การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์และการทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน

Comparison of Analytical Methods and Prediction of Soil Organic Carbon Content

จวรรชนก ปรีสงค์ อารดา บุญอาจ นันทนัช ชาวพะเยาว์
ทราย ห้วยหงษ์ทอง และ สุกัญญา แย้มประชา*
Jawanchanok Preesong, Arada Boonart, Nantanat Chaopayao,
Sai Huaihongthong and Sukunya Yampracha*

ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
Department of Plant Production Technology, School of Agricultural Technology,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
**Corresponding author: Email: sukunya.ya@kmitl.ac.th*

(Received: 27 February 2023; Accepted: 27 April 2023)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) can be analyzed in many methods, with different advantages and disadvantages. The objectives of this study were 1) to study the correlation between three SOC analysis methods and to predict the dry combustion-SOC with wet oxidation and Loss on Ignition (LOI) and 2) to study the correlation and predict the dry combustion-SOC with soil properties. One hundred fifty-eight soil samples were collected in lowland and upland soils and analyzed for soil properties. The SOC content was analyzed by 3 methods as follows: 1) wet oxidation method 2) dry combustion method and 3) LOI method. The results showed that the dry combustion-SOC had a statistically significant positive correlation with the wet oxidation-SOC and the LOI-SOC in both lowland and upland soils. The correlation coefficients (*r*) between the dry combustion-SOC with the wet oxidation-SOC in lowland and upland soils were 0.91** and 0.81**, while the r values with the LOI-SOC were 0.95** and 0.77**, respectively. The regression equation to predict the dry combustion-SOC in lowland and upland soils with the wet oxidation-SOC had a coefficient of determination (R^2) of 0.83** and 0.66**, respectively. The R^2 of the regression equation to predict the dry combustion-SOC in lowland and upland soils with the LOI-SOC were 0.90** and 0.59**, respectively. However, an equation for converting wet oxidation-SOC and LOI-SOC to dry combustion-SOC were useful for interpreting the dry combustion-SOC testing. The correlation between the dry combustion-SOC and soil properties showed that lowland and upland were positively correlated with clay content and CEC and negatively correlated with sand content and bulk density.

Keywords: Soil organic matter, soil organic carbon, soil properties, lowland soil, upland soil

Copyright @ Journal of Agriculture, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University. All rights reserved.

บทคัดย่อ: คาร์บอนอินทรีย์ในดิน (soil organic carbon; SOC) สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาสหสัมพันธ์ของวิธีวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ที่แตกต่างกันและสร้างสมการทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี dry combustion ด้วยวิธี wet oxidation และ loss on ignition (LOI) และ 2) เพื่อศึกษาสหสัมพันธ์และสร้างสมการทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี dry combustion ด้วยสมบัติดินเบื้องต้น โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินพื้นที่ลุ่มและดอน 158 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์สมบัติดินเบื้องต้นและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ 3 วิธี ดังนี้ 1) wet oxidation 2) dry combustion และ 3) LOI ผลการศึกษา พบว่าคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion (dry combustion-SOC) มีสหสัมพันธ์ในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ วิธี wet oxidation และ LOI ทั้งพื้นที่ลุ่มและดอน โดยวิธี wet oxidation มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (*r*) เท่ากับ 0.91** และ 0.81** ตามลำดับ วิธี LOI มีค่า *r* เท่ากับ 0.95** และ 0.77** ตามลำดับ สมการถดถอยเพื่อทำนาย dry combustion-SOC ด้วยวิธี wet oxidation ของพื้นที่ลุ่มและดอนมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.83** และ 0.66** ตามลำดับ ค่า R^2 การทำนาย dry combustion-SOC ด้วยวิธี LOI ของพื้นที่ลุ่มและดอน มีค่าเท่ากับ 0.90** และ 0.59** ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากสมการที่ได้สามารถเปลี่ยนค่าวิเคราะห์จากวิธี wet oxidation และ LOI ให้เป็นวิธี dry combustion ได้ จึงเป็นประโยชน์ในการแปลผลวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion dry combustion-SOC มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณอนุภาคดินเหนียว (clay) และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) และมีสหสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณอนุภาคดินทราย (sand) และความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density, BD)

คำสำคัญ: อินทรียวัตถุ คาร์บอนอินทรีย์ สมบัติดินเบื้องต้น พื้นที่ลุ่ม พื้นที่ดอน

คำนำ

อินทรียวัตถุในดิน (soil organic matter; SOM) เป็นอินทรียสารที่อยู่ในดิน ซึ่งได้จากการสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ หรือซากจุลินทรีย์ รวมทั้งอินทรียสารที่รากพืชปลดปล่อยออกมาและที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ขึ้น จึงมีบทบาทสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพของดิน (Patharadilok, 2013) ดังนั้น การใช้ประโยชน์ของที่ดินและการจัดการดินที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้มีปริมาณของคาร์บอนอินทรีย์ที่แตกต่างกัน (van Noordwijk *et al*., 1997) ด้วยเหตุนี้อินทรียวัตถุจึงใช้เป็นดัชนีวัดคุณภาพของดิน เพื่อใช้ประเมินความยั่งยืนของทรัพยากรดิน แต่การวิเคราะห์อินทรียวัตถุในดิน ไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยตรง สามารถวิเคราะห์ได้จากคาร์บอนอินทรีย์ในอินทรียวัตถุ โดยอาศัยหลักการที่ว่าคาร์บอนอินทรีย์มีปริมาณ 58 เปอร์เซ็นต์ ของอินทรียวัตถุ (Grigal and Ohmann, 1992)

วิธีวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดิน (soil organic carbon; SOC) มีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดินของห้องปฏิบัติการปฐพีวิทยาโดยส่วนใหญ่ นิยมวิเคราะห์ด้วย 3 วิธี ดังนี้ 1) วิธี wet oxidation (Walkley and Black, 1934) เป็นวิธี oxidize คาร์บอนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) และกรดกำมะถันเข้มข้น (H_2SO_4) แล้ววัดไดโครเมตที่เหลือ ($Cr_2O_7^{2-}$) โดยการไทเทรตกับ reducing agent เป็นวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย สะดวกรวดเร็วและไม่ต้องใช้เครื่องมือพิเศษ แต่ค่าที่ได้มีความแม่นยำต่ำ ค่าเฉลี่ย recovery อยู่ในช่วง 71 - 92 เปอร์เซ็นต์ (Nelson and Sommers, 1996) ทำให้ต้องคูณค่า correction factor (CF) เพื่อให้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์มีความถูกต้องมากขึ้น และสารเคมีที่ใช้ $K_2Cr_2O_7$ ยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม 2) วิธี dry combustion (LECO Corporation, 2016) เป็นวิธีมาตรฐานที่ห้องปฏิบัติการปฐพีวิทยาทั่วโลกยอมรับ (FAO, 2019) เป็นวิธีที่เผาคาร์บอนอินทรีย์ด้วยความร้อน

