

สหสัมพันธ์ของน้ำยาสกัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดินกับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมันที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดในภาคกลางและภาคตะวันออกของประเทศไทย  
Correlation of Soil N-P-K Extractants with Growth and Yield Indices of Oil Palm Grown on Acid Sulfate Soils in the Central and East Regions of Thailand

ศิริลักษณ์ ศิริทรัพย์<sup>1</sup> มัชฌิมา พันธุ์เยี่ยม<sup>1</sup> สุรเชษฐ์ อร่ามรักษ์<sup>1</sup> เสาวนุช ถาวรพฤษ์<sup>1</sup> และ ณัฐพล จิตมัตย์<sup>1,\*</sup>  
Siriluk Sirisup<sup>1</sup>, Mutchima Phun-iam<sup>1</sup>, Surachet Aramrak<sup>1</sup>, Saowanuch Tawornpruek<sup>1</sup>  
and Natthapol Chittamart<sup>1,\*</sup>

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

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

รับเรื่อง: 14 กันยายน 2564 Received: 14 September 2021

ปรับแก้ไข: 1 ธันวาคม 2564 Revised: 1 December 2021

รับตีพิมพ์: 10 ธันวาคม 2564 Accepted: 10 December 2021

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

**ABSTRACT:** Assessment of nutrient availability by suitable soil extractants with a high correlation with the growth and yield indices of oil palm is the key to precise nutrient management for oil palm plantations in acid sulfate soils. The aim of this study was to study the efficacy of standard soil extractants in assessing the availabilities of nitrogen, phosphorus, and potassium for the oil palm growing on acid sulfate soils. The experiment was conducted in six acid sulfate soils located on the Central and East Regions. The correlations between NPK available indices by seven soil extractants (i.e., 2 M KCl, Bray II, Mehlich I, Mehlich III, 1 M NH<sub>4</sub>OAc, AB-DTPA, and Na-lactate) and oil palm growth and yield indices were investigated. The results showed that the inorganic nitrogen contents extracted by different soil extractants was not correlated with the oil palm growth and yield indices, but total N content was highly significantly correlated with the leaf area index of oil palm ( $P < 0.01$ ), which was significantly correlated with vegetative dry matter ( $r = 0.517$ ) and crop growth rate ( $r = 0.531$ ) ( $P < 0.01$ ). Phosphorus extracted by Bray II was significantly positively correlated with P content uptake per 17<sup>th</sup> frond dry matter, leaf area index ( $P < 0.05$ ), fresh bunch yield, vegetative dry matter, and crop growth rate ( $P < 0.01$ ). While potassium extracted by Mehlich I and Mehlich III were significantly positively correlated with leaf area ( $P < 0.01$ ) which was significantly positively correlated with vegetative dry matter ( $P < 0.05$ ) and leaf area index ( $P < 0.01$ ). Therefore, total N, available P extracted by Bray II, and available K extracted by Mehlich I and Mehlich III can be used as availability indices of NPK in acid sulfate soils to further develop fertilizer prescription for oil palm grown in the Central and East Regions of Thailand.

**Keywords:** Oil palm, soil extractants, acid sulfate soils, macronutrient, plant nutrients, fertilizer management

## บทคัดย่อ

การประเมินระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารด้วยน้ำยาสกัดดินที่เหมาะสมและมีสหสัมพันธ์สูงกับการเจริญเติบโตและผลผลิตของปาล์ม น้ำมันเป็นกุญแจสำคัญในการจัดการธาตุอาหารพืชเพื่อการผลิตปาล์มน้ำมันในดินเปรี้ยวจัดอย่างแม่นยำ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาสกัดดินสำหรับประเมินระดับความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสำหรับปาล์มน้ำมันที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด ทำการศึกษาในดินเปรี้ยวจัดที่ปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงใต้จำนวน 6 บริเวณ วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม โดยวิธีวิเคราะห์ดินด้วยน้ำยาสกัด 7 ชนิด (2 M KCl, Bray II, Mehlich I, Mehlich III, 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ , AB-DTPA และ Na-Lactate) กับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์ม น้ำมัน ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์ที่สกัดด้วยน้ำยาสกัดชนิดต่าง ๆ ไม่มีสหสัมพันธ์กับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมัน แต่ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีสหสัมพันธ์สูงกับดัชนีพื้นที่ใบของปาล์ม น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $P < 0.01$ ) ซึ่งเป็นดัชนีที่มีสหสัมพันธ์กับน้ำหนักแห้ง การเติบโตทางลำต้น ( $r = 0.517$ ) และอัตราการเจริญเติบโตของพืช ( $r = 0.531$ ) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $P < 0.01$ ) ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Bray II มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับการดูดใช้ฟอสฟอรัสในทางใบที่ 17 ดัชนีพื้นที่ใบ ( $P < 0.05$ ) ผลผลิตทะลายน้ำมันสด น้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น และอัตราการเจริญเติบโตของพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.01$ ) ส่วนปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Mehlich I และ Mehlich III มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับพื้นที่ใบของทางใบที่ 17 ( $P < 0.01$ ) ซึ่งเป็นดัชนีที่มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับน้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น ( $P < 0.05$ ) และดัชนีพื้นที่ใบ ( $P < 0.01$ )

ดังนั้น ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Bray II และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Mehlich I และ Mehlich III สามารถใช้เป็นดัชนีความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดินเปรี้ยวจัดเพื่อให้คำแนะนำปุ๋ยสำหรับปาล์มน้ำมันในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไทย

**คำสำคัญ:** ปาล์มน้ำมัน, น้ำยาสกัดดิน, ดินเปรี้ยวจัด, มหธาตุ, ธาตุอาหารพืช, การจัดการปุ๋ย

## บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศไทย ซึ่งมีผลผลิตปาล์มน้ำมันเป็นลำดับที่ 5 ของโลก พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตามลำดับ ปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่ใช้ทั้งทางด้านบริโภคและอุปโภค เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมน้ำมันพืช อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร และใช้เป็นพลังงานไบโอดีเซล เป็นต้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ประเทศไทยมีนโยบายในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตปาล์มน้ำมันและขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันไปทุกภูมิภาคของประเทศ (Jaroenkietkajorn and Gheewala, 2021) ทำให้มีการใช้ดินเปรี้ยวจัดหรือดินกรดกำมะถัน (Acid sulfate soils) ในการปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่ทุ่งรังสิตในภาคกลาง ประมาณ 57,690 ไร่ และบริเวณชายฝั่งทะเลในภาคตะวันออกเฉียงใต้ในจังหวัดจันทบุรีและตราด ประมาณ 90,793 ไร่ ซึ่งดินเปรี้ยวจัดของประเทศไทยมีการแจกกระจายอยู่ในจังหวัดนครนายก ปทุมธานี สระบุรี จันทบุรี และตราด และจัดเป็นดินที่มีปัญหาต่อการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร เนื่องจากเป็นกรดรุนแรงมาก (Ljung *et al.*, 2009) ผลผลิตทะลายน้ำมันเฉลี่ยต่อไร่

ของผลผลิตทะเลสาบปาล์มน้ำมันที่ปลูกในทุ่งรังสิตจากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรในปี พ.ศ. 2562 โดยเฉพาะในพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันในดินเปรี้ยวจัดในเขตจังหวัดนครนายก ปทุมธานี สระบุรี พระนครศรีอยุธยา ฉะเชิงเทรา และกรุงเทพฯ (เฉลี่ย 2,443 กิโลกรัมต่อไร่) และภาคตะวันออกเฉียงใต้ในจังหวัดจันทบุรีและตราด (เฉลี่ย 2,418 กิโลกรัมต่อไร่) นั้นต่ำกว่าภาคใต้ (เฉลี่ย 3,028 กิโลกรัมต่อไร่) และต่ำกว่าผลผลิตเฉลี่ยของประเทศ (เฉลี่ย 2,897 กิโลกรัมต่อไร่) อย่างไรก็ตาม ดินเปรี้ยวจัดมีศักยภาพในการผลิตปาล์มน้ำมันได้ แต่การปลูกปาล์มน้ำมันอาจประสบปัญหาในช่วงแรกของการปลูก เนื่องจากดินเปรี้ยวจัดส่วนใหญ่ในพื้นที่ดังกล่าวเป็นที่ลุ่มและมีพีเอชเป็นกรดรุนแรงมาก ทำให้ธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมละลายได้มากและเป็นพิษต่อระบบรากพืช (Shamshuddin *et al.*, 2004) ความเป็นกรดรุนแรงยังทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่ปาล์มน้ำมันต้องการในปริมาณมากเพื่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตทะเลสาบ (Tarmizi and Mohd Tayeb, 2006) นอกจากนี้ ธาตุอาหารรองและจุลธาตุบางชนิด โดยเฉพาะแคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และโบรอน (B) ซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นในการสร้างทะเลสาบของปาล์มน้ำมัน อาจเกิดความไม่สมดุลภายใต้สภาพที่เป็นกรดรุนแรงมาก เนื่องจากการละลายของธาตุเหล่านี้ลดลง ทำให้พืชไม่สามารถดูดใช้ได้ ส่งผลให้ปาล์มน้ำมันที่ปลูกในพื้นที่ดังกล่าวเจริญเติบโตไม่เท่าที่ควร และมีผลผลิตทะเลสาบปาล์มน้ำมันต่ำกว่าศักยภาพของพันธุ์ปาล์มน้ำมัน อย่างไรก็ตาม ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ทนต่อสภาพดินที่เป็นกรด สามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีพีเอชในพิสัย 3.9–4.2 (Auxtero and Shamshuddin, 1991) การปลูกปาล์มน้ำมันในดินเปรี้ยวจัดต้องมีการจัดการที่เหมาะสม เนื่องจากมีข้อจำกัดสำคัญ คือ เป็นดินเหนียวที่มีพีเอชเป็นกรดรุนแรงมากจากกรดกำมะถัน เช่น การใส่ปูนมาร์ลตามความต้องการปูนเพื่อลดปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมที่ละลายได้และทำให้

พีเอชดินสูงขึ้น (Palko and Wepping, 1994) และควบคุมระดับน้ำเพื่อป้องกันการออกซิเดชันของวัสดุซัลไฟด์ (Rifqi Hidayat and Fahmi, 2020) ซึ่งก่อให้เกิดกรดในปริมาณมาก ซึ่งเมื่อดินมีพีเอชสูงขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีที่ดีขึ้น ทำให้ปาล์มน้ำมันดูดใช้ในโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุจากดิน ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตด้านลำต้น เช่น การขยายพื้นที่ใบ การสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างชีวมวล และการให้ผลผลิตทะเลสาบปาล์มน้ำมัน เป็นต้น (Corley and Mok, 1972)

