การปลดปล่อยธาตุอาหารพืชส่วนที่ละลายน้ำได้ของปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้ลีโอนาร์ไดต์เป็นวัสดุผสมหลัก

Release kinetics of water extractable plant nutrients of a leonardite-based organic fertilizer

แสงดาว แลนรอด-เขาแก้ว [1*] จุฬาลักษณ์ จงสุพรรณพงศ์ [1] และ กรรณิการ์ สัจจาพันธ์ [1]

Saengdao Landrot-Khaokaew [1*] Chulaluck Chongsuphanpong [1] and Kanika Sajjaphan [1]

(Received 23 June 2020; Accepted 1 Sep 2020)

บทคัดย่อ

การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้ลีโอนาร์ไดต์ (Leo) ตามเงื่อนไขข้อกำหนดปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ปุ๋ยนี้ได้จากการผสมลีโอนาร์ไดต์ 45 เปอร์เซ็นต์ แกลบไบโอชาร์ 35 เปอร์เซ็นต์ และกากถั่วเหลือง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สกัดธาตุฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ด้วยสารสกัด Mehlich III ศึกษาการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ส่วนที่ละลายน้ำได้ ที่ระยะเวลาการสกัดต่างๆ (30, 60 และ 120 นาที) ในปุ๋ย Leo เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษาพบว่า ปุ๋ย Leo มีสมบัติทุกประการผ่านเงื่อนไขปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร โดยปุ๋ยมีปริมาณอินทรียวัตถุสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ และมีพีเอชต่ำกว่า 6 การปลดปล่อยไนโตรเจนเกิดขึ้นได้เร็วและสูงสุด ที่ระยะเวลาการสกัด 30 นาที แต่คิดเป็นเพียง 0.13 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ย รูปแบบการปลดปล่อยฟอสฟอรัส คล้ายกับการปลดปล่อยแคลเซียม เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสในปุ๋ยเป็นส่วนที่สกัดได้ด้วยน้ำ อย่างไรก็ตาม การละลายของฟอสฟอรัสช้ามาก และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในปุ๋ย Leo มีค่าต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปุ๋ย พิจารณาจากสมบัติของปุ๋ยและการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชในส่วนที่ละลายน้ำได้ ปุ๋ย Leo สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นปุ๋ยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

This research aimed to determine the properties of a leonardite-based organic fertilizer (Leo) following the organic fertilizer standard of department

คำสำคัญ: ลีโอนาร์ไดต์ แกลบไบโอชาร์ วัสดุปรับปรุงดิน ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

[1] ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900
Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkhen Campus, Bangkok 10900
[*] Corresponding author: agrsdk@yahoo.co.th or agrsdk2@yahoo.com

of agriculture (DOA). This fertilizer was made of 45 % leonardite, 35 % rice husk biochar, and 20% soybean meal by weight. Phosphorus (P), Potassium (K), Calcium (Ca), and Magnesium (Mg) were extracted using a Mehlich III extractant. The release kinetics of water extractable Nitrogen (N), Phosphorus (P), Potassium (K), Calcium (Ca), and Magnesium (Mg) were studied at various extraction time periods (i.e. 30, 60 and 120 minutes) to be used as a preliminary information to assess the environmental impact. Results showed that the Leo fertilizer properties complied with the organic fertilizer standard of DOA. It had organic matter content higher than 30 percent and its pH was lower than 6. The release kinetics of water extractable N was rapid and the highest release was found at a thirty-minute desorption time period. However, the release amount was only 0.13 percent of the total N concentration in the Leo fertilizer. The release kinetics of P and Ca were similar to each other. Almost hundred percent of P in the fertilizer was water extractable. However, the release of P was very slow and the total amount of P was less than 1 percent of the fertilizer's weight. Based on the fertilizer's properties and the water extractable nutrient release kinetics, the Leo fertilizer could be considered as an environmentally friendly fertilizer.