ที่อุณหภูมิ 950 - 1,400 องศาเซลเซียส มีค่าถูกต้อง (accuracy) และมีความเที่ยง (precision) สูง แต่เครื่องมือมีราคาสูงจึงไม่สามารถทำได้ในทุกห้องปฏิบัติการ และ 3) วิธี loss on ignition (Jones, 2001) เป็นวิธีที่วัดความแตกต่างของน้ำหนักที่หายไปของดินหลังการเผาด้วยอุณหภูมิ 350 - 440 องศาเซลเซียส Suwannaoin (2007) รายงานว่า การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion มีความถูกต้องมากกว่าวิธี wet oxidation เพราะวิธี wet oxidation มีข้อจำกัดของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี LOI เหมาะกับการวิเคราะห์ดินทรายเพียงเท่านั้น Avramidis *et al*. (2015) เปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี wet oxidation และวิธี dry combustion โดยใช้ตัวอย่างดินอ้างอิง (soil certified references materials) พบว่า วิธี dry combustion มีความถูกต้องมากกว่าวิธี wet oxidation ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion จึงเป็นวิธีที่ทั่วโลกยอมรับและใช้เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์หาคาร์บอนอินทรีย์ในดิน แต่ด้วยราคาค่าใช้จ่ายที่สูงจึงมีนักวิจัยหาวิธีประมาณค่าคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion ได้จากวิธี wet oxidation และวิธี LOI โดยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis) และการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) Konare *et al*. (2010) ได้ประมาณค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในแอฟริกาตะวันตกจากสมการ %SOC ด้วยวิธี dry combustion = 0.03 + 0.36 (LOI-SOC) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.89** นอกจากนั้น ยังสามารถประมาณค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินได้โดยใช้สมบัติเบื้องต้นทางเคมีและทางกายภาพของดิน ยกตัวอย่างเช่น ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity, CEC) ความหนาแน่นรวมดิน เนื้อดิน เป็นต้น ซึ่งจากการทดลองของ Konare *et al*. (2010) ยังสามารถประมาณค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในแอฟริกาตะวันตก โดยใช้ปริมาณของอนุภาคดินเหนียว จากสมการ คาร์บอนอินทรีย์จากวิธี dry combustion (g/kg) = 1.854+(0.019 x clay(g/kg)) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.45** Syers *et al*. (1970) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CEC และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินทรายในทางตอนเหนือของประเทศนิวซีแลนด์ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.96** ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CEC และเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียว มีค่า R^2 เท่ากับ 0.57** จากงานวิจัยของ Stevenson (1994) สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง CEC กับอนุภาคดินเหนียว และคาร์บอนอินทรีย์ในดินของกลุ่มดิน stony downs พบว่า CEC (cmol/kg) = 4.37 + 0.44 (%clay) + 2.25 (%SOC) อย่างไรก็ตาม การศึกษางานวิจัยทางด้านความสัมพันธ์และการทำนายคาร์บอนอินทรีย์จากวิธี dry combustion มีข้อมูลน้อยในประเทศไทย

การหาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดินและสมบัติดินเบื้องต้น โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ในการประเมินค่าคาร์บอนอินทรีย์ในดิน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการประเมินค่าคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ช่วยลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ และค่าใช้จ่าย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาสหสัมพันธ์ของวิธีวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ที่แตกต่างกันและสร้างสมการทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี dry combustion ด้วยวิธี wet oxidation และ LOI และ 2) เพื่อศึกษาสหสัมพันธ์และสร้างสมการทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี dry combustion ด้วยสมบัติดินเบื้องต้น

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษาและการเก็บข้อมูล

ทำการศึกษาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2562 - 2565 โดยพื้นที่ศึกษาแบ่งตามสภาพพื้นที่ออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) พื้นที่ลุ่ม (lowland) และ 2) พื้นที่ดอน (upland) ตามแผนที่กลุ่มชุดดินของกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department, 2005) ตัวอย่างดินในพื้นที่ลุ่ม เก็บตัวอย่างจาก 5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดสุพรรณบุรี และกรุงเทพมหานคร โดยมีการใช้ที่ดินเพื่อปลูกข้าวทั้งหมด จำนวน 92 ตัวอย่าง ส่วนพื้นที่ดอน เก็บตัวอย่างดินจาก 5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ

จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดสุพรรณบุรี และจังหวัดอุทัยธานี โดยใช้ที่ดินเพื่อปลูกพืชไร่ ได้แก่ อ้อย มันสำปะหลัง และข้าวโพด เป็นต้น จำนวน 66 ตัวอย่าง รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 158 ตัวอย่าง (Figure 1)

การเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินแต่ละแปลง 2 รูปแบบ ได้แก่ การเก็บตัวอย่างแบบรบกวนตัวอย่าง (disturbed soil samples) และการเก็บตัวอย่างแบบไม่รบกวนตัวอย่าง (undisturbed soil samples) ซึ่งการเก็บตัวอย่างแบบรบกวนตัวอย่างโดยใช้วิธีเก็บตัวอย่างรวม (composite sample) โดยเก็บตัวอย่างดินจำนวน 5 จุดต่อแปลง 2 ระดับความลึก คือ 0 - 15 และ 15 - 30 เซนติเมตร แล้วนำตัวอย่างดินแต่ละระดับความลึกผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วจึงสุ่มตัวอย่างดินที่ออกมา 1 ส่วนจำนวน 1 กิโลกรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นทางเคมีของดิน ส่วนการเก็บตัวอย่างดินแบบไม่รบกวนตัวอย่าง (undisturbed soil samples) เก็บตัวอย่างดินด้วยวิธี core sample จำนวน 2 จุดต่อแปลง 2 ระดับความลึก คือ 0 - 15 และ 15 - 30 เซนติเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของดินด้วยวิธี core method (Land Development Department, 2010)