การวิเคราะห์ดินเพื่อประเมินความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน และการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุอาหารในใบปาล์มน้ำมันเป็นวิธีการที่ใช้ในการให้คำแนะนำปุ๋ยสำหรับปาล์มน้ำมัน (Balasundram *et al.*, 2006; Behera *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตาม ปาล์มน้ำมันเป็นพืชอายุหลายปีและมีระยะเวลาของการกำเนิดช่อดอกนานถึง 24–36 เดือน (Adam *et al.*, 2005) การประเมินระดับธาตุอาหารในดินเพียงอย่างเดียวเพื่อให้คำแนะนำปุ๋ยอาจไม่สอดคล้องกับความต้องการของปาล์มน้ำมันจึงจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุอาหารในดินที่สกัดได้ด้วยน้ำยาสกัดดินชนิดต่าง ๆ กับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมัน ซึ่งปัจจุบันมีการศึกษาความสัมพันธ์ระดับธาตุอาหารในดินกับดัชนีการเติบโตของปาล์มน้ำมันในประเทศกานา (Apori *et al.*, 2020) และอินโดนีเซีย (Balasundram *et al.*, 2006; Purwanto and Sudradjat, 2020) น้ำยาสกัดดินที่ใช้วิเคราะห์ดินมี 2 ประเภท ได้แก่ น้ำยาสกัดธาตุเดี่ยว ซึ่งสกัดได้เพียงธาตุที่สนใจเพียงธาตุเดียว เช่น 2 M KCl, Bray II และ 1 M NH<sub>4</sub>OAc เป็นต้น และน้ำยาสกัดดินพหุธาตุ ซึ่งสกัดได้หลายธาตุในคราวเดียว เช่น Mehlich I, Mehlich III, AB-DTPA และ Na-lactate เป็นต้น (Jones Jr., 1998) โดยน้ำยาสกัดเหล่านี้เป็นน้ำยาสกัดดินที่นิยมใช้ในการประเมินระดับความเป็นประโยชน์สำหรับการให้คำแนะนำปุ๋ยสำหรับพืชหลายชนิด แต่ในประเทศไทยยังขาดการศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำยาสกัด

ดินกับดินเปรี้ยวจัด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาคำแนะนำปุ๋ยสำหรับปาล์มน้ำมันที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด และข้อมูลการวิเคราะห์ดินที่มีอยู่ไม่พร้อมใช้ เนื่องจากยังขาดข้อมูลสหสัมพันธ์กับดัชนีพีชของปาล์มน้ำมัน ดังนั้นเพื่อการจัดการธาตุอาหารหลักอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับปาล์มน้ำมันที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด จำเป็นต้องทราบระดับความเข้มข้นของธาตุอาหารตามธรรมชาติของดินที่มีสหสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของปาล์มน้ำมัน ซึ่งจะนำไปสู่การให้คำแนะนำปุ๋ยสำหรับปาล์มน้ำมันได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ดินด้วยน้ำยาสกัดดินและศึกษาสหสัมพันธ์ของระดับความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่ได้จากวิธีการสกัดดินด้วยน้ำยาสกัดดิน 7 ชนิด ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการในประเทศไทย ได้แก่ 2 M KCl, Bray II, 1 M NH<sub>4</sub> OAc, Mehlich I, Mehlich III, AB-DTPA และ Na-lactate และศึกษาสหสัมพันธ์ของระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหลักที่ได้จากน้ำยาสกัดต่าง ๆ กับดัชนีด้านการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมันที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด ซึ่งข้อมูลวิธีการประเมินความเป็นประโยชน์สามารถนำไปพัฒนาเป็นคำแนะนำปุ๋ยสำหรับปาล์มน้ำมันได้เฉพาะพื้นที่ดินเปรี้ยวจัดของประเทศไทย

## อุปกรณ์และวิธีการ

### พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาและเก็บตัวอย่างดินอยู่ในพื้นที่สวนปาล์มน้ำมัน แบ่งเป็นพื้นที่ตัวแทนของภาคกลาง จำนวน 3 พื้นที่ (C1-C3) และพื้นที่ตัวแทนของภาคตะวันออก จำนวน 3 พื้นที่ (E1-E3) โดยพื้นที่ตัวแทนของภาคกลางตั้งอยู่ในจังหวัดนครนายก 2 พื้นที่ และจังหวัดสระบุรี 1 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ที่ 1 (C-1) อยู่ในศูนย์ศึกษาพัฒนาสวนส้มร่วงทุ่งรังสิต ตำบลบ้านพรึก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก (Lat. 14.2486250: Long. 100.9672230) จัดเป็นชุดดินรังสิตกรดจัด (Rs) ปาล์ม

น้ำมันที่อายุ 13 ปี พื้นที่ที่ 2 (C-2) อยู่ในสวนปาล์มของบริษัทอาร์ดีเกษตรพัฒนา จำกัด ศูนย์นครนายก บ้านโพธิ์แทน อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก (Lat. 14.20228460: Long 100.9717650) จัดเป็นชุดดินองครักษ์ (Ok) ปาล์มน้ำมันที่อายุ 8 ปี และพื้นที่ที่ 3 (C-3) อยู่ในสวนปาล์มของบริษัทสินธุเศรษฐ์ จำกัด ตำบลหนองหมู อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี (Lat. 14.3029250: Long 100.9231960) จัดเป็นชุดดินรังสิตกรดจัด (Rs) ปาล์มน้ำมันที่อายุ 12 ปี สำหรับพื้นที่ตัวแทนของภาคตะวันออก จัดจำแนกดินเป็นชุดดินชะอำ (Ca) โดยตั้งอยู่ในจังหวัดจันทบุรี 2 พื้นที่ และจังหวัดตราด 1 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ที่ 4 (E-1) ตั้งอยู่ในสวนปาล์มของเกษตรกรในตำบลโขมง อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี (Lat. 12.6161730: Long 101.9350920) ปาล์มน้ำมันที่อายุ 10 ปี พื้นที่ที่ 5 (E-2) ตั้งอยู่ในสวนปาล์มของเกษตรกรตำบลโขมง อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี (Lat 12.6358100: Long 101.9496800) ปาล์มน้ำมันที่อายุ 10 ปี และพื้นที่ที่ 6 (E-3) ตั้งอยู่ในสวนปาล์มของเกษตรกรบ้านท่าประดู่ ตำบลวังกระแจะ อำเภอเมือง จังหวัดตราด (Lat 12.2984730: Long 102.5057380) ปาล์มน้ำมันที่ใช้ อายุ 8 ปี ดินเปรี้ยวจัดที่ศึกษาทั้ง 6 พื้นที่ จำแนกอยู่ในกลุ่มดินใหญ่ Sulfic Endoaquepts และทุกพื้นที่มีการใส่ปูนโดโลไมต์และใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตของปาล์มน้ำมัน

### การเก็บตัวอย่างดิน การเตรียมตัวอย่างดิน และการวิเคราะห์ดิน

เก็บตัวอย่างดินจากสวนปาล์มน้ำมันที่คัดเลือกแล้ว โดยเก็บตัวอย่างดินจำนวน 4 จุดต่อต้น (เก็บดินได้ทรงพุ่มปาล์มน้ำมัน 4 ทิศทาง ในรัศมี 1.5 เมตร) จำนวน 2 ต้นต่อพื้นที่ ใช้สว่านเจาะดินและเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงความลึกที่อยู่บริเวณเขตรากหาอาหารปาล์มน้ำมัน (Jourdan and Rey, 1997) ผสมคลุกเคล้าดินให้เข้ากันและเก็บไว้ในถุงพลาสติกเพื่อขนย้ายไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ก่อนวิเคราะห์ดินในห้องปฏิบัติการ เตรียมตัวอย่างดิน โดยการผึ่งตัวอย่างดินให้แห้งในที่ร่ม จากนั้น นำไปบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 2 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีพื้นฐานตามวิธีมาตรฐานจากเอกสารของ Estefan *et al.* (2013) ประกอบด้วย การแจกกระจายอนุภาคดิน (Sand, Silt, Clay) พีเอชดิน (Soil pH) โดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ เท่ากับ 1:1 อินทรีย์วัตถุในดิน (Organic matter; OM) และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange capacity; CEC)

### การบันทึกข้อมูลดัชนีการเติบโตของต้นปาล์มน้ำมัน

บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นปาล์ม น้ำมัน จำนวน 3 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 ช่วงเริ่มต้นทดลอง พร้อมกับการเก็บตัวอย่างดิน ครั้งที่ 2 ช่วง 6 เดือนหลังจากเก็บตัวอย่างดิน และครั้งที่ 3 ช่วง 12 เดือนหลังจากเก็บตัวอย่างดิน โดยเริ่มเก็บข้อมูลปี พ.ศ. 2561 และสิ้นสุดการบันทึกข้อมูลปี พ.ศ. 2563 และสุ่มเก็บตัวอย่างใบปาล์มน้ำมันตำแหน่งที่ 17 ซึ่งเป็นใบดัชนี สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในช่วงเริ่มต้นทดลอง ในแต่ละพื้นที่ศึกษาทำการบันทึกการเจริญเติบโตและผลผลิตทะลายสะสมของต้นปาล์ม น้ำมันในช่วงเวลา 3 ปี โดยวิธีการไม่ทำลายตัวอย่างตามวิธีของ Corley *et al.* (1971) และ Lewis *et al.* (2020) ได้แก่ ความสูงของลำต้นปาล์มน้ำมัน (Trunk height) โดยการวัดจากฐานลำต้นถึงฐานใบยอดที่คลี่เต็มที่ และวัดพื้นที่ใบของทางใบที่ 17 ( $17^{th}$  leaf area;  $17^{th}$  LA) น้ำหนักแห้งทางใบที่ 17 ( $17^{th}$  frond dry matter;  $17^{th}$  FDm) น้ำหนักแห้งทะลาย (Dry matter of fresh fruit bunch; DFFB) ความหนาแน่นของลำต้นแห้ง (S) และน้ำหนักแห้งลำต้น (Trunk dry matter; TDm) ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$17^{th} LA = 0.55 \times (n \times lw) \quad \text{----- (1)}$$

โดย  $17^{th}$  LA คือ พื้นที่ใบของทางใบที่ 17 (ตารางเมตร) n คือ จำนวนใบย่อย l คือ ความยาวใบย่อย และ w คือ ความกว้างใบย่อย

$$17^{th} FDm = 0.1023P + 0.2062 \quad \text{----- (2)}$$

โดย  $17^{th}$  FDm คือ น้ำหนักแห้งทางใบที่ 17 (กิโลกรัม) และ P คือ ผลคูณของความกว้างและความหนาของก้านทางใบ ซึ่งเป็นช่วงต่อระหว่างก้านทางใบและแกนกลางใบที่เป็นจุดเกิดของใบย่อยล่างสุด

$$DFFB = 0.5472F - 0.372 \quad \text{----- (3)}$$

โดย DFFB คือ น้ำหนักแห้งทะลาย (กิโลกรัม) และ F คือ น้ำหนักทะลายสด (กิโลกรัม)

$$S = 7.62T + 83 \quad \text{----- (4)}$$

โดย S คือ ความหนาแน่นของลำต้นแห้ง (กรัมต่อลิตร) และ T คือ อายุปาล์มน้ำมันหลังปลูก

$$TDm = V \times S \quad \text{----- (5)}$$

โดย TDm คือ น้ำหนักแห้งลำต้น (กิโลกรัม) V คือ ปริมาตรของต้นปาล์มน้ำมัน (ลิตร) และ S คือ ความหนาแน่นของลำต้นแห้ง (กรัมต่อลิตร)

นำข้อมูลที่คำนวณได้จากสมการที่ 1-5 มาคำนวณดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมันตามวิธีของ Corley *et al.* (1971) และ Lewis *et al.* (2020) ประกอบด้วย ผลผลิตทะลายแห้ง (Yield of dry bunches; Y) คือ น้ำหนักแห้งทะลายทั้งหมด น้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น (Vegetative dry matter; VDM) อัตราการเจริญเติบโตของพืช (Crop growth rate; CGR) ดัชนีทะลายปาล์ม (Bunch index; BI) ดัชนีพื้นที่ใบต่อพื้นที่ (Leaf area index per area; LAI) และอัตราการสังเคราะห์แสงต่อพื้นที่ใบสุทธิ

