

ผลตกค้างของโซเดียมเบนทอนไต์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดิน การเจริญเติบโต  
และผลผลิตของข้าวชาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด

Residual Effects of Na-Bentonite on Changes in Soil Properties, Growth  
and Yield of Khao Dawk Mali 105 Aromatic Rice Grown in an Acid Sulfate Soil

กาญจนา สร้อยทอง<sup>1</sup> เฉลิมชาติ วงศ์ลีเจริญ<sup>1,\*</sup> วรชาติ วิศวพิพัฒน์<sup>1</sup> ดาวจรัส เกตุโรจน์<sup>1</sup> ราชิต สราทรพันธุ์<sup>2</sup>  
กิตติพล จิตตานุกูล<sup>2</sup> และ เสาวนุช ถาวรพฤษ<sup>1</sup>

Kanjana Sroytong<sup>1</sup>, Chalermchart Wongleecharoen<sup>1,\*</sup>, Worachart Wisawapipat<sup>1</sup>, Daojarus Ketrot<sup>1</sup>,  
Rachit Sattapun<sup>2</sup>, Kittipon Chittanukul<sup>2</sup> and Saowanuch Tawornpreuk<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ฝ่ายจัดการสิ่งแวดล้อมโครงการ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ 10900

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

<sup>2</sup> Project Environmental Management Department, PTT Public Company Limited, Bangkok 10900

รับเรื่อง: 4 กรกฎาคม 2564 Received: 4 July 2021

ปรับปรุง: 9 สิงหาคม 2564 Revised: 9 August 2021

รับตีพิมพ์: 13 สิงหาคม 2564 Accepted: 13 August 2021

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

**ABSTRACT:** Sodium bentonite mud leftover from the natural gas pipeline construction process has high alkaline properties and can be used to improve acid sulfate soils. It has a high sodium content which may increase the aroma of rice. This study investigated the residual effect of Na-bentonite utilization on changes in soil properties, growth, and yield of Khao Dawk Mali 105 aromatic rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) grown in acid sulfate soil. The KDML 105 rice was planted after harvesting RD43 rice (*Oryza sativa* L., cv. RD43) in the same experimental plots under randomized complete block design (RCBD) with four replicates and four treatments, namely, no soil conditioner application (Control), Na-bentonite application at the rate of 93.6 t rai<sup>-1</sup> (NaB), a combination of Na-bentonite (46.8 t rai<sup>-1</sup>) and dolomite (1 t rai<sup>-1</sup>) application (NaB+DL), and dolomite application at the rate of 2 t rai<sup>-1</sup> (DL), but no soil conditioners were applied in this growing season. The results showed that applying Na-bentonite (NaB and NaB+DL) increased soil pH after the rice harvest which was significantly higher than control and DL ( $P < 0.05$ ). It also significantly decreased lime requirement compared to control and DL ( $P < 0.05$ ). The highest cation exchange capacity, available phosphorus, and available potassium were observed in NaB followed by NaB+DL, DL and control, respectively. The lowest extractable aluminum and sulfate were observed in NaB. In NaB and NaB+DL, soil electrical conductivity and sodium adsorption ratio tended to decrease after the rice harvest. The growth, grain weight, tillering, panicle number, filled grain, straw dry weight, aboveground biomass, and 2-acetyl-1-pyrroline concentration of rice in NaB, NaB+DL, and DL were not statistically different (The rice

plants in control died within 2 weeks after transplanting). This study reveals that the utilization of Na-bentonite as a soil conditioner for acid sulfate soil provides the residual effects on plant nutrients and soil pH stabilization, favoring the rice cultivated in the subsequent season.

**Keywords:** Na-bentonite, acid sulfate soil, Rangsit soil series, Khao Dawk Mali 105 (KDML 105) rice, rice aroma

Agricultural Sci. J. (2021) Vol. 52(2): 142–163

ว. วิทย์. กษ. (2564) 52(2): 142–163

## บทคัดย่อ

โคลนโซเดียมเบนทอไนต์ที่หลงเหลือจากกระบวนการก่อสร้างท่อส่งก๊าซธรรมชาติ มีสมบัติที่เป็นต่างสามารถใช้ปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด และมีปริมาณโซเดียมสูง ซึ่งอาจทำให้ความหอมของข้าวเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลตกค้างของโซเดียมเบนทอไนต์ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด โดยทดลองปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในแปลงทดลองเดิมต่อเนื่องจากการปลูกข้าวพันธุ์ กข43 ภายใต้แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) จำนวน 4 ซ้ำ ประกอบด้วย 4 ตำรับการทดลอง ได้แก่ ไม่ใส่วัสดุปรับปรุงดิน (Control) ใส่โซเดียมเบนทอไนต์อัตรา 93.6 ตันต่อไร่ (NaB) ใส่โซเดียมเบนทอไนต์อัตรา 46.8 ตันต่อไร่ ร่วมกับโดโลไมต์อัตรา 1 ตันต่อไร่ (NaB+DL) และใส่โดโลไมต์อัตรา 2 ตันต่อไร่ (DL) โดยไม่มีการใส่วัสดุปรับปรุงดินเพิ่มเติมในฤดูปลูกนี้ ผลการศึกษพบว่า การใส่โซเดียมเบนทอไนต์ (NaB และ NaB+DL) ทำให้พีเอชของดินหลังปลูกเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงกว่า control และ DL อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) และทำให้ค่าความต้องการปูนของดินลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ control และ DL ( $P < 0.05$ ) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ใน NaB มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ NaB+DL, DL และ control ตามลำดับ ปริมาณอะลูมิเนียมและซัลเฟตที่สกัดได้ต่ำที่สุดใน NaB

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิมด้วยน้ำและอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมของดินใน NaB และ NaB+DL มีแนวโน้มลดลงหลังปลูก ส่วนการเจริญเติบโต น้ำหนักเมล็ด การแตกกอ จำนวนรวงตอกอเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ น้ำหนักตอชั่งแห้ง มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และสารให้ความหอม (2-acetyl-1-pyrroline) ของข้าวใน NaB, NaB+DL และ DL ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (Control ข้าวตายภายใน 2 สัปดาห์ หลังปลูก) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้โซเดียมเบนทอไนต์เป็นสารปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดยังคงมีผลตกค้างด้านธาตุอาหารพืชและการรักษาระดับพีเอชของดินที่ส่งผลดีต่อข้าวในฤดูปลูกถัดไป

**คำสำคัญ:** โซเดียมเบนทอไนต์, ดินเปรี้ยวจัด, ชุดดินรังสิต, ข้าวขาวดอกมะลิ 105, ความหอมของข้าว

## บทนำ

ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวที่ได้รับความนิยมบริโภคอย่างมากในประเทศไทย ลักษณะเด่นคือ ทนแล้ง เมล็ดข้าวสารใส แกร่ง คุณภาพการสีดี คุณภาพการหุงต้มดี อ่อนนุ่ม และมีกลิ่นหอม (Rice Department, 2020) เนื่องจากกลิ่นหอมเป็นลักษณะที่สำคัญส่งผลให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นที่ต้องการในกลุ่มผู้บริโภคและสามารถจำหน่ายได้ราคาสูง โดยกลิ่นหอมของข้าวมีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับปริมาณสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) ที่เป็น

องค์ประกอบของสารระเหยในความหอมของข้าว (Ishitani and Fushimi, 1994) และจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความเครียดของข้าว (Pongwichian *et al.*, 2009) โดย Lutts *et al.* (1996) รายงานว่า ความเครียดเนื่องจากความเค็มของดินมีผลทำให้ปริมาณสาร 2AP ในเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Gay *et al.* (2010) ที่รายงานว่า ความหอมของเมล็ดข้าวจะแปรปรวนตามความเค็มของดิน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสาร 2AP เป็นผลจากความเครียดจากความเค็มของดินในระยะก่อนออกดอกของข้าว นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่า การใส่โซเดียมคลอไรด์ทุกอัตรา (1.16–2.89 กรัมโซเดียมคลอไรด์ต่อกิโลกรัมดิน) ลงในดิน ส่งผลให้น้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 และน้ำหนักแห้ง 1,000 เมล็ด ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในกระถางลดลง ส่วนการใส่เกลือโซเดียมคลอไรด์ในอัตราต่ำ 1.16 กรัมโซเดียมคลอไรด์ต่อกิโลกรัมดิน ส่งผลให้ข้าวมีปริมาณสาร 2AP สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ไม่มีการใส่โซเดียมคลอไรด์ แต่ปริมาณสาร 2AP กลับมีปริมาณลดลง เมื่อมีการใส่โซเดียมคลอไรด์ในอัตราที่สูงขึ้น (Kongpun *et al.*, 2020)

ดินเปรี้ยวจัดหรือดินกรดกำมะถัน (Acid sulfate soil) จัดเป็นดินที่มีปัญหาเนื่องจากมีความเป็นกรดรุนแรง ส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช ความเป็นพิษของธาตุโลหะ และการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทยมีการใช้พื้นที่ดินเปรี้ยวจัดในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลาง (เนื้อที่ประมาณ 5 ล้านไร่) บางส่วน สำหรับการปลูกข้าวมาอย่างยาวนานหลายทศวรรษ โดยหากมีการปรับปรุงดินด้วยวิธีการต่าง ๆ อย่างเหมาะสม เช่น การชะล้างดิน การขังน้ำ การใส่ปุ๋ย และการใส่ปูน จะทำให้ข้าวมีผลผลิตเพิ่มขึ้น (Attanandana, 2007) ซึ่งการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด โดยการใส่ปูนตามปริมาณความต้องการปูนของดินจัดเป็นวิธีการที่สะดวกและสามารถปรับค่าพีเอชของดินให้สูงขึ้นได้ (Land Development Department, 2020)

ความต้องการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการขยายตัวของสังคมเมืองและการพัฒนาของประเทศ โดยเฉพาะก๊าซธรรมชาติที่มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าและในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อทดแทนการใช้ถ่านหินและน้ำมัน ซึ่งมีราคาสูง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ (Energy Policy and Planning Office, 2016) ดังนั้น บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) จึงมีแผนการดำเนินโครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติบนบกเพื่อรองรับความต้องการที่สูงขึ้น โดยการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติด้วยวิธีเจาะลอด (Horizontal directional drilling, HDD) มีการใช้โซเดียมเบนทอนไนด์เป็นวัสดุหล่อลื่นหัวเจาะ (Khongchai *et al.*, 2020) ทำให้มีโคลนโซเดียมเบนทอนไนด์ที่ผ่านการใช้งานหลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมากหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ปัจจุบันพบว่ามี การนำเบนทอนไนด์มาใช้ยกระดับพีเอชของดิน และได้ผลใกล้เคียงกับการใช้วัสดุปูน (Gratchev *et al.*, 2012) นอกจากนั้น เบนทอนไนด์จัดเป็นแร่พืดยุग्มีในกลุ่มสมกโทต์ สามารถดูดซับปรอทและแคดเมียมได้ (Sun *et al.*, 2015) และยังสามารถให้ข้าวมีผลผลิตเมล็ดและชีวมวลส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น (Mi *et al.*, 2017) ทั้งนี้ เบนทอนไนด์ที่มีไอออนของโซเดียมแทรกเข้าไปดูดซับอยู่ที่ผิวภายในหีบของแร่ในดินจะเรียกว่า โซเดียมเบนทอนไนด์ (Na-bentonite) สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวดูดซับโมเลกุลน้ำและแคดไอออนได้มาก ทำให้มีอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้สูงและเป็นต่างจัดมาก (Zhou and Keeling, 2013; Tharajaroen and Pichitkul, 2018) ส่งผลให้มีศักยภาพในการใช้เป็นสารปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด สอดคล้องกับการศึกษาของ Wongleecharoen *et al.* (2020) ที่พบว่า โซเดียมเบนทอนไนด์มีค่าพีเอชเป็นด่างรุนแรง เท่ากับ 9.74 มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อ้อมด้วยน้ำ เท่ากับ 1.43 เดซิซีเมนต่อเมตร มีอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมและอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้สูงมาก เท่ากับ 28.8 และ 67.6 ตามลำดับ มีปริมาณโซเดียม

แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ เท่ากับ 70.5 25.0 และ 14.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีปริมาณไนโตรเจนรวม 0.39 กรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ประมาณ 4.6 และ 279.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และสรุปผลการทดลองว่า การใช้โซเดียมเบนโทไนต์หรือโดโลไมต์เพียงอย่างเดียวหรือใช้วัสดุทั้ง 2 ร่วมกันในการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินรังสิต) สามารถยกระดับพีเอชและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินให้สูงขึ้น และลดระดับความเป็นพิษของโลหะในดิน ส่งผลให้ข้าวสามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ แต่ยังพบว่ามีความเสียหายที่ละลายได้ในดินหลังปลูกสูงมาก ซึ่งอาจมีผลตกค้างและกระทบต่อข้าวที่ปลูกในฤดูถัดไป นอกจากนี้ ผลตกค้างของวัสดุปรับปรุงดินที่ใช้ในการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดจะมีมากขึ้นแตกต่างกันไป และผันแปรไปตามชนิดของวัสดุปรับปรุงดิน ลักษณะของดิน และสภาพภูมิอากาศ (Attanandana, 2007) ทั้งนี้ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษามูลค่าของการใช้วัสดุปูนเกษตร (Agricultural liming material) ในการปรับปรุงดินกรดประเภทต่าง ๆ เป็นหลัก และยังขาดข้อมูลเกี่ยวกับผลตกค้างของการใช้โซเดียมเบนโทไนต์เป็นสารปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษามูลค่าของโซเดียมเบนโทไนต์ที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินเปรี้ยวจัด การเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด โดยเป็นการวิจัยต่อเนื่องในแปลงทดลองเดิมต่อการทดลองของ Wongleecharoen *et al.* (2020) ที่ศึกษาผลของการใส่โซเดียมเบนโทไนต์ต่อสมบัติดินและข้าวพันธุ์ กข43 ที่ปลูกในพื้นที่ดินเปรี้ยวจัด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำโซเดียมเบนโทไนต์ไปใช้ประโยชน์สำหรับการปลูกข้าวต่อไป

## อุปกรณ์และวิธีการ

### การวางแผนการทดลอง

ทำการทดลองปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในแปลงทดลองเดิมต่อการทดลองของ Wongleecharoen *et al.* (2020) ที่ศึกษาผลของการใช้โซเดียมเบนโทไนต์และโดโลไมต์เป็นสารปรับปรุงดินต่อสมบัติดินและผลผลิตของข้าวพันธุ์ กข43 ภายใต้โครงการฟาร์มสร้างสุขรามาริบัติ ตำบลหนองสามวัง อำเภอนองเสือ จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นชุดดินรังสิต (Rangsit soil series: Very-fine, mixed, semiactive, acid, isohyperthermic Sulfic Endoaquepts) (Land Development Department, 2021) โดยใช้แผนการทดลองแบบเดิม คือ สุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) จำนวน 4 ซ้ำ ประกอบด้วย 4 ดำรับการทดลองเดิมเพื่อศึกษามูลค่าของวัสดุปรับปรุงดิน (ไม่มีการเติมวัสดุปรับปรุงดินในการทดลองครั้งนี้) ดังนี้ ดำรับการทดลองที่ 1 ใส่ปุ๋ยเคมีในอัตราแนะนำแต่ไม่ใส่วัสดุปรับปรุงดิน (Control) ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีในอัตราแนะนำรวมกับการปรับสภาพดินโดยใช้โซเดียมเบนโทไนต์อัตรา 93.6 ตันต่อไร่ (NaB) ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยเคมีในอัตราแนะนำรวมกับการปรับสภาพดินโดยใช้โซเดียมเบนโทไนต์อัตรา 46.8 ตันต่อไร่ และโดโลไมต์อัตรา 1/2 เท่าของค่าความต้องการปุ๋ยเท่ากับ 1 ตันต่อไร่ (NaB+DL) และดำรับการทดลองที่ 4 ใส่ปุ๋ยเคมีในอัตราแนะนำรวมกับการปรับสภาพดินโดยใช้โดโลไมต์อัตราตามค่าความต้องการปุ๋ยเท่ากับ 2 ตันต่อไร่ (DL)

อัตราของโซเดียมเบนโทไนต์ คำนวณจากการวิเคราะห์ค่า pH buffering capacity ของดิน (Chittamart *et al.*, 2018) และอัตราของโดโลไมต์ คำนวณจากค่าความต้องการปุ๋ยของดิน ซึ่งเป็นอัตราที่คาดว่าจะสามารถยกระดับพีเอชของดินให้เท่ากับ 6 (Wongleecharoen *et al.*, 2020) และทำการใส่ก่อนปักดำข้าวพันธุ์ กข43 ประมาณ 42 วัน ส่วนการทดลอง

ครั้งนี้เป็นการศึกษาผลตกค้างของการใส่วัสดุปรับปรุงดินภายหลังการปลูกข้าวไปแล้ว 1 ฤดูปลูก ตามอัตราที่แตกต่างกันในแต่ละตำรับการทดลอง จึงไม่มีการใส่วัสดุปรับปรุงดินทั้ง 2 ชนิด เพิ่มเติมลงในแปลงทดลอง โดยแปลงทดลองย่อยมีขนาด  $4 \times 5$  ตารางเมตร จำนวนทั้งสิ้น 16 แปลง และเตรียมดินโดยการไถและไถแปรให้อยู่ในสภาพดินนา จากนั้น ปักดำกล้าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 อายุประมาณ 3 สัปดาห์ โดยใช้ระยะระหว่างต้น 25 เซนติเมตร และระหว่างแถว 25 เซนติเมตร และใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน (Rice Department, 2019) ในอัตรา 6-6-3 กิโลกรัม  $N-P_2O_5-K_2O$  ต่อไร่ เท่ากันทุกตำรับการทดลอง โดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ดังนี้ ครั้งที่ 1 ใส่ที่ระยะ 10 วัน หลังปักดำกล้าข้าวในแปลงทดลอง โดยใช้ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) อัตรา 1.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยโดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) อัตรา 13.1 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) อัตรา 5.0 กิโลกรัมต่อไร่ และครั้งที่ 2 ใส่เพียงปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) อัตรา 6.6 กิโลกรัมต่อไร่ โดยใส่ที่ระยะการกำเนิดช่อดอก กำจัดวัชพืชโดยใช้แรงงานคน และรักษาระดับน้ำในแปลงทดลองไว้ที่ประมาณ 10-15 เซนติเมตร โดยอาศัยการให้น้ำผ่านระบบชลประทานในช่วงที่ปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอ จากนั้น ระบายน้ำออกก่อนเก็บเกี่ยวประมาณ 2 สัปดาห์ และเก็บเกี่ยวข้าวเมื่อมีอายุ 129 วัน หลังปักดำกล้าข้าวลงในแปลงทดลอง

### การเก็บตัวอย่างดินและการวิเคราะห์ทางเคมี

สุ่มเก็บตัวอย่างดินก่อนและหลังการทดลองการปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร โดยสุ่มเก็บดินจำนวน 5 จุดต่อแปลงย่อย แล้วนำมารวมกันเป็นตัวอย่างรวม (Composite sample) ของแต่ละแปลงย่อย จากนั้น ผึ่งดินให้แห้งในที่ร่ม แยกเศษซากพืช บดตัวอย่างดิน และนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 และ 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีตามวิธีการวิเคราะห์ดินมาตรฐาน (Attanandana and Chanchareonsook,

2008) ได้แก่ พีเอชดิน (Soil pH) ในอัตราส่วนดินต่อน้ำ เท่ากับ 1 : 1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) โดยวิธี Walkley and Black titration ความต้องการปูน (Lime requirement, LR) โดยใช้วิธี Woodruff buffer (pH 7.0) ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total nitrogen) โดยวิธี Kjeldahl method ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus) โดยใช้น้ำยาสกัด Bray II แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ปริมาณโซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียมที่สกัดได้ (Extractable Na, Ca, Mg and K) และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available potassium) โดยการสกัดด้วย 1 M  $NH_4OAc$  (pH 7.0) แล้ววัดด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange capacity, CEC) โดยวิธี 1 M  $NH_4OAc$  (pH 7.0) ปริมาณซัลเฟตที่สกัดได้ (Extractable sulfate) โดยวิธี turbidimetric method และวัดความขุ่นของตะกอน  $BaSO_4$  ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Electrical conductivity at saturation extract,  $EC_e$ ) ด้วยเครื่อง electrical conductivity meter (Kargas *et al.*, 2018) ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ (Extractable iron) โดยสกัดด้วยวิธี citrate-bicarbonate-dithionite แล้ววัดด้วยเครื่อง AAS (Fan *et al.*, 2016) ปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้ (Extractable aluminum) ด้วยน้ำยาสกัด 1 M KCl แล้ววัดด้วยเครื่อง inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) (Perez *et al.*, 2009) อัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable sodium percentage, ESP) โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณโซเดียมที่สกัดได้กับค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Levy and Shainberg, 2005) และอัตราส่วนการดูดซับโซเดียม (Sodium adsorption ratio, SAR) ได้จากการนำสารละลายดินที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated



extract) ไปหาปริมาณโซเดียม แคลเซียม และ แมกนีเซียมที่ละลายน้ำได้ ด้วยเครื่อง AAS แล้วคำนวณ เป็นอัตราส่วนระหว่างโซเดียมที่ละลายน้ำได้กับ แคลเซียมและแมกนีเซียมที่ละลายน้ำได้ (United States Salinity Laboratory Staff, 1954)