การวิเคราะห์สมบัติดินเบื้องต้น

นำตัวอย่างดินที่เก็บแบบรบกวนตัวอย่างผึ่งลมให้แห้ง บด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์สมบัติดินเบื้องต้น ได้แก่ วิเคราะห์เนื้อดินโดยวิธีปิเปต (pipette method) (Gee and Bauder, 1986) ความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH) โดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ 1 : 1 วัดด้วยเครื่อง pH meter (National Soil Survey Center, 1996) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) โดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ 1 : 5 วัดด้วยเครื่อง EC meter (Richards, 1954) ความจุแลกเปลี่ยนแคต-ไอออน (CEC) สกัดด้วย 1*N* ammonium acetate (pH 7.0) (IITA, 1979) วิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ 3 วิธี ดังนี้ 1) วิธี dry combustion โดยใช้เครื่อง CNS analyzer (LECO Corporation, 2016) 2) วิธี wet oxidation (Walkley and Black, 1934) และ 3) วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ด้วยวิธี loss of ignition (Jones, 2001) โดยมีรายละเอียดดังนี้

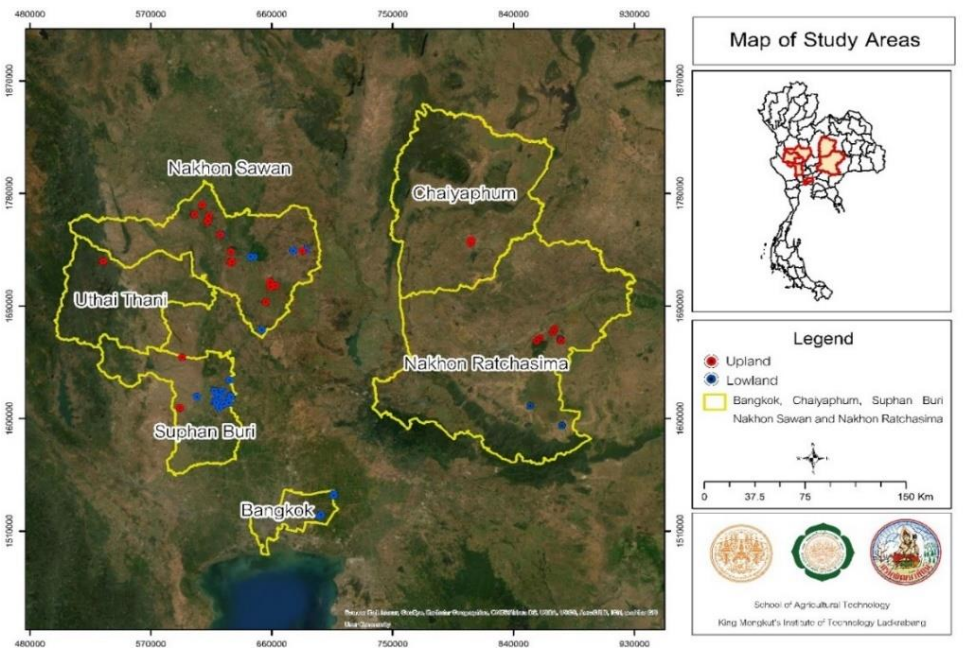

Figure 1. Map of soil sampling points of lowland (*n*=92) and upland soil (*n*=66)

การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ ด้วยวิธี dry combustion (LECO Corporation, 2016)

นำตัวอย่างดินมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.1 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TruMac CNS analyzer S/N 15552 โดยเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที ทุกการวิเคราะห์ตัวอย่างต้องคั่นด้วยตัวอย่างดินอ้างอิง (soil certified references materials) ทุก ๆ 10 ตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าวิเคราะห์ โดยค่าเฉลี่ย %recovery ของคาร์บอนในดินของวิธี dry combustion มากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์

การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ ด้วยวิธี wet oxidation โดยวิธีของ Walkley and Black (1934)

นำตัวอย่างดินร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร (32 mesh) แล้วชั่งตัวอย่างดิน 0.2 - 2.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 1*N* potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$) ลงไป 5 มิลลิลิตร แกว่งเบา ๆ ให้ดินและสารละลายผสมกัน เติมกรดกำมะถันเข้มข้นจำนวน 10 มิลลิลิตร แกว่งขวดรูปชมพู่อย่างรวดเร็ว ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร แกว่งขวดรูปชมพู่ทิ้งไว้ให้เย็น เติม O-phenanthroline ferrous sulfate indicator 3 - 4 หยด ไทเทรต suspension ด้วยสารละลาย 0.5*N* ferrous sulfate ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) จนกระทั่งถึงจุดยุติ (end point) คือสีของ suspension จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง ทำ blank ซึ่งไม่มีตัวอย่างดินควบคู่กับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน สามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (\%)} = \frac{(\text{blank-sample}) \times N \text{ ของ } FeSO_4 \times 0.003 \times 100 \times 1.33}{\text{น้ำหนักของดินแห้ง (g)}}$$

โดยที่ blank คือ สารละลาย $FeSO_4$ ที่ไทเทรต blank, sample คือ สารละลาย $FeSO_4$ ที่ไทเทรตตัวอย่าง, *N* ของ $FeSO_4$ คือ ความเข้มข้นของ $FeSO_4$ ในหน่วย normality, 0.003 คือ น้ำหนักสมมูล (equivalent weight) ของคาร์บอนที่ถูกออกซิไดซ์ ในหน่วย meq และ 1.33 คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยคิดจากค่าเฉลี่ย %recovery ของคาร์บอน ในดินเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์

การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ ด้วยวิธี loss of ignition (Jones, 2001)

นำ crucible อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาใส่ desiccator ชั่งน้ำหนักของ crucible ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จำนวน 5.0000 กรัม ใส่ crucible แล้วจดน้ำหนักก่อนอบ นำตัวอย่างดินที่ใส่ crucible แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำมาใส่ desiccator จดน้ำหนักหลังอบตัวอย่างดิน นำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำมาใส่ desiccator จดน้ำหนักหลังการเผาตัวอย่างดิน สามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักดินหลังอบที่ 105 }^{\circ}\text{C} - \text{น้ำหนักดินหลังเผาที่ 400 }^{\circ}\text{C}}{\text{น้ำหนักดินหลังอบที่ 105 }^{\circ}\text{C}}$$

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

สมบัติดินเบื้องต้นวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (mean), ค่ามัธยฐาน (median), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD), ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (coefficient of variation: CV) และค่าความเบ้ (skewness)

วิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis) ของการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้แก่ 1) วิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ระหว่างวิธี dry combustion กับวิธี wet oxidation และวิธี LOI และ 2) วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี dry combustion กับสมบัติดินเบื้องต้น

สร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion โดยสร้างสมการ

ถดถอย (regression analysis) ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์วิธี dry combustion ด้วยวิธี wet oxidation และ LOI และสร้างสมการการทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์วิธี dry combustion ด้วยสมบัติดินโดยวิธี stepwise regression analysis โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ training set for calibration และ testing set for validation โดยสุ่มข้อมูลออกเป็น สัดส่วน 70 : 30 โดยข้อมูลชุดที่ 1 นำมาสร้างสมการถดถอยและสมการคณิตศาสตร์ด้วยวิธี stepwise regression ส่วนข้อมูลชุดที่ 2 นำมาใช้ในการประมาณค่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นโดยคำนวณค่า root mean squared error (RMSE) (Saldaña-Villota and Cotes-Torres, 2021; Willmott, 1982) และค่า model efficiency (EF) เพื่อประเมินความถูกต้องของสมการคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น วิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สมบัติดินเบื้องต้น

การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาของสมบัติดินเบื้องต้นของตัวอย่างดินในพื้นที่ลุ่ม พบว่า ค่า pH ของดินในพื้นที่ลุ่มมีค่าอยู่ในช่วง4.45 - 8.01 (Table 1) การกระจายตัวเป็นแบบเบ้ซ้าย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.39 แสดงว่าค่า pH ส่วนใหญ่เป็นกรดอ่อน ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ของพื้นที่ลุ่มอยู่ในช่วง 0.01 - 0.48 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ค่า EC อยู่ในระดับที่ไม่เค็ม ปริมาณอนุภาคทราย (sand), อนุภาคทรายแป้ง (silt) และอนุภาคดินเหนียว (clay) มีค่าเฉลี่ย 201.02, 358.97 และ 440.77 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ พบว่า ดินส่วนใหญ่ในพื้นที่ลุ่มจัดเป็นเนื้อดินประเภทกลุ่มเนื้อละเอียดเพราะเนื้อดินเป็นดินเหนียว ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density, BD) ของพื้นที่ลุ่ม อยู่ในช่วง 0.94 - 2.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) อยู่ในช่วง 0.45 - 116.60 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) อยู่ในช่วง 0.35 - 28.55 กรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณของคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion, wet oxidation และ LOI ของพื้นที่ลุ่มอยู่ในช่วง 3.87 - 29.47, 1.66 - 31.22 และ 6.78 - 70.36 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.16, 11.23 และ 29.71 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Table 1. Soil properties of lowland soil samples (n = 92)

Parameter	Minimum	Maximum	Mean	Median	SD	CV (%)	Skewness
Soil pH (1:1)	4.45	8.01	6.39	6.66	0.91	14.16	-0.33
EC (1:5) (mS/cm)	0.01	0.48	0.16	0.13	0.12	73.24	1.11
Sand (g/kg)	4.00	744.10	201.02	100.79	213.16	106.04	1.12
Silt (g/kg)	95.53	561.70	358.97	388.60	103.28	28.77	-0.63
Clay (g/kg)	58.89	751.11	440.77	445.22	178.61	40.52	0.01
BD (g/cm^3)	0.94	2.13	1.52	1.49	0.26	16.95	0.41
SOC (dry combustion) (g/kg)	3.81	29.47	13.16	11.20	7.02	53.34	0.92
SOC (wet oxidation) (g/kg)	1.66	31.22	11.23	9.22	6.71	59.72	0.83
LOI (g/kg)	6.78	70.36	29.71	25.90	15.02	50.54	0.83
CEC (cmol/kg)	0.45	116.60	32.48	28.07	22.82	70.25	1.59
TN (g/kg)	0.35	28.55	1.64	1.02	3.63	220.64	6.61

BD = Bulk density, SOC = Soil organic carbon, LOI = Loss of ignition, CEC = Cation exchange capacity, TN = Total nitrogen

แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์หาคาร์บอนอินทรีย์โดยวิธีของ LOI มีค่าสูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นเป็นเพราะวิธีนี้เป็นการเผาตัวอย่างด้วยความร้อนแล้วชั่งน้ำหนักที่หายไปอาจทำให้สารอินทรีย์บางชนิดถูกทำลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่มีปริมาณดินเหนียวสูง (Christensen and Malmros, 1982) จากการทดลองของ Sutherland (1998) ได้รายงานถึงข้อจำกัดของวิธี LOI ที่อาจทำให้การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ได้ไม่แม่นยำ เช่น การสูญเสียน้ำจากโครงสร้างของแร่ในดิน การเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ของสารประกอบคาร์บอเนตในดิน เป็นต้น ส่วนปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี wet oxidation มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่น้อยกว่าวิธี dry combustion เป็นเพราะวิธี wet oxidation มีค่าเฉลี่ย recovery อยู่ในช่วง 71 - 92 เปอร์เซ็นต์ (Nelson and Sommers, 1996) แม้ว่าคูณค่า % recovery ของคาร์บอน เพื่อให้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์มีความถูกต้องมากขึ้นที่ 75 เปอร์เซ็นต์แล้ว (Allison *et al*., 1965) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี wet oxidation ในพื้นที่ลุ่มและดอนมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์น้อยกว่าวิธี dry combustion มีค่าแตกต่างกัน 14 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับงานทดลองของ Avramidis *et al*. (2015) พบว่า ดินอ้างอิง 2 ตัวอย่างที่วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี wet oxidation (21.00 และ 4.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์น้อยกว่าวิธี dry combustion ซึ่งน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ (29.00 และ 5.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ)

สมบัติดินเบื้องต้นของพื้นที่ดอน พบว่า ดินมี pH อยู่ในช่วง 5.17 - 8.03 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.75 แสดงว่า ค่า pH ของดินพื้นที่ดอนส่วนมากมี pH เป็นกลาง (Table 2) ค่า EC อยู่ในช่วง 0.01 - 0.19 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร อยู่ในระดับที่ไม่เค็ม ปริมาณ sand, silt และ clay ของดินในพื้นที่ดอนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 471.81, 303.57 และ 224.62 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าดินส่วนใหญ่ในพื้นที่ดอนมีเนื้อดินจัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อหยาบ BD อยู่ในช่วง 0.75 - 2.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่า CEC และ TN มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.98 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และ 0.97 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion, wet oxidation และ LOI ของพื้นที่ดอน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.77, 8.84 และ 22.73 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การวิเคราะห์หาคาร์บอนอินทรีย์โดยวิธีของ LOI มีค่าคาร์บอนอินทรีย์สูงกว่าวิธีอื่นเช่นเดียวกันกับพื้นที่ลุ่ม

