

อิทธิพลของถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช และการละลายของฟอสฟอรัสในดินนาเปรี้ยวจัด

Effects of Oil Palm-derived Biochar on Plant Nutrient Availability and Phosphorus Solubility in an Acid Sulfate Paddy Soil

กมลชนก เจริญศรี¹ วรชาติ วิศวรพัฒน์^{1,*} ทิมทอง ตรุณสนธยา¹ และ ญัฐพร ประคองเก็บ²
Kamolchanok Charoensri¹, Worachart Wisawapipat^{1,*}, Timtong Darunsontaya¹
and Nattaporn Prakongkep²

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

² สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok, 10900

² Office of Science for Land Development, Land Development Department, Chatuchak, Bangkok, 10900

รับเรื่อง: ตุลาคม 2559 Received: October 2016

รับตีพิมพ์: มกราคม 2560 Accepted: January 2017

* Corresponding author: worachart.w@ku.th

ABSTRACT: Oil palm cultivation has been extended to acid sulfate paddy soils in the Thailand's central plain. Palm oil industry, however, produced several of the biomass wastes that are potentially utilized as a soil amendment. This research aimed at investigating impacts of oil palm biochar (OPB) on chemical properties, plant nutrient availability and phosphorus (P) fractions in an acid paddy soil (Rangsit series: Rs). Four treatments were included the soil incubated with OPB at the respective rates of 0, 0.5, 1.0 and 2.0 ton/rai under saturated conditions. Results from a 16-week incubation revealed that soil OPB incorporation slightly increased pH, and increased the amounts of Bray-II-extractable P, CaCl_2 -extractable Si, and NH_4OAc -extractable bases. Results from the P fractions using a five-step sequential extraction demonstrated that P associated with poorly crystalline Fe oxides (F3, 81%) and crystalline Fe oxides (F4 = 9.5%) were the major P fractions in the studied soil. Fractions of P bound to Al oxides (F2, 6.7%), P bound to CaCO_3 (F5, 2.8%) and soluble and loosely bound P (F1, 0.035%) occurred at minor extents. The OPB application increased P in the fraction F1 that is the most available fraction to plant. This study highlights a potential role of OPB in enhancing the availability of P, K and Si in acid sulfate paddy soils under saturated conditions.

Keywords: Agricultural waste, phosphorus fraction, sequential extraction, soil biogeochemistry, soil fertility

บทคัดย่อ

การปลูกปาล์มน้ำมันได้มีการขยายตัวสู่ดินนาเปรี้ยวจัดในภาคกลางของไทย อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการปาล์มน้ำมันมีของเสียชีวมวลหลายชนิดซึ่งมีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมัน (OPB) ต่อสมบัติทางเคมี ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชและสัดส่วนของฟอสฟอรัสในดินนาเปรี้ยวจัด (ชุดดินรังสิต: Rs) โดยทำการบ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันในอัตรา 0 0.5 1.0 และ 2.0 ตันต่อไร่ในสภาพขังน้ำ ผลการบ่มดินระยะเวลา 16 สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่า การใช้ OPB สามารถเพิ่มพีเอชดินเล็กน้อย และเพิ่มปริมาณของฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยน้ำยา Bray-II ซิลิโคนที่สกัดด้วย CaCl_2 และแคตไอออนสภาพเบสที่สกัดได้ด้วยน้ำยา NH_4OAc ผลการศึกษาสัดส่วนของฟอสฟอรัสในดินด้วยวิธีการสกัดเชิงลำดับ 5 ขั้นตอนพบว่า ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่สร้างพันธะกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกไม่สมบูรณ์ (F3, 81%) และรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกสมบูรณ์ (F4, 9.5%) ส่วนฟอสฟอรัสในรูปที่สร้างพันธะกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (F2, 6.7%) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมคาร์บอเนต (F5, 2.8%) และฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้และสร้างพันธะแบบอ่อน ๆ (F1, 0.035%) พบในปริมาณน้อยกว่าฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กออกไซด์ การใส่ OPB เพิ่มฟอสฟอรัสใน F1 ซึ่งเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชสูงสุด การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ OPB ต่อการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส โปแทสเซียม และซิลิโคนในดินนาเปรี้ยวจัดภายใต้สภาพขังน้ำ

คำสำคัญ: ของเสียทางการเกษตร, สัดส่วนฟอสฟอรัส, การสกัดเชิงลำดับ, ชีวธรณีเคมีดิน, ความอุดมสมบูรณ์ของดิน

บทนำ

ดินกรดกำมะถัน (acid sulfate soils) หรือดินเปรี้ยวจัด เป็นดินที่เกิดจากตะกอนซึ่งมีการสะสมของแร่เหล็กซัลไฟด์ เช่น ไพไรต์ (FeS_2) ในสภาพรีดักชัน เมื่อผ่านกระบวนการออกซิเดชันจะทำให้เกิดกรดกำมะถัน แร่เหล็กไฮดรอกไซด์ และแร่จาร์โรไซต์ (jarosite) (Fanning and Rabenhorst, 2008) ดินเปรี้ยวจัดมักมีสภาพความเป็นกรดรุนแรงมาก ($\text{pH} < 4$) ทำให้ธาตุโลหะ เช่น เหล็ก และอะลูมิเนียม อาจละลายออกมาในระดับที่เป็นพิษต่อพืช นอกจากนี้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัดมักอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากมักถูกตรึงโดยแร่เหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ในดิน และมักตกตะกอนเป็นแร่สเตรนไจต์ ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และวาริสไซต์ ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ตามลำดับ (Johnston *et al.*, 2011)

พื้นที่ดินเปรี้ยวจัดในประเทศไทยมีเนื้อที่ประมาณ 5.3 ล้านไร่ ส่วนใหญ่กระจายตัวในบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางประมาณ 4.8 ล้านไร่ (Attanandana and Vacharotayan, 1986) ดินเปรี้ยวจัดมักใช้เพื่อการปลูกข้าวในเขตชลประทาน โดยลักษณะเชิงวิทยาแร่ในอนุภาคขนาดดินเหนียวของดินนี้ มักมีแร่ดินเหนียวในกลุ่ม 2:1 เป็นแร่เด่น (Janjirawuttikul *et al.*, 2011) แสดงถึงความสามารถของดินในการกักเก็บธาตุอาหารพืช อย่างไรก็ตาม ดินดังกล่าวมีข้อจำกัดจากสภาพความเป็นกรดที่รุนแรง มีการละลายของธาตุโลหะในระดับสูง และมีความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสต่ำ