บทนำ

การเกษตรโดยทั่วไป หมายถึงการใช้ทรัพยากรต่างๆ เช่น ดิน น้ำ อากาศ และแสงแดด สำหรับการผลิตพืช หรือการทำปศุสัตว์ เพื่อให้ได้มาซึ่งอาหาร และปัจจัยจำเป็นสำหรับมนุษย์ (และสัตว์) การทำการเกษตรแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท โดยขึ้นกับประเด็นที่ใช้พิจารณาจำแนก เช่น หากพิจารณาจากแหล่งที่มาของทรัพยากรหรือวัสดุที่ใช้สำหรับการผลิต อาจแบ่งเป็นการทำการเกษตรแบบวิธีธรรมชาติ หรือการเกษตรอินทรีย์ และเกษตรเคมี เป็นต้น ปัจจุบันประเทศไทยให้ความสำคัญกับการทำเกษตรอินทรีย์มากขึ้น ทำให้ปุ๋ยอินทรีย์เป็นที่ต้องการของเกษตรกร แม้เกษตรกรจำนวนหนึ่งสามารถผลิตปุ๋ยอินทรีย์ในแบบชาวบ้านใช้เองได้ แต่เกษตรกรจำนวนหนึ่ง ยังต้องพึ่งปุ๋ยอินทรีย์ที่มีในท้องตลาด ซึ่งปุ๋ยอินทรีย์จำนวนมากที่มีขายโดยทั่วไปเป็นปุ๋ยที่ไม่ได้มีการขึ้นทะเบียน ไม่มีการแสดงผลการวิเคราะห์ หรือแสดงค่าวิเคราะห์สมบัติใดๆ เกษตรกรหรือผู้ซื้อทั่วไปจึงไม่สามารถมั่นใจได้ว่าปุ๋ยอินทรีย์ที่ซื้อมานั้น มีสมบัติเป็นอย่างไรและได้มาตรฐานตามที่หน่วยงานราชการกำหนดหรือไม่ โดยทั่วไปปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาตรฐานในท้องตลาดนั้นหายาก (หทัยชนก และภาสกร, 2555) จากผลการศึกษาสุ่มตรวจปุ๋ยอินทรีย์ 22 ตัวอย่างที่ผลิตจากโรงงานในภาคกลาง จำนวน 19 ตัวอย่าง พบว่าไม่มีตัวอย่างใดมีปริมาณไนโตรเจน

Keywords : Leonardite, Rice husk biochar, Soil amendment, Organic fertilizer, Environmentally friendly fertilizer

ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ตามข้อกำหนดของกรมวิชาการเกษตร และมีเพียง 18 เปอร์เซ็นต์ของปุ๋ยที่ทำการวิเคราะห์ มีปริมาณอินทรียวัตถุผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร (กัญจน์กรวลัย, 2554) ซึ่งหากประเทศไทยจะก้าวเข้าสู่การเป็นประเทศผู้นำในการผลิตอาหารจากระบบเกษตรอินทรีย์ สังคมควรมีข้อมูลและทางเลือกในการหาปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาตรฐานจำหน่ายในท้องตลาด หรือข้อมูลแนวทางผลิตปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาตรฐานที่เกษตรกรสามารถผลิตหรือผสมใช้เองได้ โดยเฉพาะการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่มีในพื้นที่หรือวัสดุพลอยได้จากกิจการต่างๆ ที่หาได้ง่ายปลอดภัยและราคาไม่แพง ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite) เป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการออกซิเดชันของถ่านหินลิกไนต์ (Kalaitzidi *et al*., 2003; Olivella *et al*., 2011) พบในบริเวณที่มีแหล่งถ่านหินลิกไนต์ (Hoffman *et al*., 1993; Simandl *et al*., 2001) ลีโอนาร์ไดต์มีปริมาณอินทรียวัตถุในรูปสารฮิวมิกสูง (Hoffman *et al*., 1993; Simandl *et al*., 2001) สำหรับประเทศไทย ลีโอนาร์ไดต์แหล่งใหญ่ตั้งอยู่ที่ภาคเหนือ ในอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปัจจุบันมีอยู่ประมาณ 1 ล้านตัน ซึ่งสามารถแจกหรือจำหน่ายในราคาไม่แพงให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนลำปาง นอกจากนี้ พบลีโอนาร์ไดต์กระจายอยู่จังหวัดอื่นๆ ที่พบถ่านหินลิกไนต์ เช่น ลำพูน พะเยา และกระบี่ (วิวัฒน์ และคณะ, 2552) ลีโอนาร์ไดต์ที่พบในประเทศไทยมีสมบัติที่ดีต่อการเกษตรหลายประการ เนื่องจากมีธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม อีกทั้งยังมีปริมาณอินทรียวัตถุเป็นองค์ประกอบสูงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ (Pochadom *et al*., 2013; Ratanaprommanee *et al*., 2016) ชาญยุทธและคณะ (2560) รายงานว่า การใส่ปุ๋ยหมักเพียงอย่างเดียว หรือใส่ร่วมกับลีโอนาร์ไดต์จากเหมืองแม่เมาะ สามารถเพิ่มระดับอินทรียวัตถุ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ได้ประมาณสองเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีควบคุม ดังนั้นจากสมบัติของลีโอนาร์ไดต์ ถือว่าเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่เป็นแหล่งอินทรียวัตถุได้ ซึ่งโดยทั่วไปปุ๋ยอินทรีย์ที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูง มีค่าผ่านตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรในท้องตลาดนั้นหาได้ยาก (หทัยชนก และภาสกร, 2555) ล่าสุด แสงดาว และคณะ (2563) ได้ทดลองผลิตปุ๋ยอินทรีย์จากลีโอนาร์ไดต์ จำนวน 8 สูตร และพบว่าปุ๋ยสูตรที่ได้จากการผสมลีโอนาร์ไดต์ แกลบไบโอชาร์ และกากถั่วเหลือง จำนวน 45, 35 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีสมบัติทุกประการ ผ่านเงื่อนไขปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร อย่างไรก็ตาม ข้อกังวลประการหนึ่งในการใช้ปุ๋ย เช่น ปุ๋ยอินทรีย์มูลสัตว์ หรือ ปุ๋ยเคมี คือปริมาณธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายน้ำได้ ซึ่งหากมีปริมาณมากและปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว อาจส่งผลให้มีธาตุดังกล่าวไหลสู่น้ำใต้ดิน หรือผิวดิน ส่งผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดยูโทรฟิเคชั่นได้ (Sharpley and Moyer, 2000; Dao and Cavigeli, 2003; Nyakatawa *et al*., 2010) ดังนั้นการศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ รวมทั้งการปลดปล่อยธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม จากปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ ที่ระยะเวลาการสกัดต่างๆ เพื่อใช้ข้อมูลสำหรับการประเมินเบื้องต้น ถึงความปลอดภัยของปุ๋ย

กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งคาดว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์กับผู้ที่สนใจนำปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ไปใช้ในอนาคต โดยเฉพาะกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ใกล้เหมืองแม่เมาะที่สนใจนำลีโอนาร์ไดต์ไปใช้ประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าโดยการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาตรฐาน ตามข้อกำหนดของกรมวิชาการเกษตร

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างปุ๋ยและการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ กรมวิชาการเกษตร

ตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ได้รับมาจากส่วนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ของโครงการวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 60-G202000-11-IO.SS3G3008304 ซึ่งตัวอย่างปุ๋ยได้จากการผสมลีโอนาร์ไดต์ 45 เปอร์เซ็นต์ แกลบไบโอชาร์ 35 เปอร์เซ็นต์ และกากถั่วเหลือง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตัวอย่างหลังการผสมโดยไม่ผ่านการร่อนหรือบดมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีดำ และแห้ง (Figure 1) นำตัวอย่างปุ๋ยที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ตามข้อกำหนดปุ๋ยอินทรีย์เพื่อขึ้นทะเบียนของกรมวิชาการเกษตร (กรมวิชาการเกษตร, 2548 และ 2551; นรีลักษณ์, 2548; กัญจน์กรวลัย, 2554) ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) และสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) โดยใช้อัตราส่วนของปุ๋ย หรือวัสดุต่อน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water: DI) เท่ากับ 1:2 และ 1:10 แล้ววัดด้วย pH meter และ EC meter ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์อย่างละ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุโดยวิธีของ Walkley and Black ไนโตรเจนทั้งหมด (Total-N) โดยวิธี Kjeldahl method วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูป P_2O_5 (Total-P_2O_5) และโพแทสเซียมในรูป K_2O (Total-K_2O) ทั้งหมด โดยการสกัดด้วยกรดผสม $HClO_4$: HNO_3 (อัตรา 1:1) วิเคราะห์ปริมาณ Ca, Mg, Cd, Cr, Cu และ Pb โดยการสกัดด้วยกรดผสม HCl : HNO_3 (อัตรา 3:1) ปริมาณ As ด้วยกรดผสม H_2SO_4 : $HClO_4$: HNO_3

Figure 1 Physical appearance of the Leo fertilizer after mixing

(อัตรา 0.4 : 1 : 4) และ Hg ด้วย H_2SO_4 : HNO_3 (อัตรา 1.5-2.5 : 1) ส่วนการวิเคราะห์การย่อยสลายที่สมบูรณ์ของปุ๋ย ใช้วิธีการทดสอบดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination index: GI) โดยใช้ตัวอย่างปุ๋ยกับน้ำกลั่น ในอัตราส่วนปุ๋ย:น้ำ เท่ากับ 1:10 เขย่าที่ความเร็ว 180 ครั้งต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง แล้วนำสารละลายที่ได้ไปทดสอบอัตราการงอกของเมล็ดผักในจานเพาะ ตามวิธีที่ระบุในคู่มือการวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (กลุ่มงานวิเคราะห์ปุ๋ย, 2541) โดยทุกสมบัติยกเว้นค่าพีเอชและการนำไฟฟ้า ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการกลางแห่งประเทศไทย

2. การวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนิกส่วนที่ละลายน้ำได้ (Water Extractable fraction) ทั้งหมด