Table 2. Soil properties of upland soil samples (n = 66)

Parameter	Minimum	Maximum	Mean	Median	SD	CV (%)	Skewness
Soil pH (1:1)	5.17	8.03	6.75	6.73	0.82	12.12	-0.08
EC (1:5) (mS/cm)	0.01	0.19	0.06	0.06	0.03	54.86	1.00
Sand (g/kg)	67.68	904.36	471.81	471.78	214.49	45.46	0.16
Silt (g/kg)	67.44	540.83	303.57	313.19	124.16	40.90	0.01
Clay (g/kg)	16.67	623.11	224.62	189.22	144.34	64.26	1.22
BD (g/cm^3)	0.75	2.59	1.69	1.70	0.35	20.82	-0.18
SOC (dry combustion) (g/kg)	3.56	55.56	13.77	9.75	11.06	80.31	2.25
SOC (wet oxidation) (g/kg)	1.79	35.32	8.84	7.42	6.35	71.83	2.37
LOI (g/kg)	4.25	51.35	22.73	20.65	11.36	49.99	0.63
CEC (cmol/kg)	0.23	104.45	21.98	12.37	25.66	116.71	1.93
TN (g/kg)	0.26	3.45	0.97	0.84	0.64	65.85	2.61

BD = Bulk density, SOC = Soil organic carbon, LOI = Loss of ignition, CEC = Cation exchange capacity, TN = Total nitrogen

สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของวิธี dry combustion กับวิธี wet oxidation และวิธี LOI

สหสัมพันธ์ระหว่างวิธีวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ 3 วิธี ได้แก่ dry combustion, wet oxidation และ LOI ของพื้นที่ลุ่มและดอน (Table 3) พบว่า ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ลุ่มที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion มีสหสัมพันธ์เชิงบวกทั้งวิธี wet oxidation และ LOI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.91** และ 0.95** ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี wet oxidation มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับวิธี LOI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) มีค่า r เท่ากับ 0.89* ส่วนปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ดอนที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion มีสหสัมพันธ์เชิงบวกทั้งวิธี wet oxidation และ LOI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) มีค่า r เท่ากับ 0.81** และ 0.77** ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี wet oxidation มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับวิธี LOI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) มีค่า r เท่ากับ 0.78** ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramamoorthi and Meena (2018) มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion มีสหสัมพันธ์เชิงบวกทั้งวิธี wet oxidation และ LOI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) มีค่า r เท่ากับ 0.94** และ 0.87** ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Rowell and Coetzee (2003) ซึ่งปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับวิธี wet oxidation และ LOI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่า r เท่ากับ 0.93** และ 0.88** ตามลำดับ Chen *et al.* (2015) พบว่า ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion มีค่าสูงกว่าวิธี wet oxidation อาจเกิดจากการออกซิเดชันที่สมบูรณ์จากการเผาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 1,150 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของดิน พืชพรรณปกคลุม ความเป็นกรดด่าง และความลึกของดิน ส่งผลต่อ % recovery และค่า correction factor ของการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี wet oxidation (Bisutti *et al.*, 2004)

การทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion โดยใช้วิธี wet oxidation และ LOI

การประมาณค่าคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion โดยใช้วิธี wet oxidation ของดินพื้นที่ลุ่มและดอน โดยการสร้างสมการถดถอยจากตัวอย่างดินชุดแรก (70 เปอร์เซ็นต์) สมการทำนายค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ลุ่มมีรายละเอียดดังนี้

SOC (dry combustion) (g/kg) = 2.16413 + 0.97343 (wet oxidation-SOC (g/kg)), R^2=0.83** (1)

Table 3. Correlation of soil organic carbon analysis methods of lowland and upland soil samples

Parameter	Lowland soil			Upland soil		
	Dry combustion (g/kg)	Wet oxidation (g/kg)	LOI (g/kg)	Dry combustion (g/kg)	Wet oxidation (g/kg)	LOI (g/kg)
Dry combustion (g/kg)	1.00			1.00		
Wet oxidation (g/kg)	0.91**	1.00		0.81**	1.00	
LOI (g/kg)	0.95**	0.89*	1.00	0.77**	0.78**	1.00

** = significant difference at $P \leq 0.01$, * = significant difference at $P \leq 0.05$

พบว่า การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี wet oxidation สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ 83 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำค่าวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี wet oxidation ของดินชุดที่ 2 (30 เปอร์เซ็นต์) มาแทนค่าในสมการที่ (1) แล้วจะได้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion พบว่า มีค่า RMSE เท่ากับ 1.68 และ EF เท่ากับ 0.93 ค่า R^2 และค่า EF มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าสมการนี้สามารถใช้ทำนายค่าวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง และจากกราฟ 1 : 1 line (Figure 2a) จะเห็นได้ว่าค่าที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าวิเคราะห์จริงจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งงานวิจัยของ Ulmer *et al*. (1992) ทำนายค่าคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ของดินในรัฐนอร์ทดาโคตา SOC (%) = 0.23+1.17 (wet oxidation-SOC (%)) มีค่า R^2=0.99** ส่วนสมการทำนายค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ดอนมีรายละเอียดดังนี้

SOC (dry combustion) (g/kg) = 1.78434 + 1.39310 (wet oxidation-SOC (g/kg)), R^2=0.66** (2)

พบว่า การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี wet oxidation สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ 66 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำค่าวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี wet oxidation ของดินชุดที่ 2 (30 เปอร์เซ็นต์) มาแทนค่าในสมการที่ (2) แล้วจะได้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion พบว่า มีค่า RMSE เท่ากับ 3.06, และ EF เท่ากับ 0.40 ค่า R^2 และค่า EF ไม่เข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าสมการนี้ไม่เหมาะสมในการทำนาย ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ 1 : 1 line (Figure 2b) ค่าที่ทำนายได้มีค่าทั้งสูง (overestimate) และต่ำ (underestimate) กว่าค่าจริง

การประมาณค่าคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion โดยใช้วิธี LOI ของดินพื้นที่ลุ่มและดอน โดยสร้างสมการถดถอยจากตัวอย่างดินชุดแรก (70 เปอร์เซ็นต์) สมการทำนายค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ลุ่มมีรายละเอียดดังนี้

