Mt. Sci.* 13(5): 831–843.
- Edwards, A.P. and J.M. Bremner. 1967. Microaggregates in soils. *Eur. J. Soil Sci.* 18: 64–73.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. pp. 383–409. In A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2<sup>nd</sup> ed. Agron Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Graf, F. and M. Frei. 2013. Soil aggregate stability related to soil density, root length, and mycorrhiza using site-specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus* s.l. *Ecol. Eng.* 57: 314–323.
- Grieve, I.C. 1980. The magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping. *Catena.* 7: 79–85.
- Herrick, J.E., W.G. Whitford, A.G. de Soyza, J.W. Van Zee, K.M. Havstad, C.A. Seybold and M. Walton. 2001. Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *Catena.* 44: 27–35.
- Holthusen, D., S. Peth and R. Horn. 2010. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. *Soil Tillage Res.* 111: 75–85.
- Hu, F., C. Xu, H. Li, S. Li, Z. Yu, Y. Li and X. He. 2015. Particle interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown. *Soil Tillage Res.* 147: 1–9.
- Igwe C.A., F.O.R. Akamigbo and J.S.C. Mbagwu. 1995. The use of some soil aggregate indices to assess potential soil loss in soils of southeastern Nigeria. *Int. Agrophys.* 9: 95–100.
- Jastrow, J.D. and R.M. Miller. 1991. Methods for assessing the effect of biota on soil structure. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34: 279–303.
- Jerzy, N. and W.W. Barbara. 2003. Index of soil aggregates stability as linear function value of transition matrix elements. *Soil Tillage Res.* 70(2): 121–130.
- Kay, B.D. and A.R. Dexter. 1990. Influence of aggregate diameter, surface area and antecedent water content on the dispersibility of clay. *Can. J. Soil Sci.* 70: 655–671.
- Kemper, W.D. and E.J. Koch. 1966. Aggregate stability of soils from western United States and Canada. USDA-ARS Tech. Bull. 1355. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Kemper, W.D. and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425–442. In A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* 2<sup>nd</sup> ed. Agron Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kemper, W.D. and W.S. Chepil. 1965. Size distribution of aggregates. pp. 499–510. In C.A. Black (ed.). *Methods of Soil Analysis, Part I.* ASA, Madison, WI.
- Le Bissonnais, Y. 2016. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 67: 1–21.
- Levy, G.J. and J.R. Torrento. 1995. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. *Soil Sci.* 160: 352–358.
- Levy, G.J., H. Eisenberg and I. Shainberg. 1993. Clay dispersion as related to soil properties and water permeability. *Soil Sci.* 155: 15–22.

- Li, H., X. H. Peng, L.S. Wu, M.Y. Jia and H.L. Zhu. 2009. Surface potential dependence of the Hamaker constant. *J. Phys. Chem.: C* 113: 4419–4425.
- Li, S., H. Li, C.Y. Xu, X.R. Huang, D.T. Xie and J.P. Ni. 2013. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77: 1563–1571.
- Loch, R.J. 1994. A method for measuring aggregate water stability with relevance to surface seal development. *Aust. J. Soil Res.* 32: 687–700.
- Mazurak, A.P. 1950. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. *Soil Sci.* 69: 135–148.
- Nearing, M.A., J.M. Bradford and R.D. Holtz. 1987. Measurement of water drop impact pressures on soil surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1302–1306.
- Pojasok, T. and B.D. Kay. 1990. Assessment of a combination of wet sieving and turbidimetry to characterize the structural stability of moist aggregates. *Can. J. Soil Sci.* 70: 33–42.
- Schaller, F.W. and K.R. Stockinger. 1953. A comparison of five methods for expressing aggregation data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 17: 310–313.
- Schomakers, J., A. Mentler, N. Degischer and W.E.H. Blum. 2011. Measurement of soil aggregate stability using low intensity ultrasonic vibration. *Spanish J. Soil Sci.* 1(1): 1–19.
- Shainberg, I. 1992. Chemical and mineralogical components of crusting. pp. 33–54. *In* M.E. Sumner and B.A. Stewart (eds). *Soil Crusting: Physical and Chemical Processes*, Lewis, FA.
- Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Eur. J. Soil Sci.* 33: 141–163.
- Truman, C.C., J.M. Bradford and J.E. Ferris. 1990. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1385–1392.
- Tyler, S.W. and S.W. Wheatcraft. 1992. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(2): 362–369.
- Van Bavel, C.H.M. 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 14: 20–23.
- Wen, D., N. He and J. Zhang. 2016. Dynamics of soil organic carbon and aggregate stability with grazing Exclusion in the Inner Mongolian Grasslands. *PLoS ONE* 11(1): doi:10.1371/journal.pone.0146757.
- Williams, N.D. and E.L. Petticrew. 2009. Aggregate stability in organically and conventionally farmed soils. *Soil Use Manag.* 25: 284–292.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agron. J.* 28: 337–351.