จากรายงานของ Pochadom *et al*., 2013 สีโอนาร์ไดต์จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณอาร์เซนิกประมาณ 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ากำหนดสำหรับปุ๋ยอินทรีย์ (กรมวิชาการเกษตร, 2548 และ 2551) แต่เพื่อความมั่นใจในการนำปุ๋ยไปใช้นอกจากการวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนิกทั้งหมดในปุ๋ยแล้ว จึงทำการศึกษาอาร์เซนิกในส่วนที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถนำไปใช้/ดูดกินได้โดยพืช (Plant bioavailability) เพิ่มเติมด้วย โดยชั่งตัวอย่างที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน จำนวน 1 กรัม ลงในหลอดเซนตริฟิวจ์พลาสติก ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจำนวน 20 มิลลิลิตร ปิดฝา แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วกรองแยกสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman number 42 และกรองอีกครั้งด้วย 0.45 ไมครอน membrane filter (Huang and Fujii, 1996; Rodriguez *et al*., 2003) แล้ววัดอาร์เซนิกด้วย Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารส่วนที่สกัดได้ด้วยสารสกัด Mehlich III

ทำการสกัดตัวอย่างปุ๋ย ด้วยสารสกัด Mehlich III (0.2 M CH_3COOH + 0.25 M NH_4NO_3 + 0.013 M $1HNO_3$ + 0.015 M NH_4F + 0.001 M EDTA; Mehlich, 1984) โดยชั่งตัวอย่างขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร จำนวน 10 กรัม ลงในขวดพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวนอน ที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองแยกสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman number 42 เติมกรดไฮโดรคลอริกลงไปเพื่อปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 2 แล้ววัดปริมาณธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ด้วยเครื่อง ICP-OES ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4. ศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชที่ละลายน้ำได้ที่ระยะเวลาการสกัดต่างๆ

ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารคือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ส่วนที่สกัดได้ด้วยน้ำ (Water extractable) ที่ระยะเวลาการสกัดต่างๆ 3 เวลา คือ 30, 60 และ 120

นาที ด้วยวิธี Batch technique โดยเวลาที่คัดเลือกมาทดลองนี้ ปรับมาจากเวลาที่รายงานใน Sharpley and Moyer 2000; Zhang *et al*., 2011; Khaokaew *et al*., 2011 โดยใช้การสกัดด้วยน้ำกลั่น (DI-water) ที่สัดส่วนตัวอย่างต่อน้ำ 1:10 เขย่า 30, 60 และ 120 นาที แล้วกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง ขนาด 0.45 ไมครอน ทำการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ หลังจากได้สารละลาย นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนที่สกัดได้ด้วยวิธีการกลั่นและไทเทรต ส่วนธาตุอื่นๆ ได้แก่ P, K Ca และ Mg ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES ขั้นตอนโดยสรุปแสดงดัง Figure 2

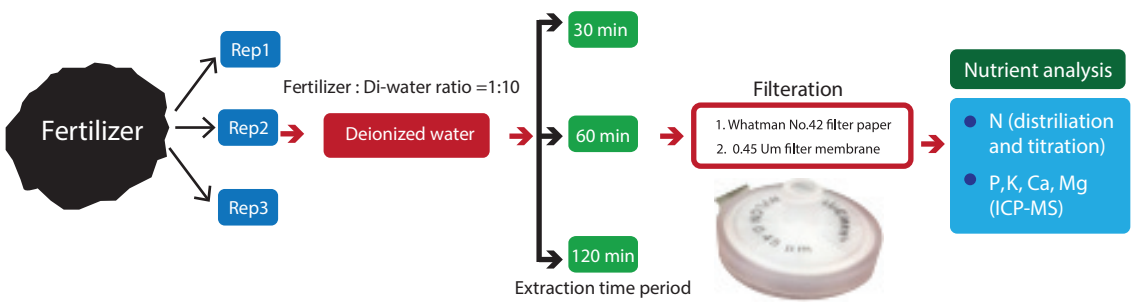

Figure 2 Water extractable release kinetics study of plant nutrients in the Leo fertilizer using a batch technique

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติของปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ ตามข้อกำหนดกรมวิชาการเกษตร