### การเก็บเกี่ยวข้าวและการวิเคราะห์สารหอม

เก็บเกี่ยวข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อายุ 129 วัน หลังปักดำ โดยเก็บเกี่ยวในพื้นที่ขนาด 2 x 2 ตารางเมตร บริเวณส่วนกลางของแต่ละแปลงย่อย และ บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว โดยการสุ่มตัวอย่างข้าวในพื้นที่เก็บเกี่ยว จำนวน 10 กอต่อแปลงย่อย และบันทึกข้อมูล ดังนี้ 1) ความสูง โดยวัดความสูงลำต้นจากโคนต้นจนถึงปลายยอด 2) การ

แตกกอ โดยการนับจำนวนหน่อของข้าวในแต่ละกอ 3) จำนวนรวงต่อกอ โดยการนับจำนวนรวงของข้าวในแต่ละกอ 4) น้ำหนักตอซังแห้ง โดยการนำตัวอย่างตอซังส่วนเหนือดินหลังผ่านการสีแยกเมล็ดข้าวออกแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ จากนั้น จึงชั่งน้ำหนักและคำนวณเป็นน้ำหนักต่อไร่ 5) น้ำหนักรากแห้ง โดยเก็บตัวอย่างรากข้าวมาล้างทำความสะอาด อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ จึงชั่งน้ำหนักและคำนวณเป็นน้ำหนักต่อไร่ 6) น้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 โดยชั่งน้ำหนักและวัดความชื้นของเมล็ดข้าวด้วยเครื่อง Grain and Seed Moisture Tester Riceter F514 (Kett Electric Laboratory) และคำนวณหาน้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 (กิโลกรัมต่อไร่) ดังสมการ

$$\text{น้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14} = \frac{\text{น้ำหนักเมล็ดข้าวขณะวัดความชื้น} \times (100 - \text{ร้อยละความชื้นที่วัดได้จากเครื่องวัดความชื้น}) \times 1,600}{(100 - 14) \times \text{ขนาดพื้นที่เก็บเกี่ยว}}$$

จากนั้น บันทึก 7) มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน โดยคำนวณจากผลรวมของน้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 กับน้ำหนักตอซังแห้ง 8) เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างจำนวนเมล็ดดีกับจำนวนเมล็ดทั้งหมด (เมล็ดดี + เมล็ดลีบ) 9) น้ำหนักแห้ง 1,000 เมล็ด โดยนำเมล็ดข้าวดีที่ผ่านการอบแห้ง (น้ำหนักคงที่) มานับให้ได้ 1,000 เมล็ด แล้วทำการชั่งน้ำหนัก 10) อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเมล็ดกับตอซังแห้ง โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 กับน้ำหนักตอซังแห้ง และ 11) ดัชนีการเก็บเกี่ยว โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 กับมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน สำหรับการวัดปริมาณสารหอม 2AP ในเมล็ดข้าวกล้อง ด้วยเทคนิค gas chromatography (Mahatheeranont *et al.*, 2001) ดำเนินการโดยส่งตัวอย่างเมล็ดข้าวที่ผ่านการขัดสีและบดให้ละเอียดเป็นแป้งไปวิเคราะห์สารดังกล่าวที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลดินและข้าวที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลและหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี paired t-test สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลสมบัติของดินก่อนกับหลังปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในแต่ละดำรับการทดลอง และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) หรือ F-test ร่วมกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test สำหรับการเปรียบเทียบผลของดำรับการทดลองต่าง ๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะเก็บเกี่ยว และต่อสมบัติของดินในแต่ละรอบของการเก็บตัวอย่างดิน (ก่อนหรือหลังการปลูกข้าว) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) version 20

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ค่าพีเอช ความต้องการปูนของดิน การนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ อัตราส่วนการดูดซับโซเดียม ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้

ดินก่อนปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในตำรับการทดลองที่ไม่ใส่วัสดุปรับปรุงดิน (Control) เป็นกรดรุนแรงมากที่สุด โดยมีค่าพีเอชเท่ากับ  $3.11 \pm 0.19$  และเป็นกรดรุนแรงมากในตำรับการทดลองที่ใส่เฉพาะโดโลไมต์ (DL) ค่าพีเอชเท่ากับ  $3.87 \pm 0.27$  (Figure 1A) ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่จำกัดการเจริญเติบโตของข้าว ส่วนการใส่โซเดียมเบนโทไนต์เพียงอย่างเดียว (NaB) และโซเดียมเบนโทไนต์ร่วมกับโดโลไมต์ (NaB+DL) ยังคงมีผลตกค้างของการใส่วัสดุปรับปรุงดินก่อนหน้า ทำให้ค่าพีเอชของดินมีค่าสูงกว่า control และ DL อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดยมีค่าพีเอชเท่ากับ  $4.79 \pm 0.46$  และ  $4.67 \pm 0.57$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินก่อนและหลังปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่า พีเอชของดินหลังปลูกใน NaB, NaB+DL และ DL มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างกับดินก่อนปลูกอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ เนื่องจากโซเดียมเบนโทไนต์เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มสมกไทต์ (Smectite group) ที่สามารถแลกเปลี่ยนและดูดซับไอออนหรือโมเลกุลต่าง ๆ (Khongchai, 2018) ทำให้การปรับปรุงดินด้วยโซเดียมเบนโทไนต์ (NaB และ NaB+DL) สามารถช่วยรักษาระดับพีเอชของดินให้อยู่ในระดับที่สูงได้ และสามารถลดค่าความต้องการปูนของดินทั้งก่อนและหลังปลูกข้าวได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับ control และ DL (Figure 1B) อย่างไรก็ตาม พีเอชของดินหลังปลูกใน 3 ตำรับการทดลอง ที่มีการใส่วัสดุปรับปรุงดินมีค่าลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินตอนปักดำข้าวพันธุ์ กข43 ที่ใส่วัสดุปรับปรุงดิน

ไปในแปลงแล้วประมาณ 42 วัน ในการทดลองก่อนหน้านี้นี้ของ Wongleecharoen *et al.* (2020) ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 5.95 6.00 และ 5.24 สำหรับ NaB, NaB+DL และ DL ตามลำดับ ขณะที่ control มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 3.13 แสดงให้เห็นว่า ยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงดินเพื่อแก้ไขปัญหาดินเปรี้ยวจัดด้วยวิธีการต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เหมาะสมต่อการปลูกข้าว เช่น การขังน้ำ การชะล้าง การระบาย และการใส่ปูนเพิ่มเติม เป็นต้น (Attanandana, 2007)

การใส่วัสดุปรับปรุงดินที่แตกต่างกันทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ( $EC_e$ ) ของดินก่อนปลูกข้าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดย NaB+DL มีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำสูงที่สุด ( $6.20 \pm 0.81$  เดซิซีเมนต่อเมตร) ซึ่งใกล้เคียงกับ NaB ( $6.01 \pm 1.96$  เดซิซีเมนต่อเมตร) รองลงมาคือ DL ( $5.07 \pm 0.83$  เดซิซีเมนต่อเมตร) และ control ( $4.47 \pm 1.14$  เดซิซีเมนต่อเมตร) ตามลำดับ (Figure 1C) การใส่โซเดียมเบนโทไนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีแร่สมกไทต์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ซึ่งจัดเป็นแร่ดินเหนียวประเภท 2 : 1 ที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ง่าย เช่น  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  และ  $Na^+$  ดูดซับอยู่จำนวนมาก ดังนั้น เมื่อใส่ลงในดินย่อมส่งผลให้ดินมีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำสูงขึ้น (Kaufhold *et al.*, 2015; Weil and Brady, 2017) โดยค่าการนำไฟฟ้าของดินเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับความเค็มที่อาจมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช และเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้ในดิน อย่างไรก็ตาม ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นพืชทนต่อสภาพดินเค็มได้ดี (Rice Department, 2020) และมีรายงานว่าข้าวสามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดี แม้ดินบนจะมีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำมากถึง 20–25 เดซิซีเมนต่อเมตร (Attanandana, 2007) ทั้งนี้ ตำรับการทดลองที่มีการใส่โซเดียมเบนโทไนต์และโดโลไมต์มากขึ้นยังส่งผลทำให้ดินมีเกลือใน

สารละลายดินเพิ่มขึ้น ได้แก่  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  แต่เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินในการปลูกข้าวที่นานขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อ้อมตัวด้วยน้ำของดินหลังการปลูกข้าวมีแนวโน้มลดลงและมีค่าใกล้เคียงกับตอนหลังไถวัสดุปรับปรุงดินแล้ว 42 วัน ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.7–4.2 เดซิซีเมนต่อเมตร (Wongleecharoen *et al.*, 2020) ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนการดูดซับโซเดียม (SAR) ของดินก่อนและหลังการปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (Figure 1D) โดย NaB มีอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมสูงที่สุด รองลงมาเป็น NaB+DL ซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณของโซเดียมเบนทอนต์ที่ใช้เพิ่มขึ้น ทำให้มีอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมมากกว่า DL และ control และเมื่อเปรียบเทียบดินก่อนและหลังปลูกข้าว พบว่า ดินหลังปลูกใน NaB และ NaB+DL ยังคงมีอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมที่สูง แต่ยังต่ำกว่าเกณฑ์การจำแนกของดินที่จัดเป็นดินโซดิกและดินเค็มโซดิกที่มีอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมตั้งแต่ 13 ขึ้นไป (Soil Science Division Staff, 2017) โดยดินใน NaB จากการทดลองครั้งนี้มีอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมเฉลี่ย  $15.20 \pm 3.28$  และ  $11.74 \pm 2.95$  ในดินก่อนและหลังปลูก ตามลำดับ ซึ่งลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตอนหลังไถ 42 วัน ที่มีอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมสูงถึง 31.50 (Wongleecharoen *et al.*, 2020) ซึ่งการลดลงของทั้งค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อ้อมตัวด้วยน้ำและอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมอาจเป็นผลมาจากการชะล้างและการระบายน้ำในแปลงทดลอง ทำให้ดินมีปริมาณโซเดียมและเกลือต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้ลดลง (Attanandana, 2007)

ผลตกค้างของโซเดียมเบนทอนต์มีผลทำให้ดินก่อนการปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในดำรับการทดลองที่มีการใส่โซเดียมเบนทอนต์ทั้ง 2 ดำรับการทดลองมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) สูงกว่า control และ DL อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดยมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน  $50.0 \pm 4.0$  เซนติโมลต่อกิโลกรัม สำหรับ NaB และ  $41.6 \pm 0.6$  เซนติโมลต่อกิโลกรัม สำหรับ NaB+DL (Figure 1E) เช่น