(Net assimilation rate; NAR) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ

$$Y = DFFB \quad \text{----- (6)}$$

โดย Y คือ ผลผลิตทะเลายแห้ง (กิโลกรัมต่อตันต่อปี) และ DFFB คือ น้ำหนักแห้งทะเลาย

$$VDM = (17^{\text{th}} \text{ FDm} \times 5) + \text{TDm} \quad \text{----- (7)}$$

โดย VDM คือ น้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น (กิโลกรัมต่อตันต่อปี)  $17^{\text{th}} \text{ FDm}$  คือ น้ำหนักแห้งทางใบที่ 17 (สมการที่ 2) TDm คือ น้ำหนักแห้งลำต้น (สมการที่ 5) และ 5 คือ จำนวนใบต่อตันต่อปี (เฉลี่ย 5 ใบต่อตันต่อปี)

$$\text{CGR} = Y + \text{VDM} \quad \text{----- (8)}$$

โดย CGR คือ อัตราการเจริญเติบโตของพืช (กิโลกรัมต่อตันต่อปี) Y คือ ผลผลิตทะเลายแห้ง และ VDM คือ น้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น

$$\text{BI} = Y / (Y + \text{VDM}) \quad \text{----- (9)}$$

โดย BI คือ ดัชนีทะเลายปาล์ม Y คือ ผลผลิตทะเลายแห้ง และ VDM คือ น้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น

$$\text{LAI} = 17^{\text{th}} \text{ LA} \times \text{nL} \times \text{nPalm} \quad \text{----- (10)}$$

โดย LAI คือ ดัชนีพื้นที่ใบต่อพื้นที่  $17^{\text{th}} \text{ LA}$  คือ พื้นที่ของทางใบที่ 17 เฉลี่ยในรอบ 1 ปี nL คือ จำนวนใบต่อต้นเท่ากับ 40 และ nPalm คือ จำนวนต้นปาล์มต่อไร่เท่ากับ 22 ต้น ที่ระยะปลูก  $9 \times 9 \times 9$

$$\text{NAR} = \text{CGR} / \text{LAI} \quad \text{----- (11)}$$

โดย NAR คือ อัตราการสังเคราะห์แสงต่อพื้นที่ใบสุทธิ CGR คือ อัตราการเจริญเติบโตของพืช และ LAI คือ ดัชนีพื้นที่ใบต่อพื้นที่

## การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในใบปาล์มน้ำมันทางใบที่ 17

วิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในตัวอย่างใบปาล์มน้ำมันทางใบที่ 17 โดยเก็บตัวอย่างใบย่อย (Leaflet) บริเวณส่วนกลางของทางใบทั้งสองข้างข้างละ 3 ใบย่อย รวมเป็น 6 ใบย่อยต่อต้น ตัดส่วนโคนและปลายใบออกให้เหลือส่วนกลางใบย่อย ยาวประมาณ 15–20 เซนติเมตร นำส่วนของเส้นกลางใบออก เช็ดทำความสะอาดด้วยผ้าสะอาด ตัดให้เป็นชิ้นเล็ก แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 65–70 องศาเซลเซียส (Department of Agriculture, 2011) จากนั้น นำมาบดให้ละเอียดเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร โดยย่อยตัวอย่างใบด้วยกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เข้มข้น วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) โดยวิธี Kjeldahl วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P) ด้วยวิธี Vanadomolybdate ด้วยเครื่อง UV-vis spectroscopy และวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Total K) ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) จากนั้น นำผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในใบมาคำนวณการดูดใช้ธาตุอาหารหลักแต่ละธาตุในทางใบที่ 17 โดยใช้สูตรดังแสดงในสมการที่ (12)

$$\text{Uptake} = \text{Nutrient} \times 17^{\text{th}} \text{ FDm} \quad \text{----- (12)}$$

โดย Uptake คือ การดูดใช้ธาตุอาหารหลักแต่ละธาตุในทางใบที่ 17 (กรัมต่อใบ) Nutrient คือ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบ (กรัมต่อกิโลกรัม) และ  $17^{\text{th}} \text{ FDm}$  คือ น้ำหนักแห้งทางใบที่ 17 (กิโลกรัมต่อใบ)

## การวิเคราะห์ระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดินเปรี้ยวจัด

นำตัวอย่างดินแห้งที่เตรียมไว้มาวิเคราะห์ระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมด้วยการสกัดดินด้วยน้ำยาสกัดดินต่าง ๆ (Table 1)

**Table 1** Summary of soil extractants for evaluation of soil nutrients in acid sulfate soils

Soil extractant	Chemical ingredient	Solution pH	Soil (g): Extractant (mL)	Extraction time (Minutes)	Element	Reference
2 M KCl	2 M KCl	Unbuffered	10:100	60	N	Kachurina <i>et al.</i> (2000)
Bray II	0.03 M NH <sub>4</sub> F, 0.1 M HCl	1.0	3:30	40	P	Locke and Hanson (1991)
Ammonium acetate	1 M NH <sub>4</sub> OAc	7.0	3:30	30	K	Amorim <i>et al.</i> (2021)
Mehlich I	0.05 M HCl, 0.0125 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.2	25:100	5	NPK	Mylavarapu <i>et al.</i> (2002)
Mehlich III	0.2 M CH <sub>3</sub> COOH, 0.25 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> , 0.015 M NH <sub>4</sub> F, 0.013 M HNO <sub>3</sub> , 0.001 M EDTA	2.5	5:50	5	PK	Mehlich (1984), Wuenschel <i>et al.</i> (2015)
AB-DTPA	1 M NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub> , 0.005 M DTPA	7.6	25:50	15	PK	Soltanpour and Schwab (1977)
Na-lactate	0.111 M Lactic acid, NaOAc.3H <sub>2</sub> O, 0.327 M CH <sub>3</sub> COOH	5.5	5:100	30	NPK	Modified from Enger and Riehm (1958)

โดยวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) (N1) และวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในรูปอนินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนียมที่สกัดด้วยสารละลาย 2 M KCl (N2), Mehlich I (N3) และ sodium (Na) lactate (N4) และปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่สกัดด้วยสารละลาย 2 M KCl (N5), Mehlich I (N6) และ NA-lactate (N7) ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) ใช้ย่น้ำยาสกัดดินที่แตกต่างกันจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ Bray II (P1), Mehlich I (P2), Mehlich III (P3), AB-DTPA (P4) และ NA-lactate (P5) และวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสโดยวิธี Vanadomolybdate ด้วยเครื่อง UV-vis spectroscopy ส่วนปริมาณโพแทสเซียมในดินทำการวิเคราะห์โดยใช้ย่น้ำยาสกัดดิน 5 ชนิด ได้แก่ ammonium acetate (K1), Mehlich I (K2), Mehlich III (K3), AB-DTPA (K4) และ NA-lactate (K5) และวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมด้วยเครื่อง AAS

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์สหสัมพันธ์ด้วยวิธีของเพียร์สัน (Pearson's correlation) และวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ของดัชนีการเจริญเติบโตทางลำต้นและผลผลิตปาล์มน้ำมัน รวมถึงระดับความเข้มข้นและการดูดใช้ในโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในทางใบที่ 17 กับระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารที่วิเคราะห์ด้วยน้ำสกัดชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### สมบัติของดินเปรี้ยวจัดที่ใช้ปลูกปาล์มน้ำมัน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์บางประการของดินเปรี้ยวจัดที่ใช้ปลูกปาล์มน้ำมันทั้ง 6 บริเวณ (Table 2) พบว่า ดินเปรี้ยวจัดทั้ง 3 พื้นที่ ในเขตภาคกลางมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว (Clay) และในเขต

ภาคตะวันออก 3 พื้นที่ มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว (Clay loam) ดินทั้ง 6 พื้นที่ มีค่าพีเอชเป็นกรดรุนแรงมาก (เฉลี่ย  $3.89 \pm 0.23$  สำหรับภาคกลาง และ  $3.98 \pm 0.69$  สำหรับภาคตะวันออก) มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) อยู่ในเกณฑ์ต่ำปานกลางถึงปานกลาง (เฉลี่ย  $15.60 \pm 7.09$  กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับภาคกลาง และ  $22.90 \pm 4.93$  กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับภาคตะวันออก) มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง (เฉลี่ย  $25.90 \pm 3.66$  เซนติโมลต่อกิโลกรัม สำหรับภาคกลาง และ  $23.30 \pm 2.33$  เซนติโมลต่อกิโลกรัม สำหรับภาคตะวันออก) แสดงให้เห็นว่าดินเปรี้ยวจัดที่ใช้ปลูกปาล์มน้ำมันมีสภาพกรดที่รุนแรงสอดคล้องกับการศึกษาดินเปรี้ยวจัดในพื้นที่ราบภาคกลางโดย Palykaew *et al.* (2016) ซึ่งได้รายงานความเหมาะสมของดินเปรี้ยวต่อการปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่ราบภาคกลางของประเทศไทยว่า ดินเปรี้ยวจัดเกิดจากตะกอนน้ำกร่อย จำแนกเป็น Endoaquepts และ Sulfaquepts มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลางถึงสูง และมีความเหมาะสมปานกลางสำหรับการปลูกปาล์มน้ำมันเนื่องจากดินมีข้อจำกัดที่เป็นกรดรุนแรงจากการพบชั้นกรดกำมะถันที่ระดับความลึก 50–100 เซนติเมตร ทำให้ดินมีความเป็นกรด โดยกรดที่สกัดได้ ได้แก่ ไนโตรเจนและอะลูมิเนียม ซึ่งละลายอยู่ในดินในปริมาณมาก ทำให้ดินมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นและปริมาณเบสชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดินลดลง นอกจากนี้ ความเป็นกรดที่รุนแรงทำให้อะลูมิเนียมในผลึกแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 ละลายได้มากขึ้น ซึ่งอะลูมิเนียมในดินอาจอยู่ในรูปอะลูไนต์ (Aulunite;  $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ ) และอะลูมิเนียมซัลเฟต ( $AlOHSO_4$ ) ในสถานะที่พีเอชต่ำกว่า 4 การสูญเสียอะลูมิเนียมจากระบบผลึกแร่ ทำให้เกิดแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 ชนิดเคโอลิไนต์ (Kaolinite;  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) (Ritchie, 1995) และทำให้เป็นแร่ดินเหนียวแบบผสม (Mixed mineralogy) ซึ่งทำให้ดินมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง นอกจากนี้ ดินเปรี้ยวจัดที่ศึกษามีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง เนื่องจากดินพัฒนาอยู่ในสภาพพื้นที่ลุ่มต่ำที่มีน้ำขังและมีพืชปกคลุม ทำให้

การย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุเกิดขึ้นได้ช้า จึงทำให้มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสะสมในดินสูง (Kristensen *et al.*, 1995) โดยในพื้นที่ดินเปรี้ยวจัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุเฉลี่ย (22.9 กรัมต่อกิโลกรัม) สูงกว่าพื้นที่ดินเปรี้ยวจัดในภาคกลาง (15.6 กรัมต่อกิโลกรัม) เนื่องจากการใช้พื้นที่ดินเปรี้ยวจัดเพื่อการปลูกปาล์มน้ำมันในภาคกลางทำในพื้นที่สวนส้มร้างที่มีการใช้พื้นที่มาอย่างยาวนานกว่าพื้นที่ดินเปรี้ยวจัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้อินทรีย์วัตถุลดลงจากการย่อยสลายเมื่อมีการยกร่องปลูกพืช