ผลการวิเคราะห์สมบัติตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการผสมลีโอนาร์ไดต์ 45 เปอร์เซ็นต์ แกลบไบโอชาร์ 35 เปอร์เซ็นต์ และกากถั่วเหลือง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แสดงใน Table 1 ซึ่งจากผลการศึกษา พบว่า สมบัติปุ๋ยทุกประการที่ทำการวิเคราะห์ผ่านมาตรฐานกำหนดของกรมวิชาการเกษตร สอดคล้องกับที่รายงานโดยแสงดาว และคณะ (2563) โดยปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ มีค่า EC ต่ำกว่า 4 dS/m ปริมาณอินทรียวัตถุสูงกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณธาตุอาหารหลักรวมกัน สูงกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ค่า pH GI ค่า C/N ratio ปริมาณธาตุ As, Cd, Cr, Cu, Pb และค่า Hg ความชื้น ขนาดของปุ๋ย ปริมาณหิน กรวด และสารปนเปื้อนทางกายภาพอื่น ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร จากการศึกษานอกจากจะพบว่าปริมาณอาร์เซนิกทั้งหมดในตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์ (50 มก./กก.) ตามมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตรแล้ว ปริมาณอาร์เซนิกในส่วนที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดยังมีค่าต่ำมาก (0.28 มก./กก.) สำหรับปริมาณธาตุอาหารตามกำหนดของกรมวิชาการเกษตรนั้น พบว่าหากพิจารณาแยกธาตุมีเพียงไนโตรเจนและโพแทสเซียมเท่านั้น

Table 1 Properties of the leonardite organic fertilizer (Leo) as well as value of DOA standard for each fertilizer parameter.

Property	Standard value by DOA	Leo fertilizer
pH (1:2)	5.5-8.5	5.5
EC (1:10) (dS/m)	<10	3.93
Germination index (%)	>80	91.3
OM (%)	≥20	36.9
C:N ratio	≤20	10:1
Total-N (%)	≥1.0 or all N P K	2.1
Total-P_2O_5 (%)	≥0.5 combined ≥2	0.29
Total-K_2O (%)	>0.5	0.70
Sieving size (mm)	<12.5x12.5	<12.5x12.5
Gravel size >5 mm (%)	<2	None
Moisture content (%)	<30	<30
Total Ca (%)	-	2.46
Total Mg (%)	-	0.41
Extractable P (Mehlich III) (mg/kg)	-	400
Extractable K (Mehlich III) (%)	-	0.53
Extractable Ca (Mehlich III) (%)	-	1.09
Extractable Mg (Mehlich III) (%)	-	0.14
Total As (mg/kg)	50	17.3
Total water extractable As (mg/kg)	-	0.28
Total Cd (mg/kg)	5	0.46
Total Cu (mg/kg)	<500	28.0
Total Cr (mg/kg)	<300	7.8
Total Pb (mg/kg)	<500	10.0
Total Hg (mg/kg)	<2	ND

Note: ND means not detected.

ที่มีค่าผ่านเกณฑ์ คือมีค่าเท่ากับ 2.1 และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนฟอสฟอรัสนั้นมีปริมาณเพียง 0.29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมาตรฐานกำหนดไว้ที่อย่างน้อย 0.5 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อรวมทั้งสามธาตุ ปริมาณธาตุอาหารหลักมีมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านข้อกำหนดของกรมวิชาการเกษตร จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยเห็นได้ว่าปุ๋ยมีค่าพีเอช 5.5 ซึ่งนอกจากจะสามารถใช้ได้กับดินโดยทั่วไปแล้ว ยังน่าจะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับดินที่มีพีเอชสูง เช่น ดินเนื้อปูนหรือดินด่างจัด หรือบริเวณที่ใช้น้ำบาดาลที่มีพีเอชสูง นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบกับปุ๋ยอินทรีย์อื่นๆ เช่น มูลสัตว์ เศษพืชต่างๆ จุดเด่นของปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ คือ การมีปริมาณอินทรียวัตถุที่สูงและค่า C/N ratio ต่ำกว่า 20:1 ซึ่งมีสมบัติสอดคล้องกับปุ๋ยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Chen *et al*., 2018) ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูงผ่านตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรในท้องตลาดนั้นถือเป็นสิ่งที่หายาก (หทัยชนก และภาสกร, 2555) กัญจน์กรวลัย (2554) ได้สำรวจตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์ 22 ตัวอย่าง ที่จำหน่ายในเขตภาคกลาง จาก 19 โรงงานปุ๋ยอินทรีย์ในประเทศไทย และพบว่ามีเพียง 18 เปอร์เซ็นต์ของปุ๋ยที่ทำการวิเคราะห์มีปริมาณอินทรียวัตถุผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร

จากการวิเคราะห์เพิ่มเติมนอกเหนือจากธาตุที่นำเสนอใน Table 1 แล้ว ผลการวิจัยยังพบว่าลีโอนาร์ไดต์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุหลักในการผสมปุ๋ยมีธาตุอาหารพืชอื่นๆ อีก เช่น กำมะถัน (5.0-6.7 เปอร์เซ็นต์) เหล็ก (3.2-6.5 เปอร์เซ็นต์) แมงกานีส (72-141 มก./กก.) และสังกะสี (27-59 มก./กก.) รวมทั้งธาตุเสริมประโยชน์ เช่น ซิลิกอน และสารฮิวมิก (กรดฮิวมิก กรดฟลุวิค และฮิวมิน) เป็นองค์ประกอบ (Landrot *et al*., 2014; Ratanaprommanee *et al*., 2016) โดย ณธรรศ และอรวรรณ (2557) รายงานว่าลีโอนาร์ไดต์จากเหมืองแม่เมาะ บางตัวอย่างมีกรดฮิวมิกเป็นองค์ประกอบสูงถึง 57.96 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์จากการศึกษานี้ถือเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาตรฐานที่ไม่ยุ่งยาก สำหรับเกษตรกรที่สนใจและอยู่ใกล้แหล่งลีโอนาร์ไดต์

2. การปลดปล่อยธาตุอาหารส่วนที่สกัดได้ด้วยน้ำที่ระยะเวลาการสกัดต่างๆ

ผลการศึกษาการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม โดยการสกัดด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ระยะเวลาการสกัด 30, 60 และ 120 นาที แสดงใน Figure 3, 4 และ 5 โดยจากผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่การปลดปล่อยสูงในช่วง 30 นาทีแรก ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน โพแทสเซียมและแมกนีเซียม และกลุ่มที่สองคือกลุ่มที่การปลดปล่อยสูงสุดที่ระยะเวลาการสกัด 120 นาที ได้แก่ ธาตุฟอสฟอรัสและแคลเซียม รายละเอียดของแต่ละธาตุมีดังนี้

ผลการวิเคราะห์ธาตุไนโตรเจนในรูปที่ละลายน้ำได้ พบว่าปลดปล่อยได้เร็วในช่วงระยะเวลาการสกัด 30 นาที โดยปริมาณที่ปลดปล่อยสูงที่สุดคือ 26.43 มก./กก. ซึ่งคิดเป็นเพียง 0.13 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ย (2.1 เปอร์เซ็นต์, Table 1) ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนในปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ไม่ได้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ง่าย และการปลดปล่อยโดยการใช้น้ำเป็นตัวสกัดได้น้อยมาก แม้ปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานปริมาณไนโตรเจน

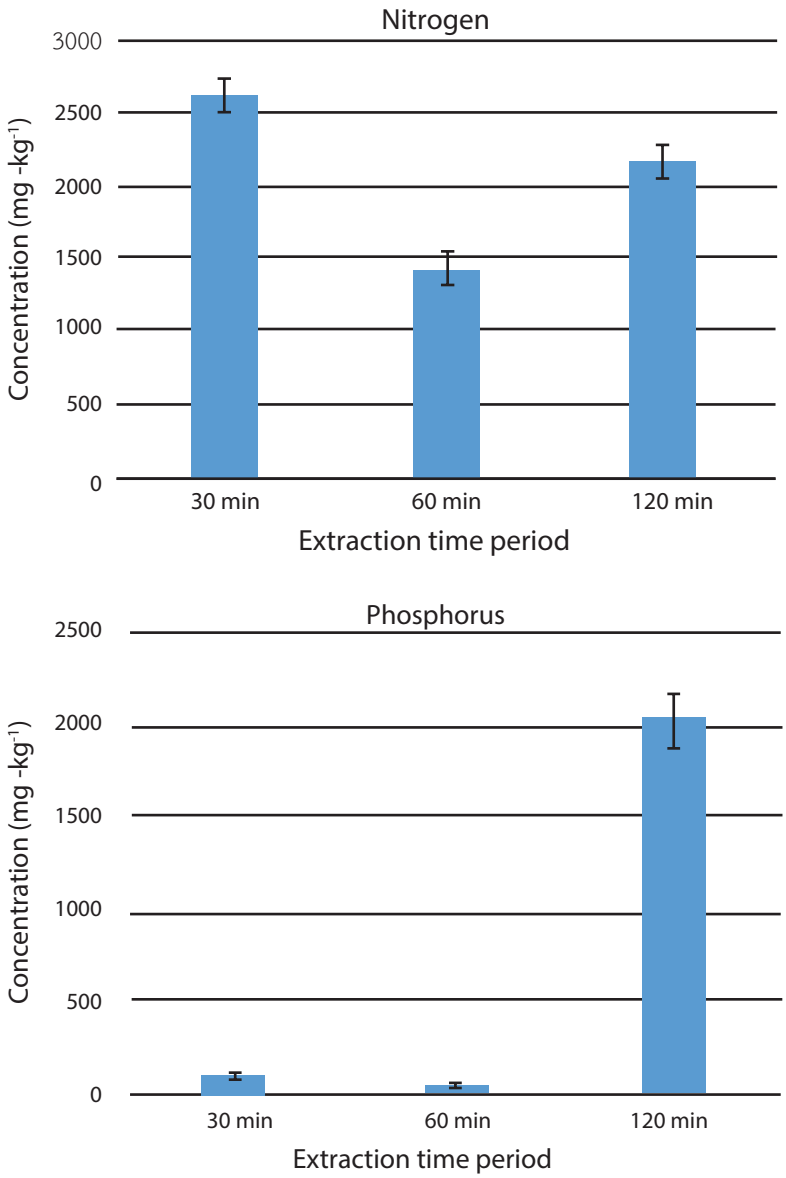

Figure 3 Water extractable release kinetics of nitrogen and phosphorus in the Leo fertilizer