ถ่านชีวภาพ (biochar) เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนสูงเกิดจากการแปรสภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) หรือการสลายตัวทางความร้อนของสารชีวมวลด้วยวิธีอุณหเคมี (thermochemical decomposition) ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินทั้งทางฟิสิกส์ ทางเคมี และ

ทางชีวภาพ โดยถ่านชีวภาพสามารถช่วยลดความหนาแน่นรวมดิน เพิ่มอัตราการแทรกซึมน้ำ และการอุ้มน้ำ (Glaser *et al.*, 2002) ช่วยลดความรุนแรงจากสภาพกรด ลดความเป็นพิษของเหล็กและอะลูมิเนียม เพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส (Masulili *et al.*, 2010) และเป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลินทรีย์ในดิน (Lehmann *et al.*, 2011) นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังให้ธาตุอาหาร เช่น ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม รวมถึงธาตุเสริมประโยชน์ซิลิคอนแก่ดิน (Harsono *et al.*, 2013)

ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันและส่งออกน้ำมันปาล์มมากเป็นอันดับ 4 ของโลก (IndexMundi, 2013) ความต้องการใช้น้ำมันปาล์มที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันมากขึ้น โดยบางส่วนขยายพื้นที่ไปยังดินนาเปรี้ยวจัดในภาคกลาง แต่อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเป็นอุตสาหกรรมที่มีของเหลือทิ้งทางการเกษตรปริมาณมาก จึงควรมีการเพิ่มมูลค่าและความเป็นประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมัน โดยผลผลิตที่เหลือปาล์มสดประมาณ 11 ล้านตันที่ผลิตได้ต่อปี เมื่อนำมาผลิตเป็นน้ำมันปาล์มจะมีชีวมวลเหลือทิ้ง เช่น ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใย และกะลาปาล์มสูงถึง 2.6 1.5 และ 0.66 ล้านตัน ตามลำดับ (Office of Agricultural Economics, 2012) วัสดุชีวมวลเหล่านี้มีศักยภาพในการผลิตเป็นถ่านชีวภาพ โดยถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมัน (oil palm biochar: OPB) มีสมบัติด้านการดูดซับ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีโครงสร้างเป็นรูพรุน ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) จำนวนมาก ทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง (Sari *et al.*, 2014) โดยทั่วไปประจุพื้นผิวของถ่านชีวภาพมักเป็นประจุลบ (Jiang *et al.*, 2012) ทำให้สามารถดูดซับธาตุอาหารพืชในรูปแคตไอออนได้ดี โดยนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดซึ่งมีข้อจำกัด ด้านสภาพเป็นกรดที่รุนแรง และมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ประโยชน์ต่ำ

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือเพื่อ

ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมัน ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดินทางเคมีและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในดินนาเปรี้ยวจัดในสภาพดินขี้เถ้า

อุปกรณ์ และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างดิน

เก็บตัวอย่างดินนาเปรี้ยวจัด ชุดดินรังสิต (Rangsit soil series: Rs) บริเวณศูนย์ศึกษาและพัฒนาสวนส้มร่วงทุ่งรังสิตเพื่อปลูกปาล์มน้ำมันของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) อ.บ้านนา จ.นครนายก โดยเก็บตัวอย่างดินบนแบบตัวอย่างแบบ สุ่ม (Composite sample) ที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร จากนั้นผึ่งดินให้แห้งในที่ร่ม ทำการแยกเศษซากพืช บดตัวอย่างดินและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์สมบัติดินทางเคมี และฟิสิกส์พื้นฐาน

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินตามวิธีมาตรฐาน (Sparks *et al.*, 1996) โดยทำการวัดพีเอชดินในน้ำและในสารละลาย 1 M KCl อัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:1 และวัดพีเอชของดินด้วยสารละลาย 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5.5 ทำการวัดพีเอชโดยใช้อัตราส่วนดินต่อสารละลายเท่ากับ 1:2 วิเคราะห์สภาพการนำไฟฟ้าของดินใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1:5 และวัดด้วยเครื่องวัดความนำไฟฟ้า

ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (OC) วิเคราะห์ด้วยวิธีของ Walkley and Black ปริมาณไนโตรเจนรวม โดยวิธี Kjeldahl method ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์โดยการสกัดด้วยสารละลาย Bray-II พัฒนา สืบด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ปริมาณแคตไอออนสภาพเบสทำการสกัดไอออนด้วยสารละลาย 1 M NH₄OAc ที่พีเอช 7.0 ความเป็นกรดที่สกัดได้โดยวิธี Barium

chloride triethanolamine ที่พีเอช 8.2 อัตราร้อยละความอิมมัตวเบส คำนวณจากค่าเบสรวมที่สกัดได้ และกรดที่สกัดได้ จากสูตร อัตราร้อยละความอิมมัตวด้วยเบส = (เบสที่สกัดได้/เบสที่สกัดได้ + กรดที่สกัดได้) \times 100 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน โดยการชะแคตไอออนด้วยสารละลาย 1 M NH_4OAc ที่เป็นกลาง (pH 7.0)

ปริมาณธาตุที่ละลายได้ในน้ำ (water soluble elements) โดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1:100 เขย่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (Yusiharni and Gilkes, 2012) จากนั้นนำสารละลายไปวัดปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Varian AA240)

ปริมาณธาตุทั้งหมด (total elements) ได้จากการย่อยตัวอย่างด้วยกรด Aqua regia (3:1 %v/v ของ HCl และ HNO_3) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง (Chen and Ma, 2001) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกรด Aqua regia ไม่สามารถละลายซิลิคอนจากแร่อะลูมิเนียมซิลิเกตและแร่ควอตซ์ จึงจำเป็นต้องย่อยตัวอย่างด้วยสารละลาย NaOH/ H_2O_2 ด้วยเครื่อง Microwave digestion (Mars 5) และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง AAS โดยค่าซิลิคอนที่วัดได้ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าซิลิคอนทั้งหมด (Seyfferth and Fendorf, 2012) และวิเคราะห์เนื้อดินโดยวิธีปิเปตต์ (Gee and Bauder, 1986)

การเตรียมตัวอย่าง และการวิเคราะห์ทางเคมีของ ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมัน

ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันได้จากการเผาชีวมวลปาล์มน้ำมันจากส่วนของทะลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunches) ด้วยเตาเผาถ่าน 200 ลิตร แนวตั้ง ใช้หลักความร้อนไล่ความชื้นในเนื้อไม้ที่อยู่ในเตา ทำให้ไม้กลายเป็นถ่าน อุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วง 300–400 องศาเซลเซียส และสังเกตลักษณะของควันในขณะที่เผา หรือควันบ้า โดยใช้ระยะเวลาในการเผาประมาณ 16 ชั่วโมง

(Okimori *et al.*, 2003) จากนั้นทำการบดถ่านชีวภาพที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วยวิธีเดียวกับสมบัติดิน

การทดลองบ่มดินนาในสภาพน้ำขัง

ทำการศึกษามลของการใช้ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมัน ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและการละลายของฟอสฟอรัสในดินนาเปรี้ยวจัดในสภาพน้ำขัง โดยบ่มตัวอย่างดินกับตัวอย่างถ่านชีวภาพในอัตรา 0 (control) 0.16, 0.32 และ 0.64 %w/w ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 0.5, 1.0 และ 2.0 ตันต่อไร่ ตามลำดับ โดยคำนวณจากความลึกดิน 0.15 เมตร และความหนาแน่นรวมของดิน 1.3 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ทำการบรรจุตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จำนวน 100 กรัม ในภาชนะพลาสติกทรงกระบอกขนาดกว้าง 11 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร และเติมถ่านชีวภาพในอัตราที่กำหนด รักษาสภาพความชื้นดินที่ระดับดินอิมมัตวด้วยน้ำ โดยใช้ น้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) และรักษาระดับความสูงของน้ำเหนือผิวหน้าดิน 3 เซนติเมตร ตลอดการทดลอง ทำการบ่มดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง และสุ่มเก็บตัวอย่างดินบางส่วนจากภาชนะตามช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 0 1 2 3 4 6 8 10 12 และ 16 เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดิน ได้แก่ ค่าพีเอชดินในสภาพดินอิมมัตวด้วยน้ำ ค่าศักย์รีดอกซ์ ปริมาณเบสที่สกัดได้ด้วย 1.0 M NH_4OAc ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ด้วยสารละลาย 0.01 M CaCl_2 ซึ่งถือเป็นฟอสฟอรัสในรูปที่อยู่ในสารละลายดิน (soil solution P) (Sánchez-Alcalá *et al.*, 2015) ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ด้วยน้ำยา Bray-II ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ และซิลิคอนที่สกัดได้ด้วยน้ำยา 0.01 M CaCl_2 ซึ่งเป็นซิลิคอนในรูปที่เป็นประโยชน์ (Tavakkoli *et al.*, 2011)

การศึกษาการละลายของฟอสฟอรัสโดยใช้เทคนิคการสกัดเชิงลำดับ

ทำการศึกษาลักษณะของฟอสฟอรัส (phosphorus fractions) ในดินนาเปรี้ยวจัดหลังบ่มดินด้วยถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันโดยเทคนิคการสกัดเชิงลำดับ (sequential extraction) ตามวิธีของ Kovar and Pierzynski (2009) โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดินบางส่วนจากภาชนะในสัปดาห์ที่ 0 4 8 12 และ 16 จำนวน 1 กรัม ใส่ในหลอดเซนตริฟิวจ์ขนาด 50 มิลลิลิตร และนำมาสกัดเชิงลำดับด้วยสารละลาย ดังนี้ (F1) 1 M NH_4Cl , (F2) 0.5 M NH_4F , (F3) 0.1 M NaOH , (F4) 0.3 M $\text{Na}_3\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_7$ + 1 M NaHCO_3 และ (F5) 0.25 M H_2SO_4 การสกัดดังกล่าวทำให้ได้ฟอสฟอรัสในรูป (F1) ฟอสฟอรัสที่ละลายได้และมีการดูดซับแบบอ่อน ๆ (soluble and loosely bound P) (F2) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al-bound P) (F3) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกไม่สมบูรณ์ (poorly crystalline Fe oxides-bound P) (F4) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะจับกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกสมบูรณ์ (crystalline Fe oxides-bound P) และ (F5) ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 -bound P)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance) โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสัดส่วนของฟอสฟอรัสในแต่ละรูปของดินเปรี้ยวจัดก่อนการทดลอง Duncan's multiple range tests (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ขึ้นไป

ผลการทดลอง และวิจารณ์

สมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของดินนาเปรี้ยวจัด

ดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นชุดดินรังสิต (Rangsit soil series: Rs) มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว มีวัตถุต้นกำเนิดจากตะกอนแม่น้ำและตะกอนน้ำกร่อย มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว มีพีเอชเป็นกรดรุนแรงมาก ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 3.6$, Table 1) ซึ่งอาจจำกัดการเจริญเติบโตของต้นข้าว ค่าพีเอชที่วัดด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีค่าต่ำกว่าค่าพีเอชที่วัดได้ในน้ำ ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}_2} = 3.0$) แสดงให้เห็นว่าดินอาจมีสารประกอบซัลไฟด์ เช่น ไพไรต์ (pyrite) หรือธาตุกำมะถัน (S^0) ซึ่งการออกซิไดส์สารประกอบกำมะถันโดยออกซิเจนในน้ำและอากาศ ทำให้เกิดกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดรุนแรง (Prakongkep *et al.*, 2012) ค่าการนำไฟฟ้าของดินอยู่ในระดับต่ำมาก ($\text{EC}_{1:5} = 0.50$ มิลลิซีเมนตต่อเซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าดินมีปริมาณเกลือที่ละลายน้ำต่ำมาก ส่วนปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ของดินอยู่ในระดับสูงมาก (3.9%) ซึ่งสอดคล้องกับการมีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 และการมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในระดับสูงมาก อย่างไรก็ตาม ปริมาณไนโตรเจนรวมอยู่ในระดับปานกลาง (0.27%) ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ด้วยน้ำยา Bray-II ในระดับค่อนข้างต่ำ (7.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และอัตราร้อยละความอิมมัตด้วยเบสต่ำ (24%) ซึ่งสอดคล้องกับการมีกรดที่แลกเปลี่ยนได้ในปริมาณสูงมาก (35%) (Soil Survey Division Staff, 1993)

Table 1 Physicochemical properties of the studied acid sulfate rice paddy soil (Rs-R) and oil palm biochar (OPB)