SOC (dry combustion) (g/kg) = -0.4002 + 0.45029 (LOI-SOC (g/kg)), R^2=0.90** (3)

พบว่า การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี LOI สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำค่าวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี LOI ของดินชุดที่ 2 (30 เปอร์เซ็นต์) มาแทนค่าในสมการที่ (3) แล้วได้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion พบว่า มีค่า RMSE เท่ากับ 2.32 และ EF เท่ากับ 0.86 ค่า R^2 และ EF มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าสมการนี้สามารถใช้ทำนายค่าวิเคราะห์คาร์บอน-

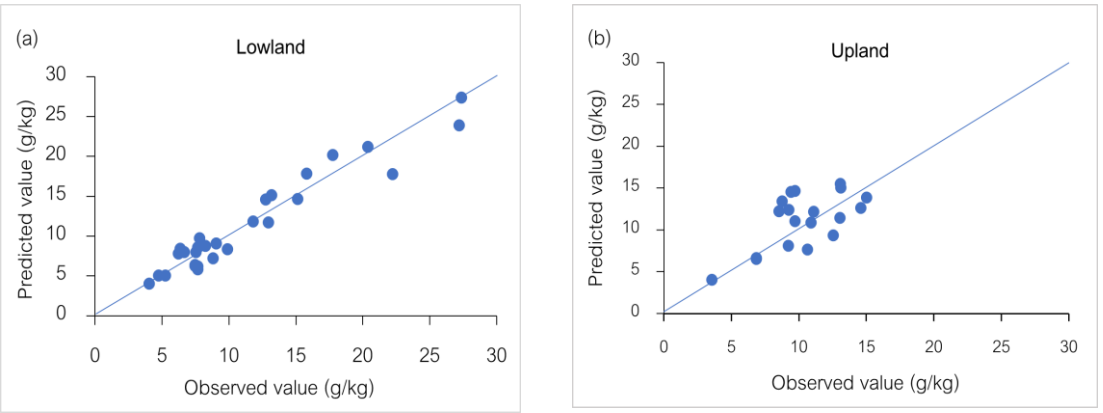

Figure 2. Scatter plot 1 : 1 line of observed and predicted dry combustion-SOC content of lowland (a) and upland soil samples (b) using wet oxidation-SOC

อินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงและจากกราฟ 1 : 1 line (Figure 3a) เห็นได้ว่าค่าที่ทำนายได้มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าจริง ซึ่งงานวิจัยของ Konare *et al.* (2010) ใช้สมการในการทำนายคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ของดินในแอฟริกาตะวันตก จากสมการ SOC (%) = 0.03+0.36 (LOI-SOC (%)) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.89** ส่วนสมการทำนายค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ดอนมีรายละเอียดดังนี้

SOC (dry combustion) (g/kg) = -3.93329 + 0.78879 (LOI-SOC (g/kg)), R^2=0.59** (4)

พบว่า การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี LOI สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ 59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำค่าวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์โดยวิธี LOI ของดินชุดที่ 2 (30 เปอร์เซ็นต์) มาแทนค่าในสมการที่ (4) พบว่า มีค่า RMSE เท่ากับ 5.56 และ EF เท่ากับ -0.96 ค่า R^2 และค่า EF ไม่เข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าสมการนี้ไม่เหมาะสมในการทำนาย สอดคล้องกับกราฟ 1 : 1 line (Figure 3b) ค่าที่ทำนายได้มีค่าสูงและต่ำกว่าค่าจริง

สหสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion กับสมบัติดินเบื้องต้น

สหสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion กับสมบัติดินเบื้องต้นของพื้นที่ลุ่มและดอน (Table 4) แสดงให้เห็นว่าดินพื้นที่ลุ่มมีปริมาณของ sand และ BD มีสหสัมพันธ์ในเชิงลบกับคาร์บอนอินทรีย์ในดินของพื้นที่ลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่า *r* เท่ากับ -0.43** และ -0.62** ตามลำดับ ปริมาณ clay และ CEC มีสหสัมพันธ์ในเชิงบวกกับคาร์บอนอินทรีย์ในดินของพื้นที่ลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่า *r* เท่ากับ 0.45** และ 0.63** ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chaudhari *et al.* (2013) พบว่า BD มีความสหสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน โดยมีค่า *r* เท่ากับ -0.89** อินทรียวัตถุที่เพิ่มขึ้นทำให้ BD ในดินลดลง งานวิจัยของ Zhong *et al.* (2018) พบว่า ปริมาณ clay มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน โดยปริมาณ clay ที่เพิ่มขึ้นได้รับอิทธิพลมาจากสภาพอากาศ วัตถุต้นกำเนิด และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสร้างตัวของดิน ซึ่งมีการเพิ่มคาร์บอนอินทรีย์ระหว่างการสร้างตัวของดิน

สหสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอินทรีย์กับสมบัติดินเบื้องต้นของพื้นที่ดอน พบว่า มีปริมาณ clay และค่า CEC มีสหสัมพันธ์ในเชิงบวกกับคาร์บอนอินทรีย์ในดินของพื้นที่ดอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) มีค่า *r* เท่ากับ 0.47** และ0.45** ตามลำดับ (Table 5)

การทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion โดยใช้สมบัติดินเบื้องต้น

การประมาณค่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion โดยใช้สมบัติดินเบื้องต้นของดินชุดที่ 1 (70 เปอร์เซ็นต์) โดยวิธี stepwise regression สมการทำนายค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ลุ่มมีรายละเอียดดังนี้

SOC (dry combustion) (g/kg) = 31.2836 - 15.1449 (BD (g/cm^3)) + 0.1462 (CEC (cmol/kg)), R^2=0.60** (5)

พบว่า การทำนายคาร์บอนอินทรีย์ด้วยสมบัติดิน สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำค่าวิเคราะห์ BD และ CEC มาแทนค่าในสมการที่ (5) แล้วจะได้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion พบว่า มีค่า RMSE เท่ากับ 5.03 และ EF เท่ากับ 0.37 ค่า EF ไม่เข้าใกล้ 1 แต่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.60 ถือว่ายอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าสมการนี้สามารถใช้ทำนายค่าได้ แต่จากกราฟ 1 : 1 line (Figure 4a) ของดินพื้นที่ลุ่ม แสดงให้เห็นว่า ค่าที่ทำนายได้ไม่ใกล้เคียงค่าจริง ส่วนสมการทำนายค่าคาร์บอนอินทรีย์ของดินในพื้นที่ดอนมีรายละเอียดดังนี้