ที่สกัดได้ด้วยน้ำในปุ๋ย แต่เมื่อพิจารณาจากค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่สกัดได้ด้วยน้ำ โอกาสที่ไนโตรเจนในปุ๋ยอินทรีย์จะละลายจนเหลือจากการดูดกินของพืชและไหลสู่น้ำใต้ดินหรือผิวดินจนเกิดผลกระทบเชิงลบกับสิ่งแวดล้อมนั้นถือว่าต่ำมาก

สำหรับธาตุฟอสฟอรัสนั้นมีปริมาณต่ำกว่าข้อกำหนดปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดไว้ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ Ratanaprommanee *et al.*, 2016 โดยการปลดปล่อยแตกต่างจากธาตุไนโตรเจน คือปริมาณที่ปลดปล่อยได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณทั้งหมด แต่การปลดปล่อยช้า จาก Figure 3 จะเห็นได้ว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในช่วง 30 นาที (111 มก./กก.) และ 60 นาที (57 มก./กก.) ต่ำกว่าปริมาณที่สกัดออกมาได้ในช่วงระยะเวลาการสกัด 120 นาที (2,031 มก./กก.) กว่า 30 เท่า โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดออกมาได้ในช่วง 120 นาทีนั้น คิดเป็นเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่มีในปุ๋ย (0.29 เปอร์เซ็นต์) แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในปุ๋ยนี้ แม้จะละลายน้ำได้ แต่ก็ละลายได้ช้ามาก สอดคล้องกับปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดจากสารสกัด Mehlich III ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสที่คาดว่าเป็นประโยชน์กับพืชได้ทันที พบว่ามีค่า 400 มก./กก. เท่านั้น (Table 1) หากพิจารณาเวลาการสกัดเดียวกัน (60 นาที) ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดออกมาได้นี้ต่ำกว่าในปุ๋ยมูลสัตว์หลายประเภท ดัง Sharpley and Moyer (2000) ที่รายงานว่าปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในมูลสัตว์แตกต่างกันไปตามชนิดสัตว์และอาหารที่สัตว์ได้รับมีค่าตั้งแต่ 2,600-40,000 มก./กก. และส่วนที่ละลายน้ำได้ (ที่เวลาการสกัด 60 นาที สัดส่วนของปุ๋ยต่อน้ำ DI = 1:200) มีค่าตั้งแต่ 1,630-8,520 มก./กก. ซึ่งสูงกว่าปุ๋ยลีโอนาร์ไดต์มาก ดังนั้นแม้ปัจจุบันยังไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ด้วยน้ำในปุ๋ย เช่นเดียวกับกรณีของธาตุไนโตรเจน เมื่อพิจารณาจากการละลายของฟอสฟอรัสที่ช้าและปริมาณฟอสฟอรัสในปุ๋ยที่มีค่าต่ำ โอกาสที่ฟอสฟอรัสในปุ๋ยอินทรีย์จะละลายอย่างรวดเร็วและไหลลงสู่น้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดินจนเกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมนั้น จึงมีความเป็นไปได้น้อยมาก