Materials	pH			EC (mS cm ⁻¹)	OC (%)	Total N (%)	Avail. P (mg kg ⁻¹)	Extractable bases (cmolc kg ⁻¹)				CEC (%)	BS (%)	EA (%)
	H ₂ O	KCl	H ₂ O ₂											
								Ca	Mg	Na	K			
Rs	3.6	3.1	3.0	0.50	3.9	0.27	7.9	4.4	1.6	0.68	0.81	35	24	35
OPB	9.4	-	-	5.3	-	1.6	798	19	14	3.4	99	53	-	-

EC = electrical conductivity, OC = organic carbon, Total N = total nitrogen, Avail. P = available phosphorus, CEC = cation exchange capacity, BS = base saturation, and EA = extractable acidity

ผลการศึกษาปริมาณธาตุที่สกัดได้ด้วยน้ำ (water soluble) และปริมาณธาตุทั้งหมด (Table 2) พบว่าธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมในดินมีสัดส่วนปริมาณธาตุที่สกัดได้ด้วยน้ำต่อปริมาณธาตุทั้งหมดสูงเท่ากับ 5.6% และ 2.3% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าดินมีกิจกรรมของเหล็กและอะลูมิเนียมสูง ซึ่งอาจอยู่ในระดับที่เป็นพิษต่อพืช และอาจส่งเสริมการตกตะกอนของธาตุฟอสฟอรัสในสารละลายดินอีกด้วย (Mortvedt, 1980) ทั้งนี้เกณฑ์กำหนดระดับความเป็นพิษของเหล็กและอะลูมิเนียมในดินแตกต่างกันไปตามวิธีการสกัด อย่างไรก็ตาม มีรายงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมในสารละลายดินที่สูงกว่า 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (Álvarez *et al.*, 2005; Sahrawat, 2005) นอกจากนี้ ยังมีสัดส่วนปริมาณธาตุโพแทสเซียมที่สกัดได้ด้วยน้ำต่อปริมาณธาตุทั้งหมดสูงเท่ากับ 8.4% แสดงให้เห็นว่าโพแทสเซียมส่วนใหญ่อาจอยู่ในรูปที่ยากต่อการละลายและเป็น

ประโยชน์ต่อพืชได้ยาก ส่วนธาตุอื่น ๆ ทั้งรูปที่สกัดได้ด้วยน้ำและปริมาณทั้งหมดพบในปริมาณที่ต่างกันตามชนิดของธาตุ

สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมัน

ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันที่ใช้ทำการศึกษา มีค่าพีเอชเป็นต่างจัดมาก (pH_{H₂O} = 9.4) มีค่าการนำไฟฟ้าในระดับปานกลาง (EC = 5.3 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร) ถ่านชีวภาพมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในปริมาณสูงมาก (798 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จึงเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินที่มีปัญหาความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่ำ นอกจากนี้ยังมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในระดับสูง (19 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) แมกนีเซียม (14 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) โพแทสเซียม (99 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) และโซเดียม (3.4 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ที่สกัดได้ในปริมาณสูงมาก และมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในปริมาณที่สูงมาก (53 เซนติโมลต่อกิโลกรัม)

Table 2 Concentrations of water soluble elements, maximum acid soluble and NaOH–microwave digestion pools of elements in the studied acid sulfate paddy soil (Rs) and oil palm biochar (OPB)

Element	Rs		OPB	
	Water soluble (mg kg ⁻¹)		Aqua regia (mg kg ⁻¹)	
Al	1,004 (2.3%)	61 (11%)	43,934	536
Ca	289 (8.3%)	332 (3.0%)	3,492	10, 929
Fe	223 (5.6%)	12 (3.6%)	4,011	336
K	149 (8.4%)	15,693 (37%)	1,770	41,742
Mg	99 (7.1%)	118 (7.1%)	1,394	1, 667
Mn	nd (nd)	5.2 (3.0%)	42	171
Na	137 (20%)	508 (12%)	684	3,971
Ni	nd (nd)	nd (nd)	0.11	4.6
Pb	0.81 (20%)	7.2 (26%)	4.9	27
Si	7,283 (4.7%)	6,272 (6%)	7,728 (155,477)*	2,892 (102,898)*
Zn	0.65 (3.6%)	nd (nd)	18	45

Note: nd = not detectable; values in the parenthesis indicate the relative fractions of water soluble elements to total concentrations

* = detectable by NaOH/H₂O₂ digestion

ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันมีสัดส่วนปริมาณธาตุโพแทสเซียม (37%) ที่ละลายน้ำได้ในปริมาณสูงมาก แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นแหล่งให้ธาตุโพแทสเซียมในรูปที่ละลายน้ำได้ทันที นอกจากนี้ถ่านชีวภาพดังกล่าวยังมี โซเดียม (12%), แมกนีเซียม (7.1%) และแคลเซียม (3.0%) ที่ละลายน้ำได้สูง และมีซิลิคอนที่ละลายน้ำได้สูงถึง 6% ซึ่งซิลิคอนจัดเป็นธาตุเสริมประโยชน์ในพืชหลายชนิด โดยเฉพาะพืชตระกูลข้าว เนื่องจากซิลิคอนช่วยเพิ่มความต้านทานของพืชจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต เช่น โรค และแมลงศัตรูพืช และปัจจัยจากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น การขาดฟอสฟอรัส ความเป็นพิษของเหล็ก และอะลูมิเนียม การขาดน้ำ และความเค็ม (Pode, 2016)

ผลของการใส่ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และธาตุอาหารพืชพีเอชและค่าศักย์รีดอกซ์

ผลการบ่มดินเปรี้ยวจัดร่วมกับถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันพบว่า พีเอชดินเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้ถ่านชีวภาพ และระยะเวลาในการบ่มดิน เนื่องจากสภาพความเป็นด่างจากสารประกอบคาร์บอเนต และแอนไอออนอินทรีย์ของคาร์บอซิลิก และฟีนอลิก ซึ่งเป็นแอนไอออนหลักที่พบได้ในถ่านชีวภาพ (Yuan and Xu, 2012) สามารถช่วยยกระดับพีเอชดิน และลดปริมาณกรดที่แลกเปลี่ยนได้ในดินกรดจัด โดยการบ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 0.64% w/w ที่เวลา 16 สัปดาห์ ทำให้พีเอชดินเพิ่มสูงที่สุดจาก 3.6 เป็น 4.2 (0.6 หน่วย) ในขณะที่ ดินในตำรับควบคุมที่เวลา