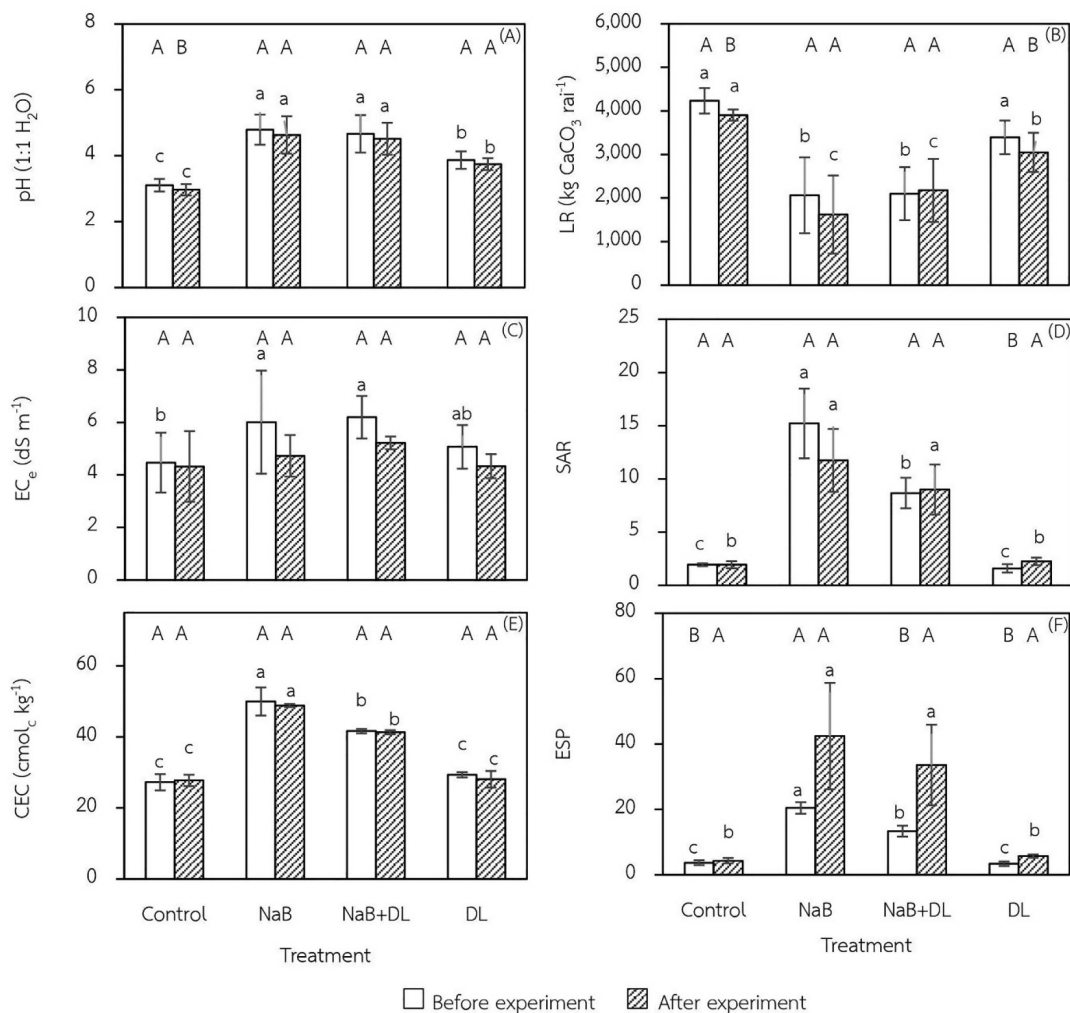
เดียวกับดินหลังการปลูกข้าว โดยดินในทั้ง 2 ดำรับการทดลอง ยังคงมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในระดับสูงมากและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราของโซเดียมเบนทอนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เบนทอนต์เป็นชื่อเรียกหิน ที่ส่วนใหญ่เป็นแร่ดินเหนียวพวกสมกไทต์ ซึ่งแร่ดินเหนียวโดยทั่วไปจะมีประจุลบที่เกิดจากขบวนการ isomorphous substitution และการแตกหักบริเวณขอบผลึก (Exposed crystal edges) อยู่มาก ทำให้สามารถดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกได้สูงหรือมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง โดยอาจมีค่ามากถึง 40–150 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (Murray, 2006; Weil and Brady, 2017) ดังนั้น การใช้โซเดียมเบนทอนต์จึงส่งผลให้ดินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงขึ้น

การที่โซเดียมเบนทอนต์มีโซเดียมเป็นองค์ประกอบที่สูงจึงส่งผลทำให้อัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ (ESP) ของดินเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่โซเดียมเบนทอนต์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงที่สุดใน NaB ( $20.4 \pm 1.8$  ในดินก่อนปลูก และ  $42.4 \pm 16.3$  ในดินหลังปลูก) รองลงมาคือ NaB+DL ( $13.4 \pm 1.7$  ในดินก่อนปลูก และ  $33.6 \pm 12.3$  ในดินหลังปลูก) โดยอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ของดินหลังปลูกมีค่าใกล้เคียงกับตอนหลังไถวัสดุปรับปรุงดินไปแล้ว 42 วัน ในการทดลองก่อนหน้านี้ของ Wongleecharoen *et al.* (2020) ที่พบว่า อัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ของดินมีค่าเท่ากับ 44.6 สำหรับ NaB และมีค่าเท่ากับ 31.4 สำหรับ NaB+DL ซึ่งอาจเนื่องมาจากการใส่โซเดียมเบนทอนต์ทำให้มีโซเดียมแทรกเข้าไปดูดซับอยู่ที่ผิวภายในหลักระหว่างชั้นของแร่ในดินเป็นจำนวนมาก ทำให้ดินมีอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้สูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sangkum (2009) ที่พบว่า การใส่โซเดียมเบนทอนต์ในอัตราที่มากขึ้นทำให้โซเดียมที่สกัดได้ในดิน ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน และอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งยังมีสหสัมพันธ์เชิงบวกแบบเอกโพเนนเชียลกับค่าพีเอชและอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมอีกด้วย (Khongchai, 2018) ทั้งนี้ การปรับปรุงดินด้วยโซเดียมเบนทอนต์เพียงอย่างเดียว (NaB) หรือร่วมกับโดโลไมต์ (NaB+DL) มีผลตกค้างทำให้ดินมี



อัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ control และ DL และอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงตามการจัดอันดับค่าอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ของดินและอันตรายที่เกิดจากโซดิก (Desertification Control in Asia and the Pacific, 1990; Khongchai,

2018) อย่างไรก็ตาม ข้าวจัดเป็นพืชที่ทนต่อระดับโซเดียมได้สูงและสามารถปลูกในดินที่มีอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 50 โดยไม่มีผลเสียต่อผลผลิต (Attanandana, 2007)

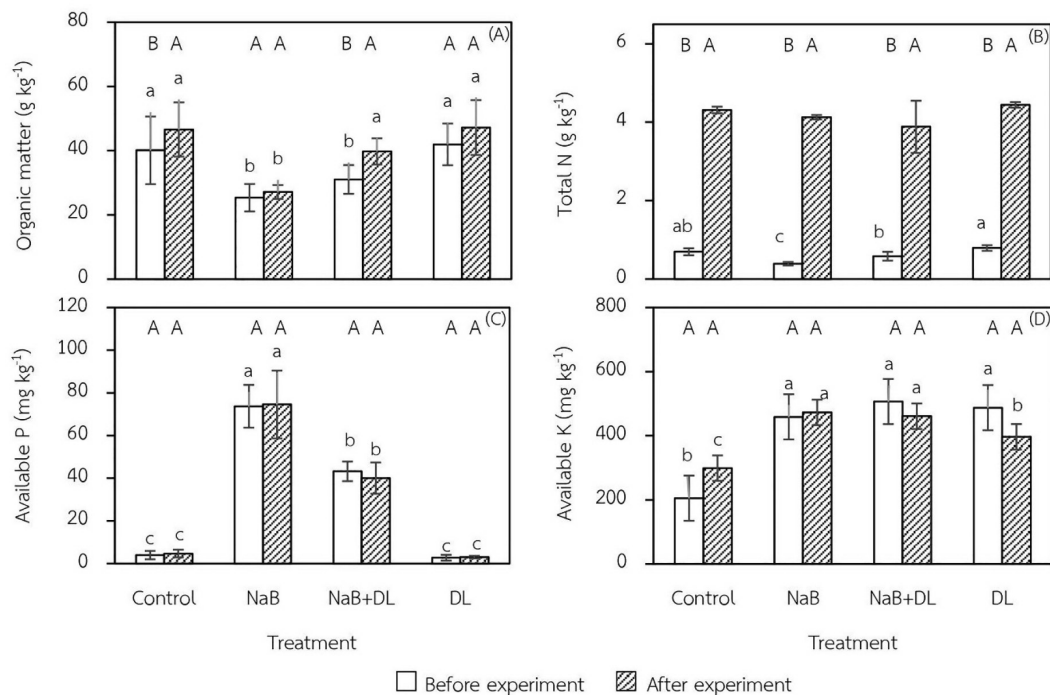


**Figure 1** Residual effects of Na-bentonite (NaB) and/or dolomite (DL) application on (A) pH, (B) lime requirement (LR), (C) electrical conductivity at saturation extract (EC<sub>e</sub>), (D) sodium adsorption ratio (SAR), (E) cation exchange capacity (CEC) and (F) exchangeable sodium percentage (ESP) in an acid sulfate soil. Error bars indicate standard deviation. Different small letters indicate significant difference (P < 0.05) of the treatments in each soil sampling time, while different capital letters indicate significant difference (P < 0.05) of two soil sampling times in each treatment

## ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด และ ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์

จากการวิเคราะห์ดินก่อนและหลังการปลูกข้าว พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 พบว่า การใส่วัสดุปรับปรุงดินที่ต่างกันมีผลทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดย control และ DL มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก และมากกว่าดินใน NaB และ NaB+DL (Figure 2A) โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของโซเดียมเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากผลของความเจือจาง (Dilution effect) จากการใส่โซเดียมเบนโทไนต์ในอัตราที่สูงมากใน NaB (93.6 ตันต่อไร่) และ NaB+DL (46.8 ตันต่อไร่) ทำให้ความเข้มข้นของอินทรีย์วัตถุในดินภายใต้การทดลองทั้ง 2 ลดลง และอาจเป็นผลร่วมจากการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ กข43 ที่ปลูกในการทดลองก่อนหน้า ซึ่งข้าวใน DL มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตที่สูงกว่า (Wongleecharoen *et al.*, 2020) ดังนั้น จึงมีเศษซากทิ้งไว้มาก ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่สูงกว่าใน NaB และ NaB+DL ส่วนดินใน control ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงอาจเป็นผลมาจากวัชพืชที่ขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น และค่าพีเอชของดินที่ต่ำอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในช่วงการทดลองปลูกข้าวพันธุ์ กข43 ทำให้การย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์เกิดขึ้นช้ากว่าและมีเหลือสะสมอยู่มากในดิน (Attanandana, 2007) เมื่อเปรียบเทียบกับดิน