### ดัชนีการเติบโตและผลผลิตปาล์มน้ำมัน

ข้อมูลดัชนีการเติบโตและผลผลิตเฉลี่ยของต้นปาล์มน้ำมันที่ใช้ศึกษาสัมพันธ์ของวิธีการวิเคราะห์ดินเปรี้ยวจัดด้วยน้ำยาสกัดชนิดต่าง ๆ ทั้ง 6 พื้นที่ แสดงใน Table 3 พบว่า ปาล์มน้ำมันมีความเข้มข้นของไนโตรเจน (Leaf-N) ในใบปาล์มน้ำมันทางใบที่ 17 สูงกว่าโพแทสเซียม (Leaf-K) และฟอสฟอรัส (Leaf-P) ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้การดูดใช้ธาตุไนโตรเจน (N-uptake) ในทางใบที่ 17 สูงกว่าธาตุโพแทสเซียม (K-uptake) และฟอสฟอรัส (P-uptake) ตามลำดับ ความเข้มข้นและการดูดใช้ในใบดัชนี (ในทางใบที่ 17) เป็นดัชนีหนึ่งที่ใช้ในการบ่งชี้การตอบสนองของพืชต่อธาตุอาหารและทำนายการให้ผลผลิตทะลายปาล์มทางอ้อม (Fairhurst and Mutert, 1999) ส่วนข้อมูลด้านการเติบโตและผลผลิตปาล์มน้ำมัน ได้แก่ พื้นที่ใบของ

ทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> LA) ซึ่งอยู่ในพิสัย 2.03–8.03 ตารางเมตร และน้ำหนักแห้งทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> FDM) อยู่ในพิสัย 5.04–6.80 กิโลกรัม เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงและการสร้างชีวมวลของปาล์มน้ำมัน รวมถึงผลผลิตทะลายปาล์มน้ำมัน (Hardon *et al.*, 1969; Corley, 1973) น้ำหนักแห้งทะลายปาล์มน้ำมันสด (FFB) อยู่ในพิสัย 1,666–3,653 กิโลกรัมต่อต้นต่อปี ส่วนข้อมูลดัชนีการเติบโตแบบไม่ทำลายตัวอย่างที่ได้จากการคำนวณซึ่งใช้ประเมินอัตราการเจริญเติบโตรวมของปาล์มน้ำมันต่อพื้นที่ต่อเวลา (Corley *et al.*, 1971; Lewis *et al.*, 2020) พบว่า น้ำหนักแห้งทะลายปาล์มน้ำมัน (DFFB) มีค่าอยู่ในพิสัย 41.07–90.48 กิโลกรัมต่อต้นต่อปี น้ำหนักแห้งด้านการเติบโตทางลำต้นรวม (VDM) มีค่าอยู่ในพิสัย 311.5–781.2 กิโลกรัมต่อต้นต่อปี อัตราการเจริญเติบโตของพืช (CGR) มีค่าอยู่ในพิสัย 13.64–19.18 ต้นต่อไร่ต่อปี ดัชนีทะลายปาล์มน้ำมัน (BI) มีค่าอยู่ในพิสัย 0.08–0.90 ดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) มีค่าอยู่ในพิสัย 3,785–7,176 ตารางเมตรต่อไร่ และอัตราการสังเคราะห์แสงต่อพื้นที่ใบซึ่งแสดงการสะสมชีวมวลต่อพื้นที่ใบบริสุทธิ์ (NAR) มีค่าอยู่ในพิสัย 1.74–3.62 กรัมต่อตารางเดซิเมตรต่อสัปดาห์ ข้อมูลดัชนีการเติบโตเหล่านี้ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของน้ำยาสกัดดินโดยการวิเคราะห์สัมพันธ์



**Table 2** General properties of studied acid sulfate soils from Central and East Regions of Thailand

Soil property	Soil sampling site									
	Central Region					East Region				
	C-1	C-2	C-3	Mean		E-1	E-2	E-3	Mean	
Texture	C	C	C	C		CL	CL	CL	CL	CL
Sand (%)	28.23 ± 2.46	25.08 ± 0.67	26.75 ± 0.97	26.68 ± 1.37		21.24 ± 0.88	28.43 ± 14.14	28.50 ± 5.69	26.11 ± 6.90	
Silt (%)	34.92 ± 1.32	30.70 ± 1.24	31.50 ± 1.40	32.37 ± 1.32		30.10 ± 3.56	25.80 ± 3.04	27.70 ± 1.58	27.80 ± 2.73	
Clay (%)	36.85 ± 0.04	44.22 ± 1.24	41.75 ± 0.10	40.94 ± 0.46		48.66 ± 0.14	45.77 ± 0.31	43.80 ± 0.10	46.07 ± 0.18	
pH (1:1)	3.83 ± 0.32	3.49 ± 0.17	4.34 ± 0.19	3.89 ± 0.23		3.62 ± 0.48	4.06 ± 0.44	4.27 ± 1.14	3.98 ± 0.69	
OM (g kg <sup>-1</sup> )	14.80 ± 6.64	16.10 ± 6.64	16.00 ± 7.99	15.60 ± 7.09		25.40 ± 2.13	32.60 ± 6.35	10.70 ± 6.31	22.90 ± 4.93	
CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	23.90 ± 4.99	27.00 ± 3.19	26.70 ± 2.79	25.90 ± 3.66		18.30 ± 1.37	26.50 ± 3.35	25.30 ± 2.27	23.30 ± 2.33	

pH = soil pH<sub>w</sub> measured in a 1:1 soil:water suspension, OM = organic matter determined by Walkley and Black titration, CEC = cation exchange capacity analyzed by 1 M NH<sub>4</sub>OAc pH 7.0 according to Estefan *et al.* (2013), C = clay, CL = clay loam analyzed by pipette method. Values are presented as mean ± standard deviation

**Table 3** Oil palm 17<sup>th</sup> leaf indicators, yield and calculated nondestructive growth parameters from Central and East Regions of Thailand

Oil palm parameters	Studied sites							
	Central Region			East Region				
	C-1	C-2	C-3	Mean	E-1	E-2	E-3	Mean
<b>17<sup>th</sup> leaf indicators</b>								
Leaf-N (g kg <sup>-1</sup> )	21.09 ± 3.35	23.57 ± 4.12	25.96 ± 1.56	23.13 ± 3.01	28.36 ± 1.03	24.63 ± 2.62	20.06 ± 2.20	24.35 ± 1.95
Leaf-P (g kg <sup>-1</sup> )	1.40 ± 0.30	1.55 ± 0.17	2.00 ± 0.23	1.65 ± 0.16	1.73 ± 0.59	1.69 ± 0.08	1.56 ± 0.15	1.66 ± 0.09
Leaf-K (g kg <sup>-1</sup> )	14.12 ± 0.65	17.41 ± 3.69	16.44 ± 4.22	15.99 ± 2.85	16.34 ± 0.81	17.77 ± 0.99	16.24 ± 1.76	16.78 ± 1.18
N-uptake (g frond <sup>-1</sup> )	32.26 ± 10.24	39.52 ± 11.40	41.84 ± 3.41	37.87 ± 8.35	78.90 ± 11.54	85.69 ± 11.05	87.26 ± 11.49	83.95 ± 11.35
P-uptake (g frond <sup>-1</sup> )	4.53 ± 0.56	4.71 ± 0.81	5.56 ± 1.03	4.93 ± 0.64	6.92 ± 0.89	7.11 ± 1.26	6.80 ± 0.82	6.94 ± 1.53
K-uptake (g frond <sup>-1</sup> )	16.96 ± 1.21	15.69 ± 3.14	15.78 ± 1.93	16.14 ± 2.09	45.15 ± 3.05	39.30 ± 3.95	33.84 ± 2.51	39.43 ± 3.17
17 <sup>th</sup> LA (m <sup>2</sup> )	7.85 ± 1.46	5.30 ± 2.02	6.67 ± 0.56	6.60 ± 1.34	8.03 ± 1.37	3.79 ± 3.35	2.03 ± 0.85	4.61 ± 1.85
17 <sup>th</sup> FDM (kg)	6.18 ± 1.22	5.04 ± 0.89	5.95 ± 1.22	4.22 ± 1.11	6.43 ± 2.16	6.80 ± 0.97	5.84 ± 0.75	6.35 ± 1.29
<b>Calculated nondestructive growth indicators</b>								
FFB (kg palm <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	2,880 ± 1,349	1,666 ± 1,169	3,653 ± 787	2,733 ± 1,101	3,546 ± 314	3,256 ± 2,342	1,862 ± 706	2,888 ± 1,120
DFFB (kg palm <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	71.26 ± 33.57	41.07 ± 29.09	90.48 ± 19.57	67.60 ± 27.41	73.95 ± 43.20	80.58 ± 58.24	45.94 ± 17.55	66.49 ± 39.66
VDM (kg palm <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	669.5 ± 267.1	311.5 ± 75.0	781.2 ± 106.1	587.4 ± 149.3	573.5 ± 83.7	593.3 ± 42.5	574.0 ± 79.9	580.2 ± 68.7
CGR (ton rai <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	16.30 ± 5.44	17.76 ± 2.19	19.18 ± 2.12	17.74 ± 3.25	14.30 ± 1.90	14.83 ± 1.02	13.64 ± 1.74	14.25 ± 1.55
BI	0.12 ± 0.09	0.10 ± 0.06	0.11 ± 0.03	0.11 ± 0.60	0.90 ± 0.12	0.12 ± 0.08	0.08 ± 0.03	0.36 ± 0.07
LAI (m <sup>2</sup> rai <sup>-1</sup> )	7,176 ± 1,006	4,455 ± 1,190	6,494 ± 515.3	6,041 ± 904	4,362 ± 1,238	5,992 ± 1,174	3,785 ± 524	4,713 ± 979
NAR (g dm <sup>2</sup> week <sup>-1</sup> )	2.30 ± 0.79	1.74 ± 0.27	2.98 ± 0.49	2.34 ± 0.51	2.73 ± 0.76	2.58 ± 0.69	3.62 ± 0.33	2.97 ± 0.59

Leaf-N, -P, -K = N P K concentrations in 17<sup>th</sup> frond leaflet; N-P-K-uptake = N, P, K content uptake per 17<sup>th</sup> frond dry matter; 17<sup>th</sup> LA = leaf area of 17<sup>th</sup> frond leaflet; 17<sup>th</sup> FDM = 17<sup>th</sup> frond dry matter; FFB = fresh fruit bunch weight; DFFB = dry matter of fresh fruit bunch; VDM = vegetative dry matter; CGR = crop growth rate; BI = bunch index; LAI = leaf area index per area; NAR = net assimilation rate. Nondestructive parameters were calculated according to Corley *et al.* (1971) and Lewis *et al.* (2020). Values are presented as mean ± standard deviation

**ดัชนีความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในดิน**

ปริมาณความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่สกัดได้ในดินเปรี้ยวจัดที่ปลูกปาล์มน้ำมันด้วยวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ (Figure 1) พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่สกัดด้วยวิธี N1 อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง (Figure 1A) ส่วนปริมาณไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมและไนเตรตที่สกัดด้วยวิธี N2-N7 จัดอยู่ในเกณฑ์ต่ำมากทั้งสองรูป โดยดินในทุกพื้นที่ศึกษามีปริมาณแอมโมเนียมอยู่ในพิสัย 1.6-9.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Figure 1B) และมีปริมาณไนเตรตอยู่ในพิสัย 4.1-14.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Figure 1C) ปริมาณไนโตรเจนที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Na-lactate มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำยาสกัด 2 M KCl และ Mehlich I

ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากน้ำยาสกัด Na-lactate มีส่วนประกอบที่เป็นกรดอินทรีย์ acetic acid และ lactic acid และมีไฮเดียมไอออนที่สามารถสกัดไนโตรเจนในรูปอนินทรีย์ทั้งสองรูปในรูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนได้ (Enger and Riehm, 1958; Wuenscher *et al.*, 2015) ในสภาวะที่ดินเป็นกรดรุนแรงได้มากกว่าน้ำยาสกัด 2 M KCl ซึ่งเป็นเกลือที่มีเพียง K<sup>+</sup> และ Cl<sup>-</sup> ที่ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนกับไนโตรเจนทั้งสองรูป ซึ่งในสภาวะที่เป็นกรดรุนแรงมีโปรตอน อะลูมิเนียม และซัลเฟตในระบบมาก ทำให้เกิดการแข่งขันของไอออนและการดูดซับของโพแทสเซียมในแร่ดินเหนียว ทำให้กิจกรรมของโพแทสเซียมไอออนและคลอไรด์ไอออนในการสกัดไนโตรเจนอนินทรีย์ลดลง (Keene *et al.*, 2004)

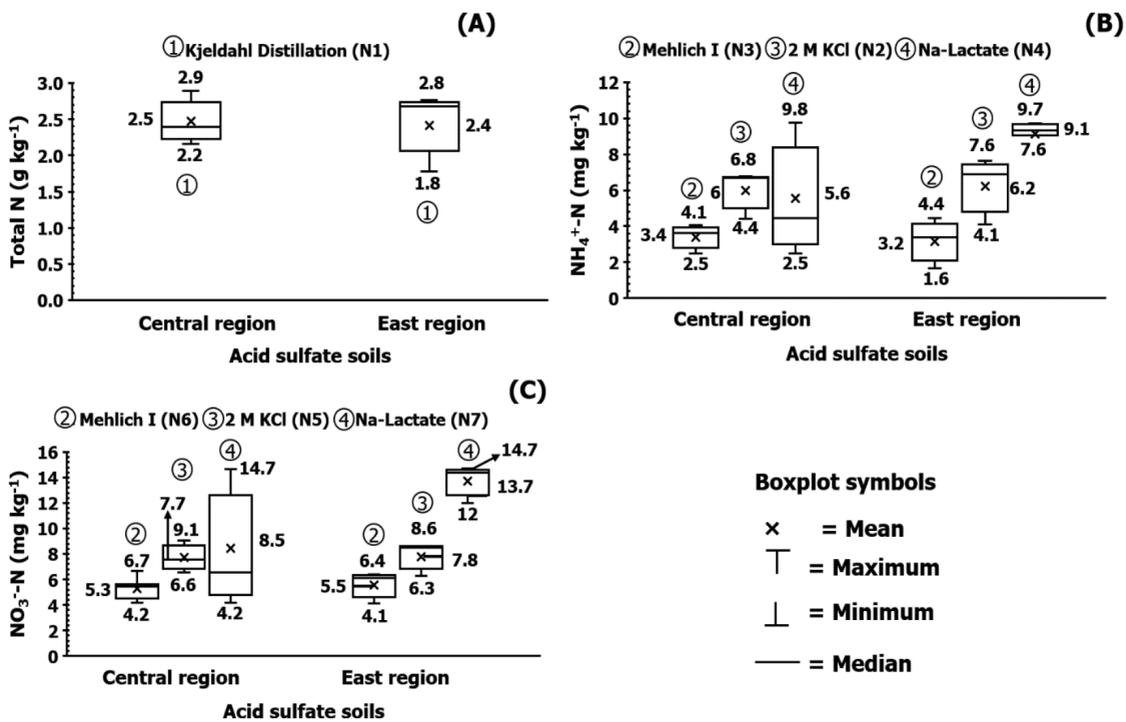


Figure 1 Boxplot of available N indices by various soil extractants: (A) total N content determined by Kjeldahl methods, (B) NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents determined by Mehlich I, 2 M KCl and Na-lactate, and (C) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N contents determined by Mehlich I, 2 M KCl and Na-lactate

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่วิเคราะห์ด้วยน้ำยาสกัด 5 ชนิด (Figure 2A) พบว่า ฟอสฟอรัสที่สกัดได้โดยวิธี Bray II (P1), Mehlich III (P3) และ AB-DTPA (P4) จัดอยู่ในระดับสูง ทั้งนี้ เนื่องมาจากน้ำยาสกัด Bray II มีพีเอชที่เป็นกรดรุนแรง ทำให้สามารถปลดปล่อยฟอสเฟตที่ถูกตรึงและที่ดูดซับไว้กับเหล็กและอะลูมิเนียม สอดคล้องกับการศึกษาของ Krairapanond *et al.* (1993) ซึ่งรายงานว่า ฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัดของประเทศไทยถูกดูดซับในรูปของเหล็กออกไซด์ในสภาพศักย์รีดอกซ์ (Eh) ลดลงและพีเอชเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อดินมีศักย์รีดอกซ์สูงขึ้นและพีเอชลดต่ำลง ดินจะปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากการเปลี่ยนรูปของเหล็กจากเฟอริก ( $Fe^{3+}$ ) เป็นเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) นอกจากนี้ ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ด้วยน้ำยาสกัด Bray II ในดินเปรี้ยวจัดที่มีปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมรูปอิสระ (Free Fe-Al oxides) มีค่าสูงกว่าดินเปรี้ยวจัดที่มีปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมอิสระต่ำกว่า และกรด HCl ที่เจือจางในสารละลายจะช่วยละลายฟอสเฟตที่สร้างพันธะกับแคลเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม (Wuenschel *et al.*, 2015) ส่วนน้ำยาสกัด Mehlich III มีฤทธิ์เป็นกรดรุนแรงที่สกัดได้หลายธาตุ ได้แก่ P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Mn และ Fe โดยในสารละลายมีทั้งฟลูออไรด์ ไอออนที่จะสกัดฟอสเฟตที่อยู่ในรูปของเหล็กและอะลูมิเนียม และกรดอะซิติกซึ่งช่วยละลายฟอสเฟตที่มีพันธะกับแคลเซียม ส่วนสารละลาย AB-DTPA (P4) ที่มีพีเอชเป็นกลางเป็นน้ำยาสกัดที่สามารถสกัดได้หลายธาตุ รวมถึงจุลธาตุที่สามารถสร้างลิแกนด์กับ DTPA ในสถานะที่เป็นกลางถึงเป็นด่าง (Soltanpour and Schwab, 1977) ทำให้ฟอสเฟตที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมิเนียมถูกปลดปล่อยสู่สารละลายดินและละลายได้มากขึ้นเมื่อสกัดด้วยน้ำยาสกัดดินที่มีพีเอชเป็นกลาง ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Mehlich I (P2) และ Na-lactate (P5) อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง โดยมีปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้น้อยกว่าน้ำยาสกัดชนิดอื่น ซึ่ง Mehlich I มีฤทธิ์เป็นกรดแต่มีความเข้มข้นของกรด HCl และ  $H_2SO_4$  เจือจางและใช้

กับดินกรด กรดเจือจางจะทำหน้าที่ละลายฟอสเฟตที่สร้างพันธะกับแคลเซียมและส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการละลายฟอสเฟตต่ำในดินเปรี้ยวจัดที่มีเหล็กและอะลูมิเนียมสูง ส่วน Na-lactate ซึ่งมีส่วนประกอบของสารคล้ายกับน้ำยาสกัด calcium acetate lactate (CAL) ต่างกันที่ชนิดของแคตไอออนที่เป็น Na เป็นสารละลายกรดเล็กน้อย และมีกรดแลคติกและกรดอะซิติกทำหน้าที่ละลายฟอสเฟตในรูปที่ละลายและแลกเปลี่ยนได้ เช่น แคลเซียมฟอสเฟต (Wuenschel *et al.*, 2015) ซึ่งมีอยู่ในปริมาณน้อยในดินเปรี้ยวจัด จึงทำให้สกัดฟอสฟอรัสจากดินเปรี้ยวจัดได้น้อยกว่าสารละลาย Bray II และ Mehlich III ซึ่งจำเพาะต่อฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นรูปฟอสฟอรัสเด่นในดินเปรี้ยวจัดของประเทศไทย (Krairapanond *et al.*, 1993)

ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินโดยน้ำยาสกัด 5 ชนิด (Figure 2B) พบว่า น้ำยาสกัดที่สกัดโพแทสเซียมทั้ง 5 ชนิด จัดอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงสูงมากทุกพื้นที่ศึกษา (61–545 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เมื่อพิจารณาจากชนิดของน้ำยาสกัด พบว่า สำหรับพื้นที่ภาคกลาง น้ำยาสกัด Na-lactate (K5) สกัดโพแทสเซียมได้มากที่สุด (545 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) รองลงมาคือ Mehlich I (K2) (192 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม), Mehlich III (K3) (187 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม), AB-DTPA (K4) (121 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และ 1 M  $NH_4OAc$  (K1) (109 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า น้ำยาสกัด Na-lactate (K5) สกัดโพแทสเซียมได้มากที่สุด (312 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) รองลงมาคือ AB DTPA (K4) (145 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม), 1 M  $NH_4OAc$  (K1) (127 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม), Mehlich III (K3) (90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และ Mehlich I (K2) (61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ในดินเปรี้ยวจัดภาคกลางมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าและมีความแปรปรวนเชิงพื้นที่มากกว่าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทั้งนี้ อาจเป็นผลตกค้างจากการใส่ปุ๋ย

โพแทสเซียมต่อเนื่องในส่วนปาล์มน้ำมัน และส่วนหนึ่งอาจมาจากการปลดปล่อยจากแร่ดินเหนียวในดินในสภาพที่เป็นกรดรุนแรงมาก (Keene *et al.*, 2004) เป็นที่น่าสังเกตว่า โพแทสเซียมที่สกัดโดยน้ำยาสกัด Na-lactate มีความจำเพาะต่อโพแทสเซียมในดินกรดรุนแรง โดยน้ำยาสกัด Na-lactate มีพีเอชเป็นกรดเล็กน้อยและมี  $\text{Na}^+$  ที่สามารถแลกเปลี่ยนกับโพแทสเซียมบริเวณ exchange site ของดิน ส่วนกรดแลคติกและอะซิติกจะทำหน้าที่สกัดและละลายโพแทสเซียมทั้งในรูปที่ละลายน้ำได้ (Wuenschel *et al.*, 2015) รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รวมถึงรูปที่ไม่แลกเปลี่ยนที่อยู่ในผลึกของแร่ดินเหนียวและผลึกของแร่จำไรโซต์ ซึ่งการละลายและปลดปล่อยโพแทสเซียมขึ้นอยู่กับพีเอชของดินที่เปลี่ยนไป (Elwood Madden *et al.*, 2012) โดยหากพีเอชดินลดลงมีผลทำให้ความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมลดลงเนื่องจากแคลเซียมในดินละลายได้ต่ำและแทนที่โพแทสเซียมในดินได้น้อยลง การที่น้ำยา