16 สัปดาห์ พีเอชดินเพิ่มขึ้น 0.08 หน่วย (Figure 1a) ส่วนค่าศักย์รีดอกซ์ (E_h) ของตัวอย่างดินมีค่าอยู่ในพิสัย 233–438 mV และเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มดินในสภาพน้ำขังในทุกอัตราของการใช้ถ่านชีวภาพ (Figure 1b) แสดงว่าดินอยู่ในสภาพออกซิเดชันตลอดการทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก ปฏิกริยาการออกซิเดชันของสารประกอบซัลไฟด์ในตัวอย่างดิน จึงทำให้ค่าศักย์รีดอกซ์ไม่ลดลงตามการบ่มดิน

ปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายดิน และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดด้วย 0.01 M CaCl_2 ซึ่งถูกพิจารณาว่าเป็นฟอสฟอรัสในสารละลายดิน (solution P) ที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที (readily available P) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มดินในสภาพน้ำขัง โดยเพิ่มขึ้นจาก 0.023 เป็น 1.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในสัปดาห์ที่ 16 ของการทดลองในตำรับควบคุม (Figure 1c) แต่การใส่ถ่านชีวภาพไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในสารละลายดิน ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดด้วยน้ำยา Bray-II เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาขังน้ำ ให้ผลสอดคล้องกับฟอสฟอรัสในสารละลายดิน การเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อาจเป็นผลมาจากการยกระดับของพีเอชดินหลังขังน้ำ ซึ่งลดความแข็งแรงของพันธะในการตรึงของฟอสฟอรัสกับออกไซด์ของเหล็ก และอะลูมิเนียม (Masulili *et al.*, 2010) นอกจากนี้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ยังเพิ่มขึ้นตามอัตราถ่านชีวภาพ โดยการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 0.64% w/w มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงสุด โดยเพิ่มจาก 5.4 เป็น 18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในสัปดาห์ที่ 16 (Figure 1d) เนื่องจากการใช้ถ่านชีวภาพทำให้พีเอชของดินเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น หรือการละลายของเกลือฟอสเฟตจากถ่านชีวภาพในสภาพน้ำขังนอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากการดูดซับของถ่านชีวภาพกับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมในดิน ซึ่งเป็นการลดตำแหน่งพื้นผิวของประจุบวกของแร่เหล็ก และอะลูมิเนียมออกไซด์

สำหรับการตรึงฟอสฟอรัส (Chintala *et al.*, 2014)

ปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์

การบ่มดินในสภาพขังน้ำ ส่งผลให้ปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในตำรับควบคุมมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 6.7 เป็น 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่าสูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 10 (Figure 1e) นอกจากนี้ การใส่ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันในทุกตำรับการทดลองสามารถเพิ่มปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในสัปดาห์แรกของการทดลอง และเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในสัปดาห์ที่ 6 จากนั้นปริมาณซิลิคอนมีค่าลดลงใกล้เคียงกับตำรับควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการปลดปล่อยซิลิคอนจากถ่านชีวภาพสู่สารละลายดิน ซึ่งโมโนซิลิซิก ($\text{H}_4\text{O}_4\text{Si}$) ในสารละลายสามารถดูดซับกับแร่ออกไซด์ของเหล็ก และอะลูมิเนียมในดินในสภาพกรด ($\text{pH} \sim 4.0$) และตกตะกอนเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Beckwith and Reeve, 1963) และสามารถลดความเป็นพิษจากเหล็ก และอะลูมิเนียมในดินเปรี้ยวจัด

ปริมาณแคดไอออนสภาพเบสที่สกัดได้

การขังน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคดไอออนสภาพเบสที่สกัดได้ โดยแคลเซียมที่สกัดได้ลดลงอย่างชัดเจนจาก 1,903 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในสัปดาห์แรก เป็น 836 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในสัปดาห์ที่ 16 ขณะที่แมกนีเซียม และโพแทสเซียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นระหว่างการบ่มดิน แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนสำหรับโซเดียม การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากการตกตะกอนร่วมของแคดไอออนกับแอนไอออนระหว่างการบ่มดิน (Carmo *et al.*, 2016) หรืออาจเกิดจากการปลดปล่อยของแคดไอออนออกจากหลีบของแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ที่เกิดการขยายตัวระหว่างการขังน้ำ (Rinklebe, 2016) การใช้ถ่านชีวภาพในทุกอัตราามีผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ โดยถ่านชีวภาพในอัตรา 2 ตันต่อไร่ สามารถเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้จาก 299 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 499 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตั้งแต่สัปดาห์แรกของการบ่มดิน ทั้งนี้อาจเป็น

ผลมาจากแรงค์ประกอบในถ่านชีวภาพจากปาล์ม น้ำมันอาจมีแร่ที่มีโพแทสเซียมที่ละลายง่ายในน้ำ เช่น แร่ซิลิเกต (KCl) (Jiang *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าถ่านชีวภาพจะมีธาตุแคลเซียมทั้งหมดในปริมาณสูง (10,929 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่การใส่ถ่านชีวภาพ

ในทุกอัตราไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแคลเซียมที่สกัดได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากสารประกอบแคลเซียมที่อาจพบในถ่านชีวภาพอยู่ในรูปที่มีสภาพการละลายต่ำ (Prakongkep *et al.*, 2015) ซึ่งไม่สามารถสกัดได้ด้วยสารละลาย NH_4OAc ในสภาพที่เป็นกลาง