ก่อนและหลังปลูกข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 พบว่า ดินหลังปลูกมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่าดินก่อนปลูก เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในดิน ประกอบด้วย ซากพืชและสัตว์ที่อยู่ระหว่างการสลายตัวในระยะต่าง ๆ รวมทั้งฮิวมัสในดิน เซลล์ของจุลินทรีย์ สารประกอบต่าง ๆ ที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ขึ้น และสารประกอบที่มีคาร์บอนอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน (Attanandana and Chanchareonsook, 2008) ดังนั้น การย่อยสลายของชิ้นส่วนข้าว (รากและส่วนเหนือดินที่ร่วงหล่น) ในแปลงระหว่างฤดูปลูก จึงทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น และอาจส่งผลให้ดินมีปริมาณไนโตรเจนรวมของดินหลังปลูกข้าวในระดับสูงมาก ซึ่งสูงกว่าดินก่อนปลูกที่มีปริมาณไนโตรเจนรวมในระดับปานกลาง (Figure 2B) ทั้งนี้ โซเดียมเบนโทไนต์และโดโลไมต์ที่ใช้ในการทดลองมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในระดับต่ำ (Wongleecharoen *et al.*, 2020) และอาจไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนรวมในดิน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนในดินส่วนใหญ่ อาจเป็นผลจากการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ในแปลง การใส่ปุ๋ย น้ำฝน และการตรึงก๊าซไนโตรเจนจากอากาศโดยพวกจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดิน ซึ่งมักมีประโยชน์และมีความสำคัญในแง่ของการเพิ่มไนโตรเจนให้แก่ดินน้ำขังมากกว่าดินทั่วไป (Attanandana, 2007)



**Figure 2** Residual effects of Na-bentonite (NaB) and/or dolomite (DL) application on (A) organic matter, (B) total nitrogen (N), (C) available phosphorus (P) and (D) available potassium (K) in an acid sulfate soil. Error bars indicate standard deviation. Different small letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) of the treatments in each soil sampling time, while different capital letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) of two soil sampling times in each treatment

โซเดียมเบนทอไนต์ยังคงมีผลตกค้างทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ใน NaB และ NaB+DL อยู่ในระดับสูงมาก และมากกว่าใน control และ DL อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) (Figure 2C) ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าพีเอชของดินในสภาพดินเปรี้ยวจัดที่มีค่าพีเอชต่ำมาก ฟอสเฟตไอออนจะถูกตรึงโดยไอออนบวกที่ละลายได้ ได้แก่  $Fe^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  และ hydrous oxide ของเหล็กและอะลูมิเนียม และจะค่อย ๆ ลดปริมาณการตรึงลงเมื่อพีเอชของดินสูงขึ้น (Weil and Brady, 2017) โดยการลดความแข็งแรงของพันธะในการตรึงของฟอสฟอรัสกับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (Masulili *et al.*,

2010) ด้วยเหตุนี้ การใช้โซเดียมเบนทอไนต์ที่มีความเป็นด่างสูงจึงสามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้ และทำให้ดินยังคงสามารถรักษาระดับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินได้อย่างยาวนานอีกด้วย (Wongleecharoen *et al.*, 2020) สำหรับปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available K) ของดินก่อนและหลังการปลูกข้าวมีค่าสูงมากในทุกตำรับการทดลอง (Figure 2D) โดยตำรับการทดลองที่ใส่วัสดุปรับปรุงดินทั้ง 3 ตำรับการทดลองมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สูงกว่า control ( $P < 0.05$ ) นอกจากนี้ ดินหลังปลูกข้าวใน NaB และ NaB+DL ยังมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สูงกว่า DL ( $P < 0.05$ ) ด้วย แสดงให้เห็นว่า ผลตกค้าง

ของโซเดียมเบนทอไนต์สามารถช่วยให้ดินมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่มีผลตกค้างของโดโลไมต์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากโซเดียมเบนทอไนต์เป็นวัสดุที่มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง (Murray, 2006) และมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 280 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Wongleecharoen *et al.*, 2020) ดังนั้น เมื่อใส่ลงดินจึงทำให้ดินมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์สูงขึ้น ทั้งจาก  $K^+$  ที่ปลดปล่อยจากโซเดียมเบนทอไนต์โดยตรงและจากการที่แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ในโซเดียมเบนทอไนต์เข้าไปไล่ที่  $K^+$  ที่ดูดซับอยู่ในดินเดิมออกมาอีกทางหนึ่ง (Weil and Brady, 2017) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนปลูกข้าว พบว่า ดินยังคงรักษาระดับปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินได้จนถึงหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวขาวดอกมะลิ 105 เช่นเดียวกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้โซเดียมเบนทอไนต์เป็นสารปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดยังคงมีผลตกค้างด้านธาตุอาหารพืชที่ส่งผลดีต่อข้าวที่ปลูกในฤดูต่อมา

#### ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมที่สกัดได้

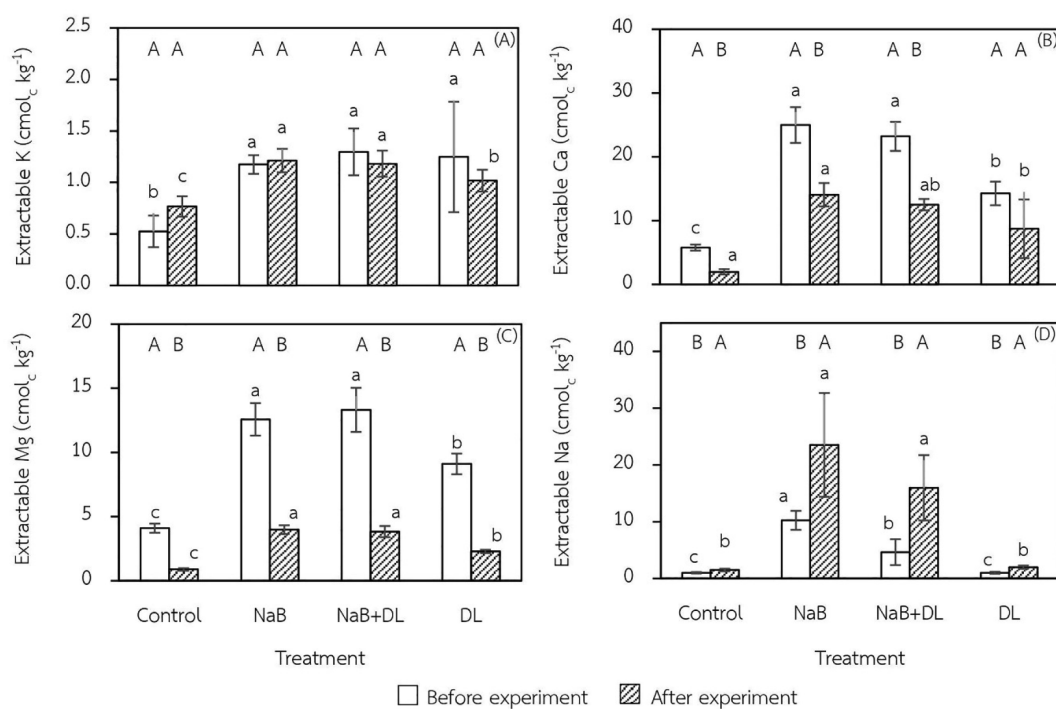
ก่อนการปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ของดินใน NaB, NaB+DL และ DL มีค่าสูงกว่าดินใน control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ขณะที่ ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ของดินใน NaB และ NaB+DL มีค่าสูงกว่าดินใน control และ DL ( $P < 0.05$ ) สำหรับปริมาณโซเดียมที่สกัดได้ มีค่าสูงที่สุดใน NaB ( $10.2 \pm 1.7$  เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับดินในตำรับการทดลองอื่น ( $P < 0.05$ ) และเมื่อเปรียบเทียบกับตอนใส่วัสดุปรับปรุงดินไป 42 วัน ในการทดลองก่อนหน้านี้ พบว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นใน NaB จาก 0.8 เป็น 1.2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ใน NaB+DL จาก 0.9 เป็น 1.3 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และใน DL จาก 0.9 เป็น 1.2 เซน

ติโมลต่อกิโลกรัม ปริมาณแคลเซียมที่สกัดได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกตำรับการทดลอง จากค่าระหว่าง 2.2–17.5 เป็น 5.8–25.0 เซนติโมลต่อกิโลกรัม สำหรับปริมาณแมกนีเซียมที่สกัดได้มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยใน control จาก 2.0 เป็น 4.1 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และใน NaB จาก 11.6 เป็น 12.6 เซนติโมลต่อกิโลกรัม แต่ลดลงเล็กน้อยใน NaB+DL จาก 14.8 เป็น 13.3 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และลดลงอย่างมากใน DL จาก 17.5 เป็น 9.1 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ขณะที่ ปริมาณโซเดียมที่สกัดได้ลดลงอย่างมากใน NaB จาก 22.6 เป็น 10.2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และใน NaB+DL จาก 15.1 เป็น 4.6 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (Wongleecharoen *et al.*, 2020) แสดงให้เห็นว่า โซเดียมจากโซเดียมเบนทอไนต์และแมกนีเซียมจากโดโลไมต์อาจถูกชะล้างออกไปโดยน้ำที่ระบายออกจากแปลง (Attanandana, 2007) หรือพืชอาจดูดใช้แมกนีเซียมไปบางส่วน

ผลตกค้างของโซเดียมเบนทอไนต์มีผลทำให้ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมที่สกัดได้ของดินหลังการปลูกข้าวใน NaB และ NaB+DL ยังคงมีค่าสูงที่สุด (Figures 3A–D) โดยมีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่มีผลตกค้างของโดโลไมต์เพียงอย่างเดียว (DL) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินก่อนปลูกกับหลังปลูก พบว่า ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ของดินในทุกตำรับการทดลองมีค่าลดลงอย่างมากตามการใช้ประโยชน์ที่ดินที่นานขึ้นและการดูดใช้ของพืช ขณะที่ ปริมาณโซเดียมที่สกัดได้ของดินก่อนปลูกใน NaB และ NaB+DL มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับดินหลังปลูก ( $P < 0.05$ ) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสภาพกรดที่รุนแรงของดินส่งผลให้โครงสร้างของโซเดียมเบนทอไนต์เสียสภาพและปลดปล่อยโซเดียมไอออนออกมา (Weil and Brady, 2017) และการถูกไล่ที่ของโซเดียมไอออน ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของเบนทอไนต์ออกมาสู่ระบบดินระหว่างการปลูกข้าว เนื่องจากโซเดียมเบนทอไนต์เป็นแร่ในกลุ่มสมกไทต์ที่เชื่อมกันด้วย oxygen-oxygen

linkage ซึ่งเป็นแรงเกาะกันที่เบาบางมากและไม่สามารถดูดยึดหลักของแร่ดินเหนียวให้มีระยะที่คงที่ได้ (Sangkum, 2009) ทั้งยังมีความสามารถในการแทนที่ของอะตอมประจุไฟฟ้าบวกด้วยธาตุที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่า เช่น การแทนที่ของ  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  หรือ  $\text{H}^+$  ใน  $\text{Si}^{4+}$  และ  $\text{Al}^{3+}$  เมื่อธาตุวาเลนซ์ต่ำมีความเข้มข้นสูงกว่าธาตุที่มีวาเลนซ์สูง รวมทั้งการมีพื้นผิวสัมผัสต่อปฏิกิริยาทางเคมีมาก ทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าสูง (Khongchai, 2018) นอกจากนั้น