สกัดดินที่ใช้ประเมินระดับความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมโดยทั่วไปซึ่งใช้หลักการการแทนที่ด้วยไอออน เช่น  $\text{NH}_4^+$  ในสารละลาย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  และการละลายด้วยกรดเจือจาง เช่น Mehlich I และ Mehlich III สกัดโพแทสเซียมได้น้อยกว่าวิธีการแลกเปลี่ยนด้วยไอออนและลิแกนด์ เช่น AB-DTPA และ Na-lactate เป็นผลจากการสกัดโพแทสเซียมด้วยการแลกเปลี่ยนด้วยไอออนร่วมกับสารอินทรีย์ลิแกนด์ในสภาพที่มีพีเอชสูง ทำให้สารละลายดินขณะสกัดมีพีเอชสูงขึ้นส่งผลให้โพแทสเซียมปลดปล่อยจากส่วนที่ละลายน้ำได้และส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ รวมถึงส่วนที่สามารถสร้างพันธะกับลิแกนด์ได้มากขึ้น ในขณะที่น้ำยาสกัดดินด้วยการแลกเปลี่ยนด้วยไอออนอย่างเดียว (1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7.0) และน้ำยาสกัดกรดเจือจาง (Mehlich I, Mehlich III) โพแทสเซียมละลายได้น้อย เนื่องจากน้ำยาสกัดมีฤทธิ์เป็นกรดรุนแรงและดินมีพีเอชที่ต่ำมาก ทำให้สกัดโพแทสเซียมได้น้อยที่สุด

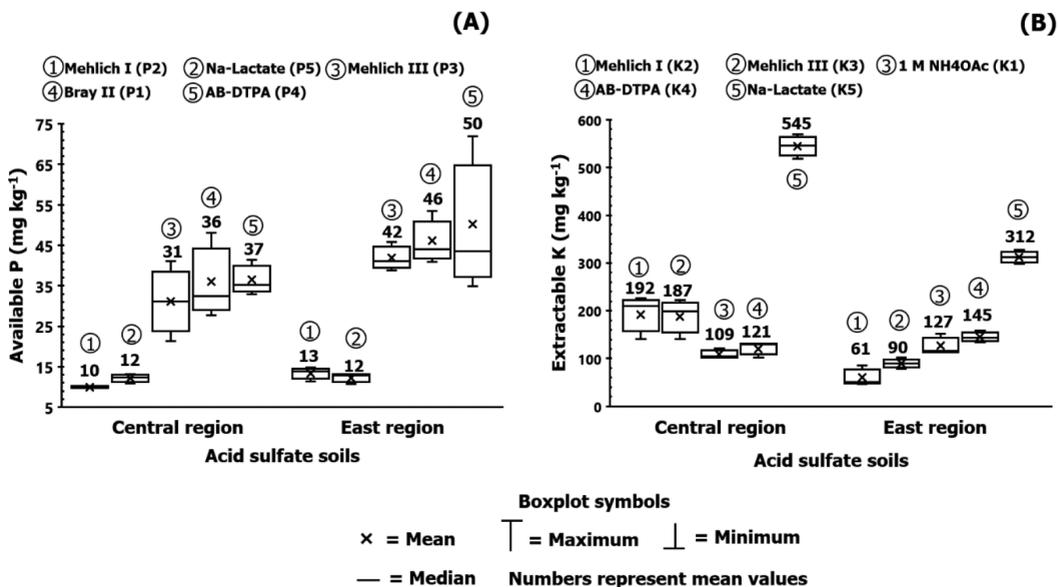
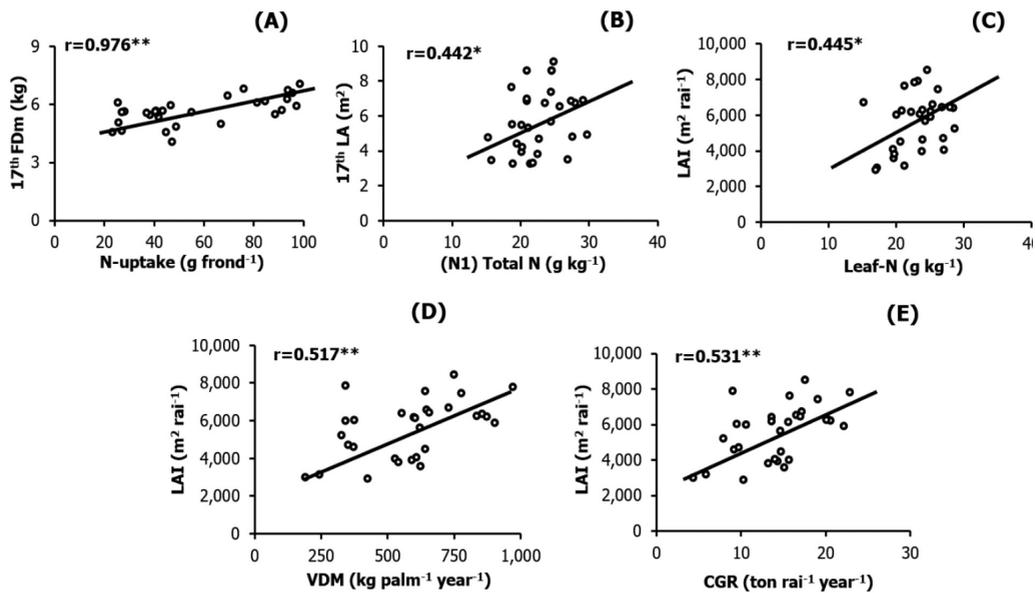


Figure 2 Boxplot of available P and extractable K extracted by various soil extractants: (A) available P determined by Mehlich I, Na-lactate, Mehlich III, Bray II and AB-DTPA and (B) extractable K determined by Mehlich I, Mehlich III, 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7.0, AB-DTPA and Na-lactate

## สหสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนทั้งหมดในดินเปรียบเทียบกับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมัน

ผลการศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่วิเคราะห์โดยใช้น้ำยาสกัดดินชนิดต่าง ๆ กับดัชนีการเติบโตและผลผลิตปาล์มน้ำมันในดินเปรี้ยวจัด (Figure 3) พบว่า ปริมาณการดูดใช้ไนโตรเจนในทางใบที่ 17 (N-uptake) มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับน้ำหนักแห้งทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> FDM) ( $r = 0.946$ ;  $P < 0.01$ ) (Figure 3A) พื้นที่ใบของทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> LA) มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (N1) ( $r = 0.442$ ;  $P < 0.05$ ) (Figure 3B) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความเข้มข้นของไนโตรเจนในทางใบที่ 17 (Leaf-N) ( $r = 0.445$ ,  $P < 0.05$ ) (Figure 3C) น้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น (VDM) ( $r = 0.517$ ;  $P < 0.01$ ) (Figure 3D) และอัตราการเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมัน (CGR) (0.531;  $P < 0.01$ ) (Figure 3E) แสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนมีผลต่อดัชนีการเติบโตทางลำต้น (Vegetative growth) ได้แก่ การสร้างและการขยายขนาดพื้นที่ใบและเพิ่มน้ำหนักแห้งทางใบของปาล์มน้ำมัน ทั้งยังช่วยในการสังเคราะห์แสงทำให้ปาล์มน้ำมันมีอัตราการเติบโตสูงขึ้น ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ในการศึกษาครั้งนี้ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างไนโตรเจนอนินทรีย์ที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด (N2–N7) กับดัชนีการเติบโตและ

ผลผลิตของปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากไนโตรเจนอนินทรีย์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นกับกิจกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะกระบวนการ mineralization และเกิดการสูญเสียไนโตรเจนจากการชะละลายหลังจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ (Mitchell *et al.*, 2000) และกระบวนการ immobilization จากการลดลงของชีวมวลของจุลินทรีย์หลังจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเป็นการปลูกปาล์มน้ำมัน ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณของไนโตรเจนอนินทรีย์ในดิน (Allen *et al.*, 2015) ประกอบกับปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นอายุหลายปี ทำให้ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของการเติบโตในช่วงเวลาที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้พบความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนทั้งหมดและดัชนีพื้นที่ใบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งบ่งชี้ถึงการเติบโตของปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้ ไนโตรเจนทั้งหมดในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปอินทรีย์หรือมีความสัมพันธ์กับอินทรีย์วัตถุในดิน ซึ่งจะปลดปล่อยไนโตรเจนให้กับต้นปาล์มน้ำมันผ่านกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ (Bu *et al.*, 2015; Rousk *et al.*, 2016) ดังนั้น ไนโตรเจนทั้งหมดจึงเป็นดัชนีความเป็นประโยชน์ที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับการให้คำแนะนำปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับปาล์มน้ำมันในพื้นที่ดินเปรี้ยวจัด นอกจากนี้ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินมีสหสัมพันธ์สูงกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเป็นอีกดัชนีหนึ่งที่สามารถใช้ในการประมาณความเป็นประโยชน์ทางอ้อมของไนโตรเจนได้

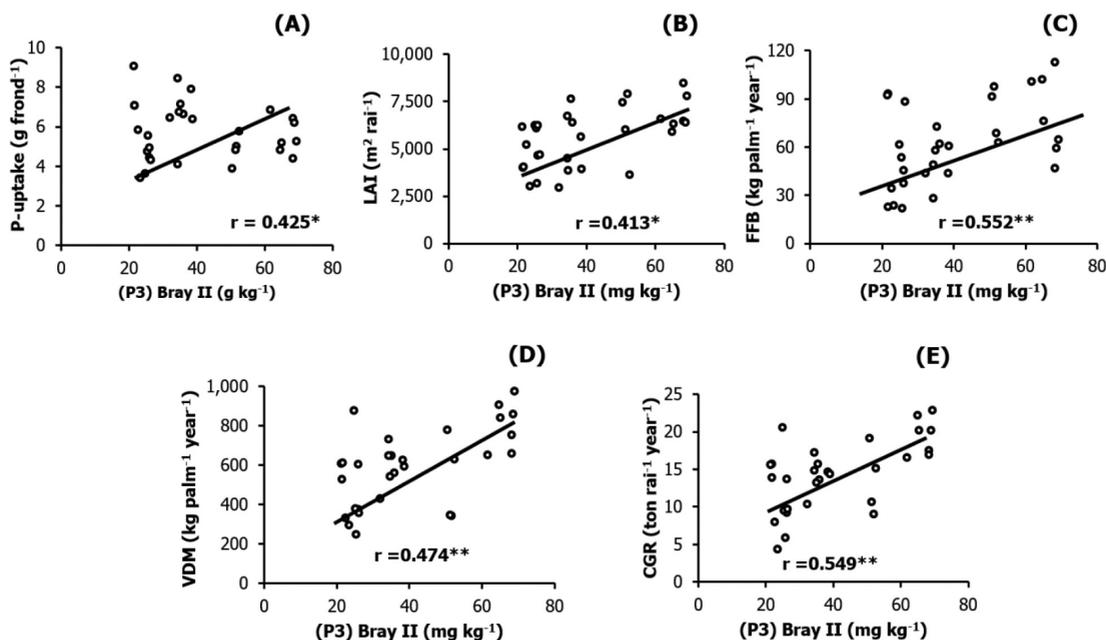


**Figure 3** Relationships between (A) N content uptake per 17<sup>th</sup> frond dry matter (N-uptake) and 17<sup>th</sup> frond dry matter (17<sup>th</sup> Fdm), (B) total N and leaf area of 17<sup>th</sup> frond (17<sup>th</sup> LA), (C) N concentration in 17<sup>th</sup> frond leaflet (Leaf-N) and leaf area index (LAI), (D) LAI and vegetative dry matter (VDM) and (E) LAI and crop growth rate (CGR).  $r$  = Pearson's correlation coefficient, \* significant at 0.05, \*\* significant at 0.01

### สหสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเปรียบเทียบกับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมัน

ผลการศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินที่วิเคราะห์โดยใช้น้ำยาสกัดดินชนิดต่าง ๆ กับดัชนีการเติบโตและผลผลิตปาล์มน้ำมันในดินเปรี้ยวจัด (Figure 4) พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่สกัดโดยน้ำยาสกัด Bray II เท่านั้นที่มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสในทางใบที่ 17 (P-uptake) (Figure 4A) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) (Figure 4B) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.425 และ 0.413 ( $P < 0.05$ ) ตามลำดับ และพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่สกัดโดยน้ำยาสกัด Bray II มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญอยู่ทางสถิติกับน้ำหนักทะลายปาล์มน้ำมันสด (FFB) (Figure 4C) น้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น (VDM) (Figure 4D) และอัตราการเจริญเติบโตของพืช (CGR) (Figure 4E) โดยมีค่า

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.522, 0.474 และ 0.549 ( $P < 0.01$ ) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่สกัดโดยน้ำยาสกัด Bray II มีสหสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมันมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำยาสกัด Bray II มีฟือเอชที่เป็นกรดรุนแรงและมีฟลูออไรด์ไอออนเป็นองค์ประกอบทำให้สามารถไล่ที่ฟอสเฟตที่ถูกตรึงและที่ดูดซับไว้กับเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในดินเปรี้ยวจัดได้ นอกจากนี้กรด HCl ที่เจือจางในสารละลายจะช่วยละลายฟอสเฟตที่สร้างพันธะกับแคลเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม (Wuenscher *et al.*, 2015) ซึ่งเป็นเงื่อนไขใกล้เคียงกับสภาวะทางเคมีของเขตรากของปาล์มน้ำมันที่ดูดใช้ฟอสฟอรัสในสภาพกรดรรุนแรง ฟอสฟอรัสที่สกัดด้วย Bray II มีสหสัมพันธ์กับการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมัน และเป็นน้ำยาสกัดที่เหมาะสมสำหรับการสกัดฟอสฟอรัสรูปที่สร้างพันธะกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีอยู่มากในดินเปรี้ยวจัด

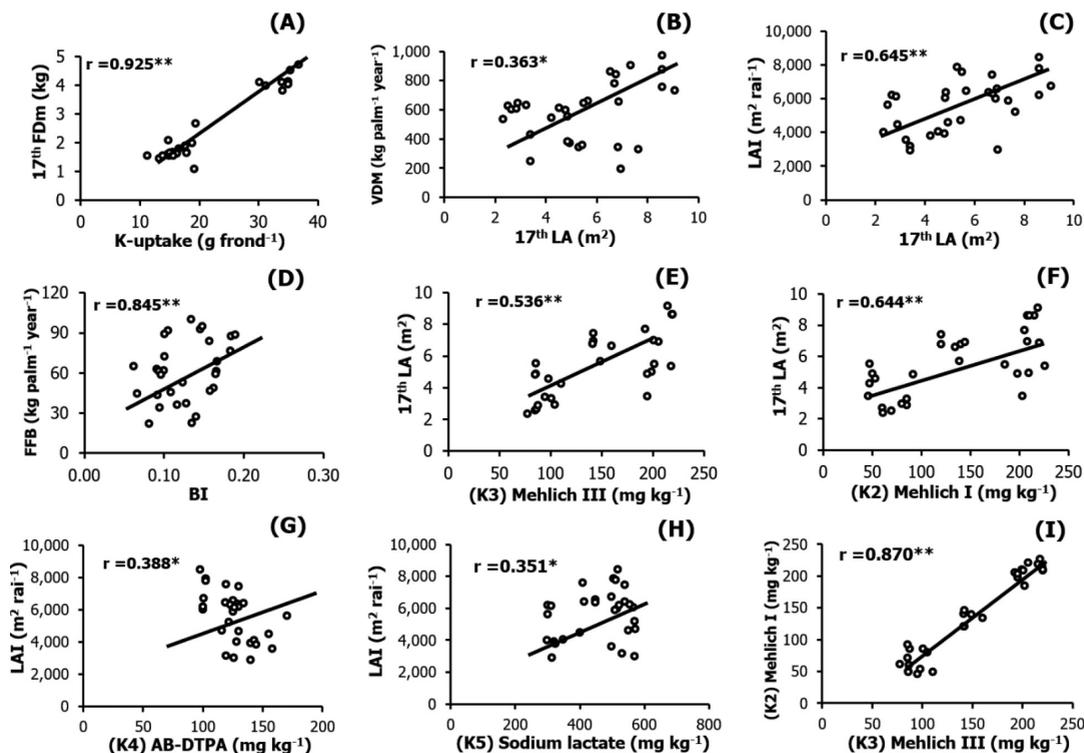


**Figure 4** Relationships between available P extracted by Bray II (P3) and (A) P content uptake per 17<sup>th</sup> frond dry matter (P-uptake), (B) leaf area index (LAI), (C) fresh fruit bunch weight (FFB), (D) vegetative dry matter (VDM), and (E) crop growth rate (CGR).  $r$  = Pearson's correlation coefficient, \* significant at 0.05, \*\* significant at 0.01

### สหสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินเปรี้ยวจัดกับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมัน

ผลการศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินที่วิเคราะห์ด้วยน้ำยาสกัดดินชนิดต่าง ๆ กับดัชนีการเติบโตและผลผลิตปาล์มน้ำมันในดินเปรี้ยวจัด (Figure 5) พบว่า ปริมาณการใช้โพแทสเซียมในทางใบที่ 17 (K- uptake) มีสหสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับน้ำหนักแห้งของทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> FDM) ( $r = 0.925$ ;  $P < 0.01$ ) (Figure 5A) พื้นที่ใบของทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> LA) มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับน้ำหนักแห้งการเติบโตทางลำต้น (VDM) ( $r = 0.363$ ;  $P < 0.05$ ) (Figure 5B) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ( $r = 0.645$ ,  $P < 0.05$ ) (Figure 5C) ส่วนดัชนีทะเลาะปาล์มน้ำมัน (BI) มีสหสัมพันธ์กับน้ำหนักทะเลาะสด (FFB) ( $r = 0.845$ ;  $P < 0.01$ ) (Figure 5D)

เมื่อพิจารณาสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ด้วยน้ำยาสกัดชนิดต่าง ๆ กับดัชนีการเติบโตพบว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ด้วยน้ำยาสกัด Mehlich III (Figure 5E) และ Mehlich I (Figure 5F) มีสหสัมพันธ์กับพื้นที่ใบของทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> LA) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ( $P < 0.01$ ) โดยมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.536 และ 0.644 ตามลำดับ ขณะที่ ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ด้วยน้ำยาสกัด AB-DTPA (Figure 5G) และ Na-lactate (Figure 5H) มีสหสัมพันธ์กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) โดยมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.388 และ 0.351 ตามลำดับ และพบว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ด้วยน้ำยาสกัด Mehlich III มีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ด้วย Mehlich I อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Figure 5I) ( $r = 0.870$ ,  $P < 0.01$ )



**Figure 5** Relationships between (A) K content uptake per 17<sup>th</sup> frond dry matter (K-uptake) and 17<sup>th</sup> frond dry matter (17<sup>th</sup> FDM), (B) leaf area of 17<sup>th</sup> frond leaflet (17<sup>th</sup> LA) and vegetative dry matter (VDM), (C) 17<sup>th</sup> LA and leaf area index (LAI), (D) bunch index (BI) and fresh fruit bunch weight (FFB), (E) extractable K determined by Mehlich III (K3) and 17<sup>th</sup> LA, (F) extractable K determined by Mehlich I (K2) and 17<sup>th</sup> LA, (G) extractable K determined by AB-DTPA (K4) and LAI, (H) extractable K determined by Na-lactate (K5) and LAI, and (I) extractable K determined by Mehlich I (K2) and Mehlich III (K3). *r* = Pearson's correlation coefficient, \* significant at 0.05, \*\* significant at 0.01

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่า ปริมาณโพแทสเซียมมีความสัมพันธ์กับการดูดใช้โพแทสเซียมในทางใบที่ 17 และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับพื้นที่ใบของทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> LA) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) โดยโพแทสเซียมในชีวมวลของปาล์มน้ำมันมีมากกว่าไนโตรเจน ซึ่งมีบทบาทสำคัญกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของไนโตรเจนและไมโทคอนเดรีย และกระบวนการสังเคราะห์แสง มีส่วนช่วยเพิ่มน้ำหนักชีวมวลของใบโดยการขยายความยาวทางใบ

(Mirande-Ney *et al.*, 2020) เพิ่มน้ำหนักทะลาย และเพิ่มจำนวนทะลายต่อต้น (Mirande-Ney *et al.*, 2019) เพราะฉะนั้น น้ำยาสกัดโพแทสเซียมที่มีสหสัมพันธ์สูงกับดัชนีการเติบโต โดยเฉพาะดัชนีพื้นที่ใบสามารถใช้เป็นดัชนีประเมินความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินเปรี้ยวจัดได้ โดยเรียงจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากไปน้อย ดังนี้ Mehlich I, Mehlich III, AB-DTPA และ Na-lactate ตามลำดับ ซึ่งน้ำยาสกัดดิน Mehlich I และ Mehlich III เป็นน้ำยา

สกัดที่ใช้ในดินหลากหลายและมีฤทธิ์เป็นกรดที่ใช้แทนกันได้ในการสกัดโพแทสเซียมและสกัดได้หลายธาตุในคราวเดียว (Mehlich, 1984; Locke and Hanson, 1991; Wuenscher *et al.*, 2015) ส่วนน้ำยาสกัด AB-DTPA และ Na-lactate เป็นน้ำยาสกัดที่มีพีเอชเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นกลาง ซึ่งเหมาะสำหรับดินที่มีพีเอชสูง โดยในสถานะที่ดินเป็นกรดรุนแรงมาก การใช้สถานะการสกัดนี้อาจทำให้โพแทสเซียมละลายออกมา เนื่องจาก การเพิ่มระดับของพีเอชดินจากน้ำยาสกัดทั้งสองชนิด จึงทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้มีสหสัมพันธ์กับดัชนีการเติบโตของปาล์มน้ำมันต่ำกว่าน้ำยาสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น Mehlich I และ Mehlich III ใกล้เคียงกับสภาพทางเคมีตามธรรมชาติของดิน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้สกัดโพแทสเซียมในดินที่เป็นกรดรุนแรง แทนน้ำยาสกัดดินที่ใช้กันอยู่ คือ น้ำยาสกัด 1 M NH<sub>4</sub>OAc pH 7.0 ซึ่งเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ และใช้หลักการการแลกเปลี่ยน K<sup>+</sup> ด้วย NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้จึงไม่สอดคล้องกับสภาพธรรมชาติของดิน นอกจากนี้ โพแทสเซียมที่สกัดด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถสกัดโพแทสเซียมในรูปที่ไม่แลกเปลี่ยน (Non-exchangeable K) ซึ่งเป็นแหล่งสำรองของโพแทสเซียมในดินที่จะปลดปล่อยช้า ๆ ให้พืชดูดใช้ได้ (Wang *et al.*, 2016) โดยในดินเปรี้ยวจัดโพแทสเซียมที่ไม่แลกเปลี่ยนอยู่ในรูปของแร่ฮิลโลด์และแร่จาร์ไซต์ (Keene *et al.*, 2004; Sukitprapanon *et al.*, 2015)