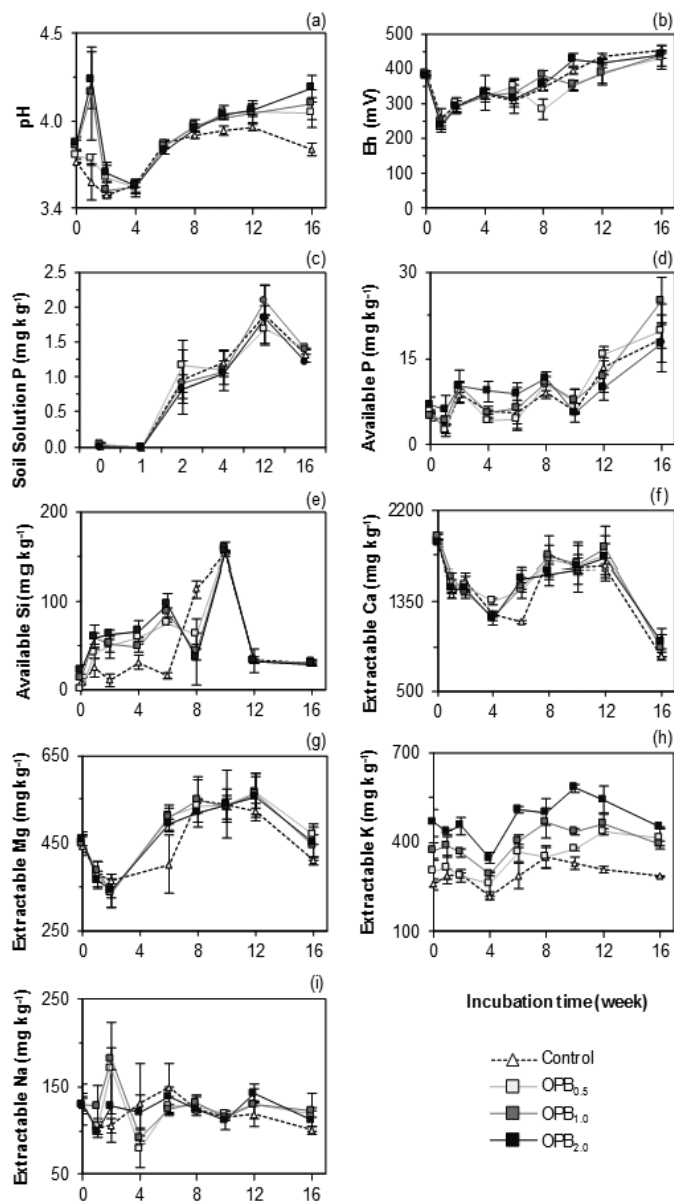


Figure 1 Effects of OPB applications (0, 0.5, 1 and 2 ton/ rai) on dynamics of pH (a), redox potential (b), soil solution P (c), Bray-II extractable P (d), 0.1 M CaCl_2 extractable Si (e), extractable Ca (f), extractable Mg (g), extractable K (h) and extractable Na (i) of the studied acid sulfate paddy soil under saturated conditions

สัดส่วนของฟอสฟอรัสในดิน

ผลการศึกษาสัดส่วนของฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัดก่อนการทดลองแสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของฟอสฟอรัสในดินเปรี้ยวจัดที่ทำการศึกษาร่วมใหญ่ถูกควบคุมโดยเหล็กออกไซด์ทั้งในรูปที่มีผลึกไม่สมบูรณ์ (F3, 81%) และในรูปที่มีผลึกสมบูรณ์ (F4, 9.5%) ซึ่งคิดเป็น 90.5% ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน (Figure 2) ขณะที่ฟอสฟอรัสในรูปที่สร้างพันธะกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (F2, 6.7%) และฟอสฟอรัสที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมคาร์บอเนต (F5, 2.8%) มีปริมาณน้อยกว่าฟอสฟอรัสที่เกี่ยวข้องกับแร่เหล็ก อย่างไรก็ตาม ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ และมีการดูดซับแบบอ่อน ๆ (F1) ซึ่งเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมากที่สุด มีปริมาณต่ำมากเพียง 0.035% ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดซึ่งต่ำกว่า

ฟอสฟอรัสรูปอื่น ๆ (F1–F5) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินที่ทำการศึกษาอาจจำกัดการเติบโตของพืช เนื่องจากแร่เหล็ก และอะลูมิเนียมออกไซด์ เช่น เกอไทต์ ฮีมาไทต์ และกิบบิไซด์ มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูง (Parfitt, 1989) ทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ (Turner *et al.*, 2003) เช่น การศึกษาการดูดซับฟอสเฟตโดยแร่เกอไทต์ในสภาพกรด ที่แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการดูดซับเป็นแบบ bidentate innersphere complexes ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความแข็งแรงของพันธะของการดูดซับสูงกว่าการดูดซับแบบ monodentate ที่มักพบได้ในระบบดินหรือสิ่งแวดล้อมที่มีฟอสฟอรัสความเข้มข้นสูง และมีสภาพเป็นด่าง (Arai and Sparks, 2007)