SOC (g/kg) = -37.54045+0.07992 (clay (g/kg)) + 11.87893 (BD (g/cm^3)) + 0.02895 (sand (g/kg))), R^2=0.40** (6)

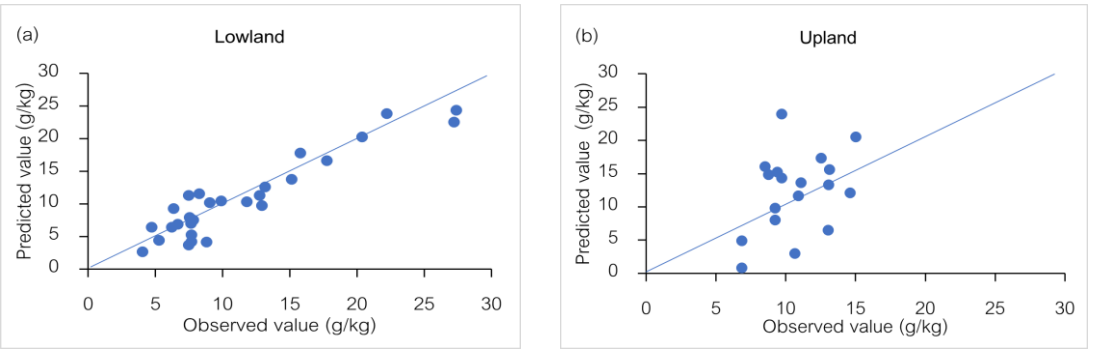

Figure 3. Scatter plot 1 : 1 line of observed and predicted dry combustion-SOC content of lowland (a) and upland soil samples (b) using LOI-SOC

Table 4. Correlation coefficient between dry combustion-SOC and soil properties of lowland soil samples

Parameter	SOC (Dry combustion) (g/kg)	Sand (g/kg)	Silt (g/kg)	Clay (g/kg)	BD (g/cm^3)	CEC (cmol/kg)
SOC (dry combustion) (g/kg)	1.00					
Sand (g/kg)	-0.43**	1.00				
Silt (g/kg)	-0.04	-0.27*	1.00			
Clay (g/kg)	0.45**	-0.86**	-0.27*	1.00		
BD (g/cm^3)	-0.62**	0.35**	0.08	-0.39**	1.00	
CEC (cmol/kg)	0.63**	-0.52**	-0.32**	0.68**	-0.28*	1.00

SOC = Soil organic carbon, BD = Bulk density, CEC = Cation exchange capacity

** = significant difference at $P \leq 0.01$, * = significant difference at $P \leq 0.05$

Table 5. Correlation coefficient between dry combustion-SOC with soil properties of upland soil samples

Parameter	SOC (Dry combustion) (g/kg)	Sand (g/kg)	Silt (g/kg)	Clay (g/kg)	BD (g/cm^3)	CEC (cmol/kg)
SOC (dry combustion) (g/kg)	1.00					
Sand (g/kg)	-0.27	1.00				
Silt (g/kg)	-0.11	-0.74**	1.00			
Clay (g/kg)	0.47**	-0.86**	0.28	1.00		
BD (g/cm^3)	0.26	0.16	-0.05	-0.19	1.00	
CEC (cmol/kg)	0.45**	-0.77**	-0.23	0.91**	-0.01	1.00

SOC = Soil organic carbon, BD = Bulk density, CEC = Cation exchange capacity

** = significant difference at $P \leq 0.01$, * = significant difference at $P \leq 0.05$

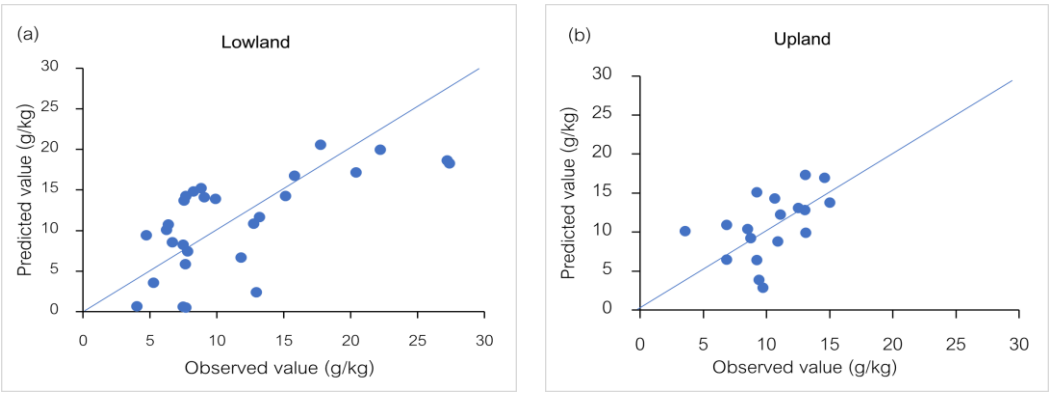

Figure 4. Scatter plot 1 : 1 line of observed and predicted dry combustion-SOC content of lowland (a) and upland soil samples (b) using LOI-SOC

พบว่า การวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยสมบัติดิน สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ได้ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำค่าวิเคราะห์ clay, BD และsand มาแทนค่าในสมการที่ (6) แล้วจะได้ปริมาณคาร์-บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี dry combustion พบว่ามีค่า RMSE เท่ากับ 3.64 และ EF เท่ากับ -0.57 ค่า R^2 และ ค่า EF ไม่เข้าใกล้ 1 ค่า RMSE มีค่าไม่เข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าสมการนี้ไม่เหมาะสมนำมาทำนาย นอกจากนี้กราฟ 1: 1 line (Figure 4b) ของดินพื้นที่ดอน แสดงให้เห็นว่า ค่าที่ทำนายได้มีค่าไม่ใกล้ค่าจริง