โซเดียมเบนทอนไนด์ที่ใช้ก่อนการปลูกข้าวพันธุ์ กข43 มีปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมที่สกัดได้ประมาณ 280 25 15 และ 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Wongleecharoen *et al.*, 2020) ดังนั้น เมื่อใส่ลงไปดินจึงทำให้ดินมีปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมที่สกัดได้สูงตามอัตราการใส่โซเดียมเบนทอนไนด์ที่เพิ่มขึ้น

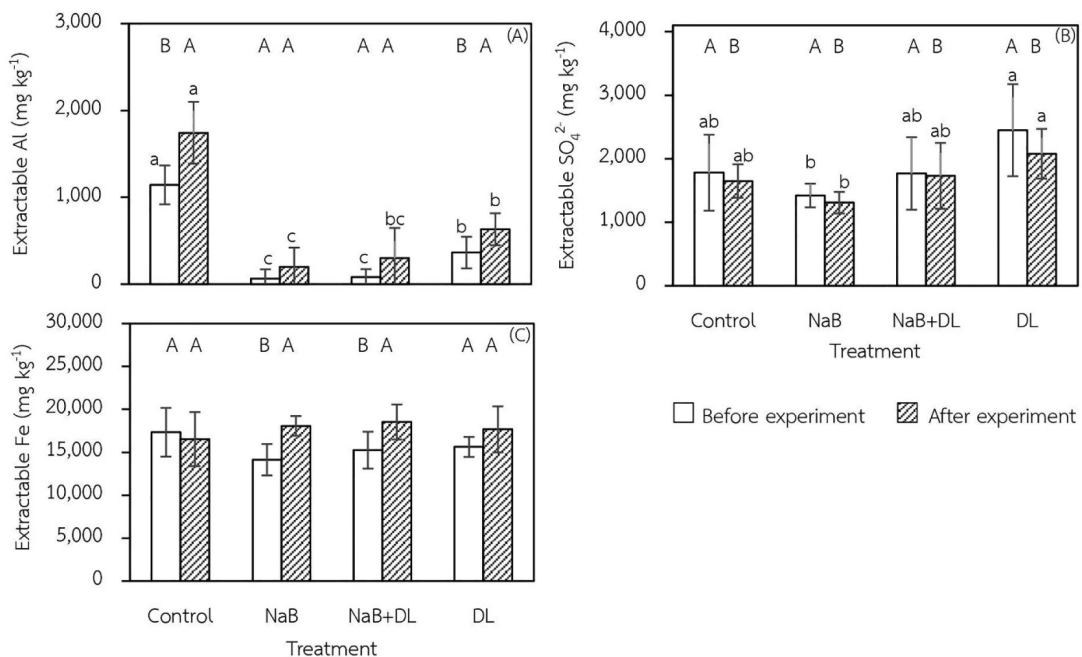


**Figure 3** Residual effects of Na-bentonite (NaB) and/or dolomite (DL) application on (A) extractable potassium (K), (B) extractable calcium (Ca), (C) extractable magnesium (Mg) and (D) extractable sodium (Na) in an acid sulfate soil. Error bars indicate standard deviation. Different small letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) of the treatments in each soil sampling time, while different capital letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) of two soil sampling times in each treatment



**ปริมาณอะลูมิเนียม ซัลเฟต และเหล็กที่สกัดได้**  
การใส่โซเดียมเบนโทไนต์ในดินและการปลูกข้าวมาแล้ว 1 ฤดูปลูก ยังคงมีผลตกค้างทำให้ดินก่อนและหลังการปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้ต่ำที่สุดใน NaB โดยมีปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้  $64 \pm 108$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินก่อนปลูก และ  $199 \pm 223$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินหลังปลูก ซึ่งส่งผลเช่นเดียวกันใน NaB+DL ที่มีปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้  $81 \pm 93$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินก่อนปลูก และ  $300 \pm 348$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินหลังปลูก และแตกต่างกับ DL ( $364 \pm 182$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินก่อนปลูก และ  $633 \pm 184$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินหลังปลูก) และ control ( $1,143 \pm 224$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินก่อนปลูก และ  $1,743 \pm 356$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับดินหลังปลูก) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) (Figure 4A) เนื่องจากค่าพีเอชของดินที่เพิ่มสูงขึ้นในตำรับการทดลองที่ใส่โซเดียมเบนโทไนต์อาจส่งผลให้อะลูมิเนียมตกตะกอน (Shamshuddin *et al.*, 2014) และละลายออกมาได้น้อยกว่า control ทั้งนี้ ดินเปรี้ยวจัดถือเป็นดินที่มีปัญหาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ไพไรต์ ( $\text{FeS}_2$ ) ทำให้เกิดกรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) และมักพบ

จาโรไซต์ ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) ทำให้ดินมีความเป็นกรดรุนแรงส่งผลต่อความเป็นพิษของธาตุโลหะ ซึ่งอาจเป็นพิษต่อพืชที่ปลูกได้ เนื่องจากกรดที่แลกเปลี่ยนได้เป็นผลรวมของ  $\text{H}^+$  และ  $\text{Al}^{3+}$  ซึ่งสัดส่วนของไอออนทั้งสองขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของดิน และมีอำนาจเข้าแทนที่ (Replacing power)  $\text{Al}^{3+}$  ที่แลกเปลี่ยนได้ออกมาสู่ระบบของสารละลายดินได้มากยิ่งขึ้น (Weil and Brady, 2017) อีกทั้ง อะลูมิเนียมไม่ได้เป็นธาตุอาหารพืช และพืชจะไวต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมมาก โดยเริ่มจากการทำลายระบบราก จำกัดการพัฒนาของราก จำกัดการดูดน้ำและการเคลื่อนย้ายแคลเซียมและฟอสฟอรัสในพืช (Panichsakpatana *et al.*, 2016) โดยทั่วไป เมื่อดินมีระดับอะลูมิเนียมที่สกัดได้มากกว่า 1.0 เซนติโมลต่อกิโลกรัม หรือ 90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะเริ่มเป็นพิษ ส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตผิดปกติ และผลผลิตลดลง (Shamshuddin *et al.*, 2014) ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกใน control ตายทั้งหมด เนื่องจากไม่สามารถทนต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมที่สูงมากได้ ขณะที่ การปรับปรุงดินด้วยโซเดียมเบนโทไนต์หรือโดโลไมต์เพียงอย่างเดียวหรือร่วมกัน สามารถทำให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้



**Figure 4** Residual effects of Na-bentonite (NaB) and/or dolomite (DL) application on (A) extractable aluminum (AL), (B) extractable sulfate ( $SO_4^{2-}$ ) and (C) extractable iron (Fe) in an acid sulfate soil. Error bars indicate standard deviation. Different small letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) of the treatments in each soil sampling time, while different capital letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ) of two soil sampling times in each treatment

สำหรับปริมาณซัลเฟตที่สกัดได้ในดินก่อนและหลังปลูกข้าว พบว่า ดินใน NaB มีปริมาณต่ำที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) กับ DL (Figure 4B) อย่างไรก็ตาม การใส่วัสดุปรับปรุงดินทั้ง 2 ชนิด ไม่ได้ส่งผลให้ดินทั้งก่อนและหลังปลูกมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้แตกต่างกันทางสถิติ (Figure 4C) โดยในบางครั้งพบว่า ดินเปรี้ยวจัดมีเหล็กในดินมาก แต่ข้าวไม่ได้รับผลกระทบจากความเป็นพิษของเหล็กเนื่องจากรากข้าวมีความสามารถพิเศษในการป้องกันไม่ให้เกิดความเป็นพิษของเหล็กได้ โดยการตกตะกอนของเหล็กที่บริเวณรากข้าว ส่งผลให้ข้าวไม่ดูดซับเหล็กเข้าไป แต่จะเกิดการดูดซับเหล็กที่เนื้อเยื่อของราก ซึ่งสามารถลดปริมาณเหล็กที่เคลื่อนย้ายจากรากไปยังใบ อีกทั้งข้าวยังสามารถเจริญเติบโตได้เป็นปกติแม้ว่าจะ

มีปริมาณ  $Fe^{2+}$  ในสารละลายดินสูงกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร (Attanandana, 2007)

## การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

**ความสูง การแตกกอ และจำนวนรวงต่อกอ**  
สภาพของดินที่เป็นกรดรุนแรงมากที่สุดในการควบคุมส่งผลให้ข้าวไม่สามารถทนต่อสภาพดังกล่าวได้ และตายเมื่ออายุประมาณ 2 สัปดาห์ หลังปักดำ (Table 1) ทำให้ไม่สามารถวัดการเจริญเติบโต ผลผลิต และความหอมของข้าวได้ โดยความเป็นกรดรุนแรงของดินส่งผลให้เกิดความเป็นพิษของอะลูมิเนียม เหล็ก แมงกานีส และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Attanandana and Vacharotayan, 1986) ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่รุนแรง

ต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชยังมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชดิน เมื่อดินเป็นกรดรุนแรงจะทำให้ฟอสฟอรัสในดินอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช เนื่องจากถูกตรึงด้วยเหล็กและอะลูมิเนียม ทำให้พืชเกิดความเครียดจากการขาดฟอสฟอรัส จึงมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งสังเกตได้จากความสูงของข้าว ซึ่งการขาดฟอสฟอรัสของพืชทำให้ความสูงของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Vejchasarn *et al.*, 2016) นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ดินมีปริมาณความเข้มข้นของธาตุอาหารบางตัวและความอึดตัวเบสต่ำอีกด้วย ส่วนดำรับการทดลองที่มีผลตกค้างจากการใส่โซเดียมเบนทอไนต์หรือโดโลไมต์เพียงอย่างเดียวหรือการใช้ร่วมกันทั้ง 3 ดำรับ คือ NaB NaB+DL และ DL สามารถช่วยแก้ไขสภาพความเป็นกรดของดิน (Figure 1A) เพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส (Figure 2C) และลดปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้ (Figure 4A) เนื่องจากอะลูมิเนียมไม่เป็นธาตุอาหารพืช แต่หากดินมีระดับของอะลูมิเนียมสูงจะมีผลต่อการแบ่งเซลล์ รบกวนระบบเอนไซม์ ทำลายระบบราก จำกัดการพัฒนาของราก และจำกัดการดูดใช้และการเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัส แคลเซียม และโพแทสเซียมในพืช (Attanandana, 2007; Shamshuddin *et al.*, 2014; Panichsakpatana *et al.*, 2016) ดังนั้น การใส่สารปรับปรุงดินจึงส่งผลให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกสามารถรอดชีวิต เจริญเติบโต และให้ผลผลิตได้ ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลของข้าวจึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง NaB NaB+DL และ DL เท่านั้น

จากการวิเคราะห์ผลตกค้างของการใส่วัสดุปรับปรุงดินต่อความสูงของข้าวที่ระยะเก็บเกี่ยว พบว่า