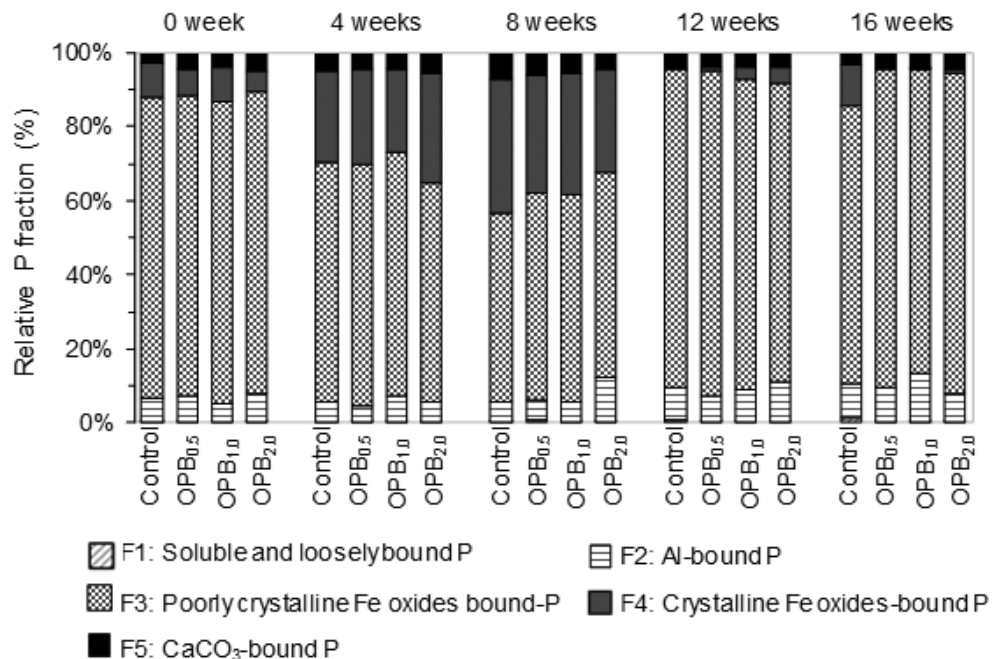


Figure 2 Results from the five-step P sequential extraction of soil samples treated with diverse rates of oil palm biochar (OPB_{0.5}, OPB_{1.0} and OPB_{2.0}) under flooding conditions. The extracted fractions are given as percentage of the total soil P content determined by the sum of all extracted fractions (F1 to F5)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนฟอสฟอรัสหลังการบ่มดินในตำรับควบคุมพบว่า ฟอสฟอรัสใน F3 มีปริมาณลดลงอย่างชัดเจนจาก 81% เป็น 51% ในช่วง 8 สัปดาห์แรกของการบ่มดิน โดยสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่ลดลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัส F4 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของแร่เหล็กจากในรูปที่มีผลึกไม่สมบูรณ์เป็นรูปที่มีผลึกสมบูรณ์มากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากการรีดิวซ์ของ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} และตกตะกอนเป็นแร่เหล็กซิลิไนด์ที่มีผลึกขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการที่ฟอสฟอรัสที่เกี่ยวข้องกับเหล็กที่มีผลึกสมบูรณ์ (F4) เปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กที่มีผลึกไม่สมบูรณ์ (F3) ในช่วงเดือนที่ 3 และ 4 ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับการลดลงของปริมาณดินระหว่างการทดลอง ทำให้อาจเกิดการแพร่ของออกซิเจนสู่ตัวอย่างดินมากขึ้น และทำให้แร่เหล็กซิลิไนด์ที่สร้างตัวใหม่ในช่วง 8 สัปดาห์แรก ค่อย ๆ ถูกออกซิไดส์และตกตะกอนเป็นแร่เหล็กออกไซด์ที่มีขนาดเล็กในสภาพออกซิเดชัน ส่วนฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (F2) และฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้และมีการดูดซับแบบอ่อน ๆ (F1) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามระยะเวลาการขังน้ำ โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 6.7 เป็น 9.0% และจาก 0.035 เป็น 1.5% ตามลำดับ ในขณะที่ฟอสฟอรัสที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมคาร์บอเนต (F5) มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 2.8 เป็น 3.6% แสดงให้เห็นว่าการขังน้ำช่วยส่งเสริมการละลายของฟอสฟอรัสได้ (Zhang *et al.*, 2003)

การใส่ถ่านชีวภาพในอัตราต่าง ๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของฟอสฟอรัสในดิน โดยการใส่ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันในอัตรา 2 ตันต่อไร่ ส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกไม่สมบูรณ์ (F3) มีค่าลดลงจาก 81% ของดินก่อนการทดลอง เป็น 56% ในช่วงเดือนที่ 2 โดยสัดส่วนของฟอสฟอรัสที่ลดลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะจับกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกสมบูรณ์ (F4) ที่เพิ่มขึ้นจาก 9.5% ของดินก่อนการ

ทดลอง เป็น 28% ในเดือนที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการใส่ถ่านชีวภาพซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับส่งอิเล็กตรอน ส่งเสริมการรีดักชันของเหล็ก และอาจส่งเสริมการตกตะกอนของแร่เฟอรัสฟอสเฟต เช่น แร่วิวไวไนต์ (Vivianite: $Fe_3[PO_4]_2$) ที่มีผลึกขนาดใหญ่ขึ้น (Eskandarpour *et al.*, 2006; Johnston *et al.*, 2011) ส่วนการเปลี่ยนสภาพของฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะจับกับเหล็กออกไซด์ที่มีผลึกสมบูรณ์ (F4) มาเป็นฟอสฟอรัสในรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กที่มีผลึกไม่สมบูรณ์ (F3) ในเดือนที่ 3 และ 4 ให้ผลเช่นเดียวกันกับตำรับควบคุม นอกจากนี้ การใส่ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันในอัตรา 2 ตันต่อไร่ ช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสในส่วนที่ละลายน้ำได้และมีการดูดซับแบบอ่อน ๆ (F1) จาก 0.035% เป็น 0.24% ในเดือนที่ 2 ของการทดลอง ส่วนของฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะจับกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (F2) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาในการบ่มดินจาก 6.7% เป็น 10% ขณะที่ฟอสฟอรัสที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมคาร์บอเนต (F5) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 2.8% เป็น 4.2% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการตกตะกอนของฟอสฟอรัสกับแคลเซียมในดิน (Wang and Nancollas, 2008)

สรุป

ผลการทดลองบ่มดินด้วยถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันในดินนาเปรี้ยวจัดในสภาพน้ำขังเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์แสดงให้เห็นว่า การขังน้ำมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดินนาเปรี้ยวจัด โดยเพิ่มพีเอชดิน และเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัส และซิลิโคนที่สกัดได้ นอกจากนี้ยังเพิ่มธาตุอาหารพืช (Ca, Mg, K, Fe, Mn และ Zn) ในรูปที่ละลายน้ำได้อีกด้วย การใส่ถ่านชีวภาพจากทะเลสาบปาล์มเปล่า ช่วยส่งเสริมความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซิลิโคนเนื่องจากวัสดุปาล์มน้ำมันในส่วนของทะเลสาบปาล์มผลเปล่าที่นำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ มีธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซิลิโคน

ในปริมาณสูง ซึ่งมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินและเพิ่มธาตุอาหารพืช การศึกษาสัดส่วนของฟอสฟอรัสในดิน แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้และมีการดูดซับแบบอ่อน ๆ (F1) มีปริมาณต่ำมาก (< 1%) เนื่องจากฟอสฟอรัสส่วนใหญ่มักอยู่รูปที่สร้างพันธะกับเหล็กทั้งในรูปที่มีผลึกสมบูรณ์ (F4) และมีผลึกไม่สมบูรณ์

(F3) การใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดพบว่าถ่านชีวภาพสามารถช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ได้ 2 ส่วน คือ ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้และมีการดูดซับแบบอ่อน ๆ (F1) และฟอสฟอรัสที่สร้างพันธะกับแคลเซียมคาร์บอเนต (F5) โดยไม่แสดงผลที่ชัดเจนระหว่างอัตราที่ใช้ (0.5, 1.0 และ 2.0 ตันต่อไร่)