สรุป

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน โดยวิธี dry combustion, wet oxidation และ LOI มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ทั้งพื้นที่ลุ่มและดอนมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี LOI > dry combustion> wet oxidation วิธี dry combustion มีสหสัมพันธ์กับวิธี wet oxidation และ LOI ทั้งพื้นที่ลุ่มและดอน วิธี wet oxidation มีค่า R^2 เท่ากับ 0.83** และ 0.66** ตามลำดับ วิธี LOI มีค่า R^2 เท่ากับ 0.90** และ 0.59** ตามลำดับ สมการถด-ถอยที่ใช้ในการทำนายคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี dry combustion ตัวอย่างดินของพื้นที่ลุ่มสามารถอธิบายความผันแปรได้ดีและมากกว่าการทำนายตัวอย่างดินพื้นที่ดอน ส่วนการทำนายคาร์บอนอินทรีย์ด้วยสมบัติดินทั้งพื้นที่ลุ่มและดอนมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณ clay และ CEC แต่มีสหสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณ sand และ BD สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของพื้นที่ลุ่มมีความถูกต้องมากกว่าพื้นที่ดอน โดยใช้ค่า BD, CEC, clay และ sand ในการทำนาย แต่ยังอยู่ในระดับที่ควรมีการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Allison, L.E., W.E. Bollen and C.D. Moodie. 1965. Total carbon. pp. 1346-1366. *In*: C.A. Black (ed.). Methods of Soil Analysis: Chemical and Microbiological Properties, Part 2. Agronomy Monographs 9, American Society of Agronomy, Inc. Press, Madison.

Avramidis, P., K. Nikolaou and V. Bekiari. 2015. Total organic carbon and total nitrogen in sediments and soils: A comparison of the wet oxidation – titration method with the combustion-infrared method. Agriculture and Agricultural Science Procedia 4: 425-430.

Bisutti, I., I. Hilke and M. Raessler. 2004. Determination of total organic carbon-an overview of current methods. TrAC Trends in Analytical Chemistry 23(10-11): 716-726.

Chaudhari, P.R., D.V. Ahire, V.D. Ahire, M. Chkravarty and S. Maity. 2013. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. International Journal of Scientific and Research Publications 3(2): 1-8.

Chen, L., D.F.B. Flynn, X. Jing, P. Kühn, T. Scholten and J.S. He. 2015. A comparison of two methods for quantifying soil organic carbon of alpine grasslands on the Tibetan plateau. PLOS ONE 10(5): e0126372, doi: 10.1371/journal.pone.0126372.

Christensen, B.T. and P.A. Malmros. 1982. Loss-on-ignition and carbon content in a beech forest soil profile. Holarctic Ecology 5(4): 376-380.

FAO. 2019. Standard operating procedure for soil total carbon: Dumas dry combustion method. (Online). Available: https://www.fao.org/3/ca7781en/ca7781en.pdf (September 13, 2022).

Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. pp. 383-441. *In*: A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Soil Science Society of America, Inc. Press, Madison.

Grigal, D.F. and L.F. Ohmann. 1992. Carbon storage in upland forests of the lake states. Soil Science Society of America Journal 56(3): 935-943.

IITA. 1979. Selected Methods for Soil and Plant Analysis. Manual Series No.1. IITA (International Institute for Tropical Agriculture), Ibadan. 57 p.

Jones, J.B. 2001. Laboratory Guides for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton, 384 p.

Konare, H., R.S. Yost, M. Doumbia, G.W. McCarty, A. Jarju and R. Kablan. 2010. Loss on ignition: Measuring soil organic carbon in soils of the Sahel, West Africa. African Journal of Agricultural Research 5(22): 3088-3095.

Land Development Department. 2005. The Miracle of Soil Series: Office of Soil Resources Survey and Research. Land Development Department, Bangkok. 137 p. (in Thai)

Land Development Department. 2010. Manual of physical analysis process operations. (Online). Available: https://www.ldd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-04.pdf (September 13, 2022). (in Thai)

LECO Corporation. 2016. Operation. TruMac CNS/NSCarbon/Nitrogen/Sulfur Determinators. Instruction Manual. LECO Corporation, LECO Europe B.V., Netherlands. 56 p.

National Soil Survey Center. 1996. Soil Survey Laboratory Method Manual. Soil survey investigation report No. 42. National Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture, Washington, DC, 735 p.

Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Chapter 34 total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 961-1010. *In*: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner (eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc. and

American Society of Agronomy, Inc., Madison.

Patharadilok, H. 2013. Soil Water and Fertilizers. 2nd ed. *In*: A. Jittaladakorn, P. Dittakit, H. Patharadilok, Y. Osotsapar, C. Thongjoo, N. Tawinte, W. Sueadee, S. Yampracha, S. Prakunhungsit, S. Hungspruke, K. Mingsiritham S. Sukwut and A. Wongmaneeroj (eds.). Sukhothai Thammathirat Open University, Bangkok. 403 p. (in Thai)

Ramamoorthi, V. and S. Meena. 2018. Quantification of soil organic carbon - comparison of wet oxidation and dry combustion methods. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 7(10): 146-154.

Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No. 60. United States Department of Agriculture, Washington, D.C. 160 p.

Rowell, M.J. and M.E. Coetzee. 2003. The measurement of low organic matter contents in soils. South African Journal of Plant and Soil 20(2): 49-53.

Saldaña-Villota, T.M. and J.M. Cotes-Torres. 2021. Comparison of statistical indices for the evaluation of crop models performance. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 74(3): 9675-9684.

Stevenson, F.J. 1994. Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York. 512 p.

Sutherland, R.A. 1998. Loss-on-ignition estimates of organic matter and relationships to organic carbon in fluvial bed sediments. Hydrobiologia 389(1-3): 153-167.

Suwannaoin, P. 2007. The comparison study of organic carbons among different soils and their correction factors determinations of Walkley-Black methods using day combustion techniques. M.S. Thesis. Silpakorn University, Bangkok. 80 p. (in Thai)

Syers, J.K., A.S. Campbell and T.W. Walker. 1970. Contribution of organic carbon and clay to cation exchange capacity in a chronosequence of sandy soils. Plant and Soil 33: 104-112.

Ulmer, M.G., L.J. Swenson, D.D. Patterson and W.C. Dahnke. 1992. Organic carbon determination by the Walkley-Black, Udy dye, and dry combustion methods for selected North Dakota soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 23(3-4): 417-429.

van Noordwijk, M., C. Cerri, P.L. Woomer, K. Nugroho and M. Bernoux. 1997. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. Geoderma 79(1-4): 187-225.

Walkley, A.J. and I.A. Black. 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. Soil Science 37: 29-38.

Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society 63(11): 1309-1313.

Zhong, Z., Z. Chen, Y. Xu, C. Ren, G. Yang, X. Han, G. Ren and Y. Feng. 2018. Relationship between soil organic carbon stocks and clay content under different climatic conditions in central China. Forests 9: 1-14.