### สรุป

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่วิเคราะห์โดยวิธี Kjeldahl มีสหสัมพันธ์สูงอย่างมีนัยสำคัญกับพื้นที่ใบของทางใบที่ 17 (17<sup>th</sup> LA) และไม่พบสหสัมพันธ์ระหว่างไนเตรตและแอมโมเนียมที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด

2 M KCl และ Na-lactate กับดัชนีการเติบโตและผลผลิตของปาล์มน้ำมัน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Bray II เท่านั้นที่มีสหสัมพันธ์สูงกับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในใบ ดัชนีพื้นที่ใบ ผลผลิตทะลายปาล์มสด อัตราการเติบโตทางลำต้น และอัตราการเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมันต่อปี ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมและจำเพาะต่อฟอสเฟตที่ละลายจากฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะหรือดูดซับไว้กับเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีอยู่ในดินเปรี้ยวจัด ส่วนโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด Mehlich III ซึ่งเป็นน้ำยาสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่สกัดโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีสหสัมพันธ์โดยตรงกับดัชนีการเติบโตของพืช โดยเฉพาะการขยายขนาดพื้นที่ใบ ซึ่งบ่งชี้การเติบโตทางลำต้นของปาล์มน้ำมัน และเป็นวิธีที่เหมาะสมในการใช้ประเมินความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินเปรี้ยวจัด มากกว่าสารละลายบัฟเฟอร์ 1 M NH<sub>4</sub>OAc ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ดังนั้น วิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี Kjeldahl ฟอสฟอรัสโดยวิธี Bray II และโพแทสเซียมโดยวิธี Mehlich III จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาและให้คำแนะนำปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับปาล์มน้ำมันที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้การสนับสนุนทุนวิจัยโครงการการติดตามการใช้เทคโนโลยีการจัดการธาตุอาหารเพื่อเพิ่มผลผลิตทะลายและคุณภาพผลปาล์มน้ำมันในพื้นที่ดินเปรี้ยวจัดในที่ราบภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รหัสโครงการ CRP6305030560 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (สว.ก.)

## เอกสารอ้างอิง

- Adam, H., S. Jouannic, J. Escoute, Y. Duval, J.L. Verdeil and J.W. Tregear. 2005. Reproductive developmental complexity in the African oil palm (*Elaeis guineensis*, arecaceae). *Am. J. Bot.* 92(11): 1836–1852.
- Allen, K., M.D. Corre, A. Tjoa and E. Veldkamp. 2015. Soil nitrogen-cycling responses to conversion of lowland forests to oil palm and rubber plantations in Sumatra, Indonesia. *PLoS One.* 10(7): e0133325.
- Amorim, M.B., D.A. Rogeri and C. Gianello. 2021. Potassium available to corn plants extracted by ammonium acetate, ammonium chloride, mehlich-1 and mehlich-3 solutions in southern Brazilian soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 52(15): 1790–1797.
- Apori, S.O., S. Adams, E. Hanyabui, M. Mohammed, M. Murongo and M. Kwasi Acheampong. 2020. Evaluation of soil fertility status in oil palm plantations in the western region of Ghana. *AIMS Agric. Food.* 5(4): 938–949.
- Auxtero, E.A. and J. Shamshuddin. 1991. Growth of oil palm (*Elaeis guineensis*) seedlings on acid sulfate soils as affected by water regime and aluminium. *Plant Soil.* 137: 243–257.
- Balasundram, S.K., P.C. Robert, D.J. Mulla and D.L. Allan. 2006. Relationship between oil palm yield and soil fertility as affected by topography in an Indonesian plantation. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37: 1321–1337.
- Behera, S.K., K. Suresh, A.K. Shukla, M. Kamireddy, R.K. Mathur and K. Majumdar. 2021. Soil and leaf potassium, calcium and magnesium in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations grown on three different soils of India: status, stoichiometry and relations. *Ind. Crops Prod.* 168: 113589.
- Bu, R., J. Lu, T. Ren, B. Liu, X. Li and R. Cong. 2015. Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems. *PLoS One.* 10: e0143835.
- Corley, R.H.V. 1973. Effects of plant density on growth and yield of oil palm. *Exp. Agric.* 9(2): 169–180.
- Corley, R.H.V. and C.K. Mok. 1972. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium and magnesium on growth of the oil palm. *Exp. Agric.* 8(4): 347–353.
- Corley, R.H.V., J.J. Hardon and G.Y. Tan. 1971. Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica.* 20: 307–315.

- Department of Agriculture. 2011. Oil Palm Manual Serie 1: Recommendations for Chemical Fertilizer Use in Oil Palm Plantation. Academic Document No. 6/2011. Suratthani Oil Palm Research Center, Office of Agricultural Research and Development Region 7, Suratthani, Thailand. 34 pp. (in Thai)
- Elwood Madden, M.E., A.S. Madden, J.D. Rimstidt, S. Zahrai, M.R. Kendall and M.A. Miller. 2012. Jarosite dissolution rates and nanoscale mineralogy. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 91: 306–321.
- Enger, H. and H. Riehm. 1958. Die ammoniumlaktatessigsäure-methode zur bestimmung der leichtlöslichen phosphorsäure in karbonathaltigen böden. *Agrochimica.* 3: 49–65. (In German)
- Estefan, G., R. Sommer and J. Ryan. 2013. *Methods of Soil, Plant, and Water Analysis: A Manual for the West Asia and North Africa Region.* 3<sup>rd</sup> edition. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Beirut, Lebanon.
- Fairhurst, T.H. and E. Mutert. 1999. Interpretation and management of oil palm leaf analysis data. *Better Crops International.* 13(1): 48–51.
- Hardon, J., C. Williams and I. Watson. 1969. Leaf area and yield in the oil palm in Malaya. *Exp. Agric.* 5: 25–32.
- Jaroenkietkajorn, U. and S.H. Gheewala. 2021. Land suitability assessment for oil palm plantations in Thailand. *Sustain. Prod. Consum.* 28: 1104–1113.
- Jones Jr., J.B. 1998. Soil test methods: past, present, and future use of soil extractants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29(11–14): 1543–1552.
- Jourdan, C. and H. Rey. 1997. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant Soil.* 189: 33–48.
- Kachurina, O.M., H. Zhang, W.R. Raun and E.G. Krenzer. 2000. Simultaneous determination of soil aluminum, ammonium- and nitrate-nitrogen using 1 M potassium chloride extraction. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 893–903.
- Keene, A., M.D. Melville and B. Macdonald. 2004. Using potassium potentials to examine nutrient availability in an acid sulfate soil landscape, northern Australia. *In Proc. the 3<sup>rd</sup> Australian New Zealand Soils Conference, 5–9 December 2004, University of Sydney, Australia.*
- Krairapanond, A., A. Jugsujinda and W.H. Jr. Patrick. 1993. Phosphorus sorption characteristics in acid sulfate soils of Thailand: effect of uncontrolled and controlled soil redox potential (Eh) and pH. *Plant Soil.* 157(2): 227–237.

- Kristensen, E., S.I. Ahmed and A.H. Devol. 1995. Aerobic and anaerobic decomposition of organic matter in marine sediment: Which is fastest? *Limnol. Oceanogr.* 40(8): 1430–1437.
- Lewis, K., E. Rumpang, L.K. Kho, J. McCalmont, Y.A. Teh, A. Gallego-Sala and T.C. Hill. 2020. An assessment of oil palm plantation aboveground biomass stocks on tropical peat using destructive and non-destructive methods. *Sci. Rep.* 10: 2230.
- Ljung, K., F. Maley, A. Cook and P. Weinstein. 2009. Acid sulfate soils and human health—a millennium ecosystem assessment. *Environ. Int.* 35(8): 1234–1242.
- Locke, M.A. and R.G. Hanson. 1991. Calibration of corn response to Bray I, Bray II, and Mehlich II extractable soil phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22(11–12): 1101–1121.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15(12): 1409–1416.
- Mirande-Ney, C., G. Tcherkez, F. Gilard, J. Ghashghaie and E. Lamade. 2019. Effects of potassium fertilization on oil palm fruit metabolism and mesocarp lipid accumulation. *J. Agric. Food Chem.* 67: 9432–9440.
- Mirande-Ney, C., G. Tcherkez, T. Balliau, M. Zivy, F. Gilard, J. Cui, J. Ghashghaie and E. Lamade. 2020. Metabolic leaf responses to potassium availability in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) trees grown in the field. *Environ. Exp. Bot.* 175: 104062.
- Mitchell, R.D.J., R. Harrison, K.J. Russell and J. Webb. 2000. The effect of crop residue incorporation date on soil inorganic nitrogen, nitrate leaching and nitrogen mineralization. *Biol. Fertil. Soils.* 32: 294–301.
- Mylavarapu, R.S., J.F. Sanchez, J.H. Nguyen and J.M. Bartos. 2002. Evaluation of Mehlich-1 and Mehlich-3 extraction procedures for plant nutrients in acid mineral soils of Florida. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33(5–6): 807–820.
- Palko, J. and K. Weppling. 1994. Lime requirement experiments in acid sulphate soils. *Acta Agric. Scand. -B Soil Plant Sci.* 44(3): 149–156.
- Palykaew, S., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne and N. Chittamart. 2016. Suitability of acid sulfate soils for growing oil palm in central plain, Thailand. *In Proc. the 54<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference, 2–5 February 2016, p.39–46.* (In Thai)
- Purwanto, O.D. and Sudradjat. 2020. Determination of optimum rate of phosphorus and potassium fertilizers for a four-year-old oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 418: 012048.
- Rifqi Hidayat, A. and A. Fahmi. 2020. Impact of land reclamation on acid sulfate soil and its mitigation. *BIO Web Conf.* 20: 01002.

- Ritchie, G.S.P. 1995. Soluble aluminium in acidic soils: principles and practicalities. *Plant Soil*. 171: 17–27.
- Rousk, K., A. Michelsen and J. Rousk. 2016. Microbial control of soil organic matter mineralization responses to labile carbon in subarctic climate change treatments. *Glob. Chang. Biol.* 22(12): 4150–4161.
- Shamshuddin, J., S. Muhrizal, I. Fauziah and M.H.A. Husni. 2004. Effects of adding organic materials to an acid sulfate soil on the growth of cocoa (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Sci. Total Environ.* 323(1–3): 33–45.
- Soltanpour, P.N. and A.P. Schwab. 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 8: 195–207.
- Sukitprapanon, T., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, S. Anusontpornperm and R.J. Gilkes. 2015. Forms of acidity in potential, active and post-active acid sulfate soils in Thailand. *Thai J. Agric. Sci.* 48(3): 133–146.
- Tarmizi, A.M. and D. Mohd Tayeb. 2006. Nutrient Demands of Tenera Oil Palm Planted on Inland Soil of Malaysia. Malaysian Palm Oil Board, Malaysia. 204 pp.
- Wang, H., W. Cheng, T. Li., J. Zhou and X. Chen. 2016. Can nonexchangeable potassium be differentiated from structural potassium in soils?. *Pedosphere.* 26: 206–215.
- Wuenschel, R., H. Unterfrauner, R. Peticzka and F. Zehetner. 2015. A comparison of 14 soil phosphorus extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant Soil Environ.* 61: 86–96.