เอกสารอ้างอิง

- Álvarez, E., M.L. Fernández–Marcos, C. Monterroso and M.J. Fernández–Sanjurjo. 2005. Application of aluminium toxicity indices to soils under various forest species. *For. Ecol. Manage.* 211: 227–239.
- Arai, Y. and D.L. Sparks. 2007. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: A multiscale approach. *Adv. Agron.* 94: 135–179.
- Attanandana, T. and S. Vacharotayan. 1986. Acid sulfate soils: Their characteristic, genesis, amelioration and utilization. *J. Southeast Asian Stud.* 24: 154–180.
- Beckwith, R.S. and R. Reeve. 1963. Studies on soluble silica in soils. I. The sorption of silicic acid by soils and minerals. *Soil Res.* 1: 157–168.
- Carmo, D.L., C.A. Silva, J.M. Lima and G.L. Pinheiro. 2016. Electrical conductivity and chemical composition of soil solution: Comparison of solution samplers in tropical soils. *Rev. Bras. Cienc. Solo.* 40: 1–17.
- Chen, M. and L.Q. Ma. 2001. Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 491–499.
- Chintala, R., T.E. Schumacher, L.M. McDonald, D.E. Clay, D.D. Malo, S.K. Papiernik, S.A. Clay and J.L. Julson. 2014. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. *Clean (Weinh).* 42: 626–634.
- Eskandarpour, A., K. Sassa, Y. Bando, M. Okido and S. Asai. 2006. Magnetic removal of phosphate from wastewater using schwertmannite. *Mater. Trans.* 47: 1832–1837.
- Fanning, D.S. and M.C. Rabenhorst. 2008. Rational for updating the definitions of sulfidic materials and the sulfuric horizon in soil taxonomy and proposed revised definitions, pp. 53–61. *In* C. Lin, S. Huang, Y. Li. eds. *Proceedings of the Joint Conference of the 6th International Symposium in Acid Sulfate Soil Conference and the Acid Rock Drainage Symposium.* Guangdong Science & Technology Press, Guangzhou, China.

- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, pp. 383–411. *In* A. Klute, ed. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nded. Agronomy No. 9. American Society Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Glaser, B., J. Lehmann and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biol. Fertil. Soils* 35: 219–230.
- Harsono, S.S., P. Grundman, L.H. Lau, A. Hansen, M.A.M. Salleh, A. Meyer–Aurich, A. Idris and T.I.M. Ghazi. 2013. Energy balances, greenhouse gas emissions and economics of biochar production from palm oil empty fruit bunches. *Resour. Conserv. Recycl.* 77: 108–115.
- IndexMundi. 2013. Crude Palm Oil Futures End of Day Settlement Price. Available Source: <http://www.Indexmundi.com/commodities/?commodity=palm-oil&months=60>
- Janjirawuttikul, N., M. Umitsu and S. Tawornpruek. 2011. Pedogenesis of acid sulfate soils in the lower central plain of Thailand. *Int. J. Soil Sci.* 6: 77.
- Jiang, T.Y., J. Jiang, R.K. Xu and Z. Li. 2012. Adsorption of Pb (II) on variable charge soils amended with rice–straw derived biochar. *Chemosphere* 89: 249–256.
- Johnston, S.G., A.F. Keene, R.T. Bush, E.D. Burton, L.A. Sullivan, L. Isaacson, A.E. McElnea, C.R. Ahern, C.D. Smith and B. Powell. 2011. Iron geochemical zonation in a tidally inundated acid sulfate soil wetland. *Chem. Geol.* 280: 257–270.
- Kovar, J.L. and G.M. Pierzynski. 2009. *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters*. Southern Cooperative Series Bulletin, 2nd edition; Virginia Tech University: Blacksburg, Virginia, USA.
- Lehmann, J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biol. Biochem.* 43: 1812–1836.
- 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. Agri. Sci.* 2: 39.
- Mortvedt, J.J. 1980. Micronutrient Soil Test Correlations and Interpretations, pp. 99–117. *In* T.R. Peck, J.T. Cope, Jr and D.A. Whitney, eds. *Soil Testing: Correlating and Interpreting the Analytical Results*. ASA Spec. Publ. No. 29. Amer. Soc. of Agron.Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Office of Agricultural Economics. 2012. *Agricultural Economics Indicators of Thailand 2012*. Centre for Agricultural Information, Office of Agricultural Economics. (in Thai)
- Okimori, Y., M. Ogawa and F. Takahashi. 2003. Potential of CO₂ emission reductions by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in south Sumatra, Indonesia. *Mitigation Adapt. Strateg. Glob. Change.* 8: 261–280.
- Parfitt, R.L. 1989. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *Eur. J. Soil Sci.* 40: 359–369.
- Pode, R. 2016. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53: 1468–1485.

- Prakongkep, N., R.J. Gilkes and W. Wiriyakitnateekul. 2015. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178: 732–740.
- Prakongkep, N., R.J. Gilkes, B. Singh and S. Wong. 2012. Pyrite and other sulphur minerals in giant aquic spodosols, Western Australia. *Geoderma* 181: 78–90.
- Rinklebe, J. 2016. Processes related to release dynamics of trace elements in flooded soils at various scales, pp 3–17. *In* Rinklebe J., A.S. Knox, M. Paller, eds. *Trace Elements in Waterlogged Soils and Sediments*. CRC Press, Taylor and Francis Group Boca Raton, USA.
- Sahrawat, K.L. 2005. Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients. *J. Plant Nutr.* 27: 1471–1504.
- Sánchez-Alcalá, I., M. Campillo and J. Torrent. 2015. Critical Olsen P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ levels as related to soil properties: Results from micropot experiments. *Soil Use Manag.* 31: 233–240.
- Sari, N.A., C.F. Ishak and R.A. Bakar. 2014. Characterization of oil palm empty fruit bunch and rice husk biochars and their potential to adsorb arsenic and cadmium. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* 9: 450–456.
- Seyfferth, A.L. and S. Fendorf. 2012. Silicate mineral impacts on the uptake and storage of arsenic and plant nutrients in rice (*Oryza sativa L.*). *Environ. Sci. Technol.* 46: 13176–13183.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *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.
- Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner. 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3—Chemical Methods*. Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Tavakkoli, E., G. Lyons, P. English and C.N. Guppy. 2011. Silicon nutrition of rice is affected by soil pH, weathering and silicon fertilisation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174: 437–446.
- Turner, B.L., N. Mahieu and L.M. Condon. 2003. Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectral assignments of phosphorus compounds in soil NaOH-EDTA extracts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 497–510.
- Wang, L. and G.H. Nancollas. 2008. Calcium orthophosphates: Crystallization and dissolution. *Chem. Rev.* 108: 4628–4669.
- Yuan, J.H. and R.K. Xu. 2012. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China. *Soil Res.* 50: 570–578.
- Yusiharni, E. and R.J. Gilkes. 2012. Minerals in the ash of Australian native plants. *Geoderma* 189: 369–380.
- Zhang, Y., X. Lin and W. Werner. 2003. The effect of soil flooding on the transformation of Fe oxides and the adsorption/desorption behavior of phosphate. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166: 68–75.