ข้าวที่ปลูกในดำรับการทดลองที่มีผลตกค้างจากการใส่โซเดียมเบนทอไนต์หรือโซโดไลต์เพียงอย่างเดียวหรือการใช้โซเดียมเบนทอไนต์ร่วมกับโดโลไมต์ มีความสูงเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) เช่นเดียวกับการแตกกอ (Tillering) และจำนวนรวงต่อกอ (Panicle number) ของข้าว (Table 1) แต่มีแนวโน้มว่าข้าวใน NaB มีการแตกกอและจำนวนรวงต่อกอสูงขึ้นตามค่าพีเอชของดินที่เพิ่มขึ้น

### น้ำหนักตอซังแห้ง น้ำหนักรากแห้ง และมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน

การใส่วัสดุปรับปรุงดินที่แตกต่างกันส่งผลให้น้ำหนักตอซังแห้งและน้ำหนักรากแห้งของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อายุเก็บเกี่ยว มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) โดยข้าวใน NaB มีน้ำหนักตอซังแห้งสูงที่สุด ( $379 \pm 80$  กิโลกรัมต่อไร่) รองลงมาคือ NaB+DL ( $339 \pm 143$  กิโลกรัมต่อไร่) และ DL ( $277 \pm 61$  กิโลกรัมต่อไร่) ตามลำดับ ขณะที่ น้ำหนักรากแห้งมีค่าสูงที่สุดใน DL ( $214 \pm 116$  กิโลกรัมต่อไร่) รองลงมาคือ NaB+DL ( $207 \pm 101$  กิโลกรัมต่อไร่) และ NaB ( $192 \pm 34$  กิโลกรัมต่อไร่) ตามลำดับ (Table 1) จากผลดังกล่าวจึงทำให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ทั้ง 3 ดำรับการทดลอง มีมวลชีวภาพส่วนเหนือดินไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นกัน ( $P > 0.05$ ) โดยมีแนวโน้มสูงที่สุดใน NaB ( $695 \pm 101$  กิโลกรัมต่อไร่) รองลงมาคือ NaB+DL ( $667 \pm 208$  กิโลกรัมต่อไร่) และ DL ( $579 \pm 65$  กิโลกรัมต่อไร่) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mi *et al.* (2017) ที่รายงานว่า การใส่เบนทอไนต์สามารถทำให้ผลผลิตชีวมวลส่วนเหนือดินของพืชเพิ่มขึ้นได้

**Table 1** The height, tiller number, panicle number, straw dry weight, root dry weight, and aboveground biomass of Khao Dawk Mali 105 rice as affected by soil conditioners application expressed as mean  $\pm$  standard deviation

| Treatment <sup>1</sup> | Height (cm) | Tiller number (No. hill <sup>-1</sup> ) | Panicle number (No. tiller <sup>-1</sup> ) | Straw dry weight (kg rai <sup>-1</sup> ) | Root dry weight (kg rai <sup>-1</sup> ) | Aboveground biomass (kg rai <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|-------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| Control                | –           | –                                       | –                                          | –                                        | –                                       | –                                           |
| NaB                    | 135 $\pm$ 3 | 9.1 $\pm$ 1.0                           | 8.8 $\pm$ 1.0                              | 379 $\pm$ 80                             | 192 $\pm$ 34                            | 695 $\pm$ 101                               |
| NaB+DL                 | 138 $\pm$ 7 | 9.0 $\pm$ 2.7                           | 8.4 $\pm$ 2.0                              | 339 $\pm$ 143                            | 207 $\pm$ 101                           | 667 $\pm$ 208                               |
| DL                     | 135 $\pm$ 2 | 8.9 $\pm$ 3.0                           | 7.9 $\pm$ 1.9                              | 277 $\pm$ 61                             | 214 $\pm$ 116                           | 579 $\pm$ 65                                |
| F-test                 | ns          | ns                                      | ns                                         | ns                                       | ns                                      | ns                                          |
| CV (%)                 | 2.7         | 19.2                                    | 11.3                                       | 26.1                                     | 33.8                                    | 19.2                                        |

<sup>1</sup> Control = no soil conditioner application (Data of rice growth and yield in the control treatment were unobtainable due to a very strong acidity causing rice plant death), NaB = Na-bentonite (93.6 t rai<sup>-1</sup>) application, NaB+DL = Na-bentonite (46.8 t rai<sup>-1</sup>) + dolomite (1 t rai<sup>-1</sup>) application, DL = dolomite (2 t rai<sup>-1</sup>) application.

CV = coefficient of variation, ns = not significant according to F-test at  $P < 0.05$

เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ น้ำหนักแห้ง 1,000 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเมล็ดกับตอซังแห้ง และดัชนีการเก็บเกี่ยว

ผลตกค้างของการใส่วัสดุปรับปรุงดินที่แตกต่างกันส่งผลให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ (Filled grain) และน้ำหนักแห้ง 1,000 เมล็ด (1000-filled grain weight) ของข้าวไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) แต่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในตำรับการทดลองที่ใส่โซเดียมเบนทอนไต์เพียงอย่างเดียว (Table 2) สำหรับน้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 (Grain weight at 14% moisture) ตำรับการทดลองที่ใส่วัสดุปรับปรุงดินแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อน้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 เช่นเดียวกัน แต่ตำรับการทดลองที่ใส่โซเดียมเบนทอนไต์ทั้ง 2 ตำรับการทดลอง คือ NaB (316  $\pm$  46 กิโลกรัมต่อไร่) และ

NaB+DL (328  $\pm$  70 กิโลกรัมต่อไร่) มีแนวโน้มทำให้ข้าวมีผลผลิตเมล็ดสูงกว่าตำรับที่ใส่โดโลไมต์เพียงอย่างเดียว (302  $\pm$  45 กิโลกรัมต่อไร่) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pongwichian *et al.* (2009) ที่พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินเค็มจัดจะให้น้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกมากกว่าการปลูกข้าวในดินที่ไม่เค็ม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณโซเดียมในดิน อย่างไรก็ตาม ผลผลิตเมล็ดจากการทดลองครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตเฉลี่ยของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในประเทศไทย คือ 363 กิโลกรัมต่อไร่ (Rice Department, 2020) และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักเมล็ดกับตอซังแห้ง (Grain straw ratio) และดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index) ในแต่ละตำรับการทดลอง พบว่า ค่าเฉลี่ยสำหรับสองลักษณะนี้มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) แต่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการใช้โดโลไมต์ที่เพิ่มขึ้น

**Table 2** The filled grain, 1000–filled grain weight, grain weight at 14% moisture, grain straw ratio, harvest index, and 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) concentration of Khao Dawk Mali 105 rice as affected by soil conditioners application expressed as mean  $\pm$  standard deviation

| Treatment <sup>1</sup> | Filled grain (%) | 1000–filled grain weight (g) | Grain weight at 14% moisture (kg ra <sup>-1</sup> ) | Grain straw ratio | Harvest index   | 2AP concentration ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) |
|------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Control                | –                | –                            | –                                                   | –                 | –               | –                                          |
| NaB                    | 60.3 $\pm$ 6.5   | 23.82 $\pm$ 2.02             | 316 $\pm$ 46                                        | 0.86 $\pm$ 0.18   | 0.46 $\pm$ 0.05 | 1.85 $\pm$ 0.89                            |
| NaB+DL                 | 59.2 $\pm$ 1.8   | 22.48 $\pm$ 1.09             | 328 $\pm$ 70                                        | 1.08 $\pm$ 0.39   | 0.51 $\pm$ 0.08 | 1.38 $\pm$ 0.28                            |
| DL                     | 58.4 $\pm$ 5.0   | 22.75 $\pm$ 0.77             | 302 $\pm$ 45                                        | 1.14 $\pm$ 0.38   | 0.52 $\pm$ 0.08 | 1.18 $\pm$ 0.17                            |
| F–test                 | ns               | ns                           | ns                                                  | ns                | ns              | ns                                         |
| CV (%)                 | 9.1              | 4.8                          | 18.9                                                | 28.2              | 12.8            | 36.9                                       |

<sup>1</sup> Control = no soil conditioner application (Data of rice growth and yield in the control treatment were unobtainable due to a very strong acidity causing rice plant death), NaB = Na-bentonite (93.6 t ra<sup>-1</sup>) application, NaB+DL = Na-bentonite (46.8 t ra<sup>-1</sup>) + dolomite (1 t ra<sup>-1</sup>) application, DL = dolomite (2 t ra<sup>-1</sup>) application.

CV = coefficient of variation, ns = not significant according to F-test at  $P < 0.05$

### ความหอมของข้าว

ผลการศึกษาการปรับปรุงดินโดยโซเดียมเบนทอไนต์ต่อปริมาณสารหอม 2AP ของเมล็ดข้าวกล้องพบว่า ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในตำรับการทดลองที่มีผลตกค้างของโซเดียมเบนทอไนต์ (NaB) หรือโดโลไมต์ (DL) เพียงอย่างเดียวหรือการใช้ร่วมกัน (NaB+DL) สามารถผลิตสารหอม 2AP ของเมล็ดข้าวได้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) โดยมีปริมาณสารหอม 2AP เฉลี่ย  $1.85 \pm 0.89$ ,  $1.18 \pm 0.17$  และ  $1.38 \pm 0.28$  ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Table 2) อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยโซเดียมเบนทอไนต์เพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มทำให้ความหอมของเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ดินที่พบว่า การใส่โซเดียมเบนทอไนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีโซเดียมไอออนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้าง ทำให้ดินมีค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อึม

ตัวด้วยน้ำ (Figure 1C) ค่าอัตราส่วนการดูดซับโซเดียม (Figure 1D) ค่าอัตราร้อยละโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ (Figure 1F) และปริมาณโซเดียมที่สกัดได้สูงขึ้น (Figure 3D) ซึ่งอาจทำให้ข้าวเกิดความเครียดเนื่องจากการขาดน้ำในขั้นตอนการสะสมแป้งของข้าว (Arai and Itani, 2000) และเมื่อข้าวมีความเครียดเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเค็มของดิน อาจส่งผลให้มีปริมาณสาร 2AP ในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นได้ (Lutts *et al.*, 1996; Pongwichian *et al.*, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับ Gay *et al.* (2010) ที่รายงานว่า ความหอมของเมล็ดข้าวจะแปรปรวนตามความเค็ม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสาร 2AP เป็นผลจากความเครียดจากความเค็มในระยะก่อนออกดอกของข้าว ทั้งนี้ ปริมาณสาร 2AP ของเมล็ดข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากการทดลองครั้งนี้มีค่าสูงกว่าที่พบในข้าวหอมโดยทั่วไปที่มีปริมาณสาร 2AP ประมาณ 0.1–0.2 ไมโครกรัมต่อกรัม (Rice



Department, 2021) และยิ่งสูงกว่าข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในงานวิจัยของ Mahatheeranont *et al.* (2001) ที่สำรวจและวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP โดยใช้เทคนิค gas chromatography เหมือนกัน ซึ่งพบว่าเมล็ดข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณสาร 2AP ระหว่าง 0.12–0.34 ไมโครกรัมต่อกรัม

## สรุป

การใส่โซเดียมเบนทอนไต์ 1 ฤดูปลูกข้าว (กข43) ก่อนหน้าในทั้ง 2 ดำรับการทดลอง ยังคงมีผลตกค้างที่สามารถช่วยเพิ่มและรักษาระดับพีเอชของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินรังสิต) ได้จนถึงการเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าว (ขาวดอกมะลิ 105) ในฤดูปลูกที่ 2 ส่งผลให้ดินมีปริมาณความต้องการปูนลดลง ช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ (ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม) และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน รวมทั้งช่วยลดระดับความเป็นพิษของซัลเฟตและอะลูมิเนียมในดินได้ดีกว่าการปรับปรุงดินด้วย

โดโลไมต์เพียงอย่างเดียวและดำรับควบคุม สำหรับการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำและอัตราส่วนการดูดซับโซเดียมในดินที่สูงขึ้นตามอัตราการใส่โซเดียมเบนทอนไต์ที่เพิ่มขึ้นนั้น พบว่า มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาและรอบของการใช้ประโยชน์ที่ดินที่นานขึ้น จึงสรุปได้ว่า การใช้โซเดียมเบนทอนไต์เป็นสารปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดมีผลตกค้างที่ดีต่อดินที่ใช้ในการปลูกข้าวในฤดูปลูกถัดไปทั้งด้านธาตุอาหารพืชและการรักษาระดับพีเอชของดิน แต่ต้องมีการปรับปรุงดินเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ การใส่ปูนและการจัดการน้ำเพื่อยกระดับพีเอชของดินให้สูงขึ้นจนเหมาะสมกับการปลูกข้าว (5.0–6.5) ควบคู่กับการใส่ปุ๋ยให้ดินมีธาตุอาหารพืชที่เพียงพอและสัดส่วนที่เหมาะสมอยู่เสมอ ซึ่งเป็นแนวทางแก้ไขดินเปรี้ยวจัดและทำให้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีผลผลิตที่ดีได้อย่างยั่งยืน

## เอกสารอ้างอิง

- Arai, E. and T. Itani. 2000. Effects of early harvesting of grains on taste characteristics of cooked rice. *Food Sci. Technol. Res.* 6(4): 252–256.
- Attanandana, T. 2007. Paddy Soil Science. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok. 393 pp. (in Thai)
- Attanandana, T. and J. Chanchareonsook. 2008. Soil and Plant Analysis Manual. Kasetsart University, Bangkok. 108 pp. (in Thai)
- Attanandana, T. and S. Vacharotayan. 1986. Acid sulfate soils: their characteristics, genesis, amelioration and utilization. *Southeast Asian Stud.* 24(2): 154–180.
- Chittamart, N., S. Tawornpruek, D. Ketrot, S. Aramrak, K. Chittanukul and R. Sattapun. 2018. Utilization of Na-bentonite to improve pH-buffering capacity of acid sulfate soils in natural gas transmission pipeline rights-of-way, Thailand. *In Proc. the 9<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Development. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 151: 012023.

- Desertification Control in Asia and the Pacific. 1990. Waterlogging and Salinity Control in Asia and the Pacific. The Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, United Nations Development Programme. 61 pp.
- Energy Policy and Planning Office. 2016. Natural Gas in Thailand. Available Source: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/eppo-intranet/itemlist/category/828-gas-natural>, April 30, 2020. (in Thai)
- Fan, S.S., F.H. Chang, H.T. Hsueh and T.H. Ko. 2016. Measurement of total free iron in soils by  $H_2S$  chemisorption and comparison with the citrate bicarbonate dithionite method. J. Anal. Methods Chem. 2016: 7213542.
- Gay, F., I. Maraval, S. Roques, Z. Günata, R. Boulanger, A. Audebert and C. Mestres. 2010. Effect of salinity on yield and 2-acetyl-1-pyrroline content in the grains of three fragrant rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in Camargue (France). Field Crops Res. 117(1): 154–160.
- Gratchev, I.B., A. Shokouhi, A. Inoue and A. Brennan. 2012. Feasibility of using bentonite, lime and fly ash in permeable reactive barriers for acid sulfate soils, pp. 7–12. In Proc. the 11<sup>th</sup> Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, 15–18 July 2012.
- Ishitani, K. and C. Fushimi. 1994. Influence of pre- and post-harvest conditions on 2 acetyl-1-pyrroline concentration in aromatic rice. Koryo. 183: 73–80.
- Kargas, G., I. Chatzigiakoumis, A. Kollias, D. Spiliotis, I. Massas and P. Kerkides. 2018. Soil salinity assessment using saturated paste and mass soil:water 1:1 and 1:5 ratios extracts. Water. 10: 1589.
- Kaufhold, S., R. Dohrmann, M. Klinkenberg and U. Noell. 2015. Electrical conductivity of bentonites. Appl. Clay Sci. 114: 375–385.
- Khongchai, T. 2018. Utilization of Na-Bentonite and Improvement of Na-Bentonite Contamination Soils in Natural Gas Pipeline Rights of Way. MS Thesis, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Khongchai, T., N. Chittamart, S. Tawornpruek, D. Ketrot, S. Aramrak and K. Songrukkiat. 2020. Effects of Na-bentonite on soil chemical properties in natural gas pipeline rights of way. Journal of Agriculture. 36(2): 197–209. (in Thai)
- Kongpun, A., P. Jaisiri, B. Rerkasem and C. Prom-u-thai. 2020. Impact of soil salinity on grain yield and aromatic compound in Thai Hom Mali rice cv. Khao Dawk Mali 105. Agr. Nat. Resour. 54: 74–78.
- Land Development Department. 2020. Managing acid sulfate soils. Available Source: [http://www.ddd.go.th/Web\\_Soil/acid.htm](http://www.ddd.go.th/Web_Soil/acid.htm), March 12, 2020. (in Thai)

- Land Development Department. 2021. Rangsit soil series. Available Source: [http://oss101.ldd.go.th/thaisoils\\_museum/pf\\_desc/pf\\_desc\\_all/Rs.htm](http://oss101.ldd.go.th/thaisoils_museum/pf_desc/pf_desc_all/Rs.htm), July 15, 2021. (in Thai)
- Levy, G.J. and I. Shainberg. 2005. Sodic soil, pp. 504–513. *In* D. Hillel, ed. Encyclopedia of Soils in the Environment. Columbia University, New York, USA.
- Lutts, S., J.M. Kinet and J. Bouharmont. 1996. Effects of various salts and of mannitol on ion and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in rice (*Oryza sativa* L.) callus cultures. *J. Plant Physiol.* 149: 186–195.
- Mahatheeranont, S., S. Keawsa-ard and K. Dumri. 2001. Quantification of the rice aroma compound, 2-acetyl-1-pyrroline, in uncooked Khao Dawk Mali 105 brown rice. *J. Agric. Food Chem.* 49(2): 773–779.
- Masulili, A., W.H. Utomo and M.S. Syechfani. 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *J. Agric. Sci.* 2(1): 39–47.
- Mi, J., E.G. Gregorich, S. Xu, N.B. McLaughlin, B. Ma and J. Liu. 2017. Effect of bentonite amendment on soil hydraulic parameters and millet crop performance in a semi-arid region. *Field Crops Res.* 212: 107–114.
- Murray, H.H. 2006. Bentonite applications, pp. 111–130. *In* H.H. Murray, ed. Developments in Clay Science. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Panichsakpatana, S., C. Thongjoo and S. Khaokaew. 2016. Soil Pollution. Kasetsart University Press, Bangkok, Thailand. 433 pp. (in Thai)
- Perez, D.V., L.H.C. dos Anjos, A.G. Ebeling and M.G. Pereira. 2009. Comparison of H/Al stoichiometry of mineral and organic soils in Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 33(4): 1071–1076.
- Pongwichian, P., C. Dissataporn, P. Yamclee, L. Sinthusen, K. Chueapun and S. Wongpiyachon. 2009. Effect of Salinity on Yields and Grain Quality of Rice cv. KDML 105. Land Development Department and Rice Department. 64 pp. (in Thai)
- Rice Department. 2019. Fertilizer application based on the soil analysis data. Available Source: <http://www.ricethailand.go.th/Rkb/management/index.php-file=content.php&id=19.htm>, July 1, 2019. (in Thai)
- Rice Department. 2020. Khao Dawk Mali 105 (KDML 105). Available Source: <http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=19.htm>, December 7, 2020. (in Thai)

- Rice Department. 2021. Rice quality. Available Source: <http://www.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=6-2.htm>, August 3, 2021. (in Thai)
- Sangkum, P. 2009. Effects of Na-Bentonite on Soil Properties and Growth of Rayong 5 Cassava Variety. MS Thesis, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Shamshuddin, J., A. Elisa Azura, M.A.R.S. Shazana, C.I. Fauziah, Q.A. Panhwar and U.A. Naher. 2014. Properties and management of acid sulfate soils in Southeast Asia for sustainable cultivation of rice, oil palm, and cocoa. *Adv. Agron.* 124: 91–142.
- Soil Science Division Staff. 2017. Soil Survey Manual. United States Department of Agriculture Handbook No.18. United States Department of Agriculture, United States Government Printing Office, Washington, D.C., USA. 603 pp.
- Sun, Y., Y. Li, Y. Xu, X. Liang and L. Wang. 2015. *In situ* stabilization remediation of cadmium (Cd) and lead (Pb) co-contaminated paddy soil using bentonite. *Appl. Clay Sci.* 105–106: 200–206.
- Tharajaroen, T. and P. Pichitkul. 2018. Effect of sodium bentonite on acute toxicity and water quality on Asian Sea Bass (*Lates calcarifer*). *Khon Kaen Agr. J.* 46(6): 1095–1106. (in Thai)
- United States Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils. United States Department of Agriculture Handbook No. 60. United States Department of Agriculture, United States Government Printing Office, Washington, D.C., USA. 160 pp.
- Vejchasarn, P., U. Kotchasatit, J. Jairin, W. Wongboon, J. Wongnongwa, Y. Phansenee, R. Kawichai, P. Leelakud and V. Chamarek. 2016. Physiological and morphological responses of rice to low phosphorus availability. *Thai Rice Research Journal.* 7(1): 74–83. (in Thai)
- Weil, R.R. and N.C. Brady. 2017. The Nature and Properties of Soils. 15<sup>th</sup> edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA. 1104 pp.
- Wongleecharoen, C., W. Wisawapipat, D. Ketrot, N. Chittamart, S. Aramrak, K. Chittanukul, R. Sattapun and S. Tawornpruek. 2020. Elemental dynamics in porewater of an acid sulfate paddy soil as affected by sodium bentonite and dolomite amendments: insights from field study. *E3S Web of Conferences.* 167: 02003.
- Zhou, C.H. and J. Keeling. 2013. Fundamental and applied research on clay minerals: from climate and environment to nanotechnology. *Appl. Clay Sci.* 74: 3–9.