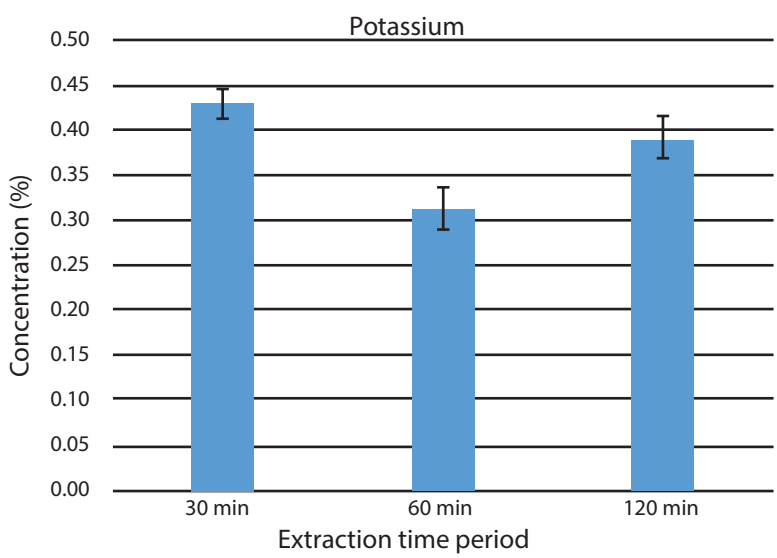

Figure 4 Water extractable release kinetics of potassium in the Leo fertilizer

การปลดปล่อยโพแทสเซียมนั้น พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงระยะเวลาการสกัด โดยสูงสุดที่เวลา 30 นาที (0.43 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือ ที่ 120 นาที (0.39 เปอร์เซ็นต์) และที่ 60 นาที (0.31 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งปริมาณที่สกัดได้ใกล้เคียงกับปริมาณที่สกัดโดยสารสกัด Mehlich III (0.53 เปอร์เซ็นต์, Table 1) และมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดที่เป็นประโยชน์ (0.7 เปอร์เซ็นต์, Table 1) แสดงให้เห็นว่าปริมาณโพแทสเซียมเป็นประโยชน์ในปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ปลดปล่อยเร็วซึ่งธาตุโพแทสเซียมนั้นไม่มีผลกระทบเชิงลบกับระบบนิเวศน์เหมือนกรณีของธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ดังนั้น แม้โพแทสเซียมในปุ๋ยจะละลายน้ำได้เร็ว ก็ไม่ก่อปัญหากับสิ่งแวดล้อม แต่กลับจะเป็นประโยชน์ได้ดีสำหรับพืช เนื่องจากสามารถดูดกินโพแทสเซียมในส่วนนี้ได้ง่าย

การปลดปล่อยแคลเซียมมีความคล้ายกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมากคือปลดปล่อยช้าและเพียงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแคลเซียมทั้งหมดที่มีในปุ๋ย (2.46 เปอร์เซ็นต์, Table 1) เท่านั้นที่ปลดปล่อยออกมาในช่วงการสกัด 60 นาทีแรก ในขณะที่ 120 นาที สามารถสกัดแคลเซียมได้ถึง 1.48 เปอร์เซ็นต์ หรือปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ของแคลเซียมทั้งหมด ซึ่งปริมาณแคลเซียมที่สกัดด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 120 นาทีนี้ ใกล้เคียงกับปริมาณแคลเซียมที่สกัดโดยสารสกัด Mehlich III (1.09 เปอร์เซ็นต์, Table 1) และการปลดปล่อยแคลเซียมสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอรัสอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่นๆ (Figure 3, 4 และ 5) แสดงให้เห็นว่า ฟอสฟอรัสที่อยู่ในปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ ส่วนใหญ่น่าจะอยู่กับสารประกอบแคลเซียม (Ratanpromanee *et al*., 2016) ดังนั้นเมื่อมีการปลดปล่อยแคลเซียม ฟอสฟอรัสจึงหลุดออกมาในสารละลายได้

สำหรับธาตุแมกนีเซียมนั้นพบว่าลักษณะการปลดปล่อย คล้ายกับกรณีของธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียม คือ ปลดปล่อยได้เร็ว โดยค่าสูงสุดสกัดได้ภายใน 30 นาที (0.09 เปอร์เซ็นต์) สอดคล้องกับปริมาณที่สกัดได้จากสารสกัด Mehlich III (0.14 เปอร์เซ็นต์, Table 1) และคิดเป็นประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมดในปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ (0.41 เปอร์เซ็นต์, Table 1) ซึ่งแม้เพิ่มเวลาการสกัดเป็น 120 นาที ก็ไม่ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมในสารละลายเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามปริมาณแมกนีเซียมในสารละลายกลับลดลงเหลือเพียง 0.04 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งปริมาณแมกนีเซียมที่ลดลงนี้ อาจเป็นผลมาจากการไล่ที่ระหว่างแมกนีเซียมที่สกัดออกมาได้ในช่วง 60 นาทีแรกกับแคลเซียม จึงทำให้ปริมาณแมกนีเซียมในสารละลายลดลงเกือบเท่าตัว ในขณะที่แคลเซียมเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลาการสกัด 120 นาที (Figure 5) แม้ในสารละลายอาจมีแคตไอออนอื่น เช่น โพแทสเซียม แต่จาก Figure 4 โพแทสเซียม (Ionic Radius (IR) = 1.52 Å) มีค่าใกล้เคียงกันทุกระยะเวลาการสกัด ส่วนธาตุเหล็กนั้น แม้ไม่ได้มีการนำเสนอ แต่พบว่ามีปริมาณที่สกัดได้ในทุกช่วงเวลาใกล้เคียงกันและต่ำกว่า 30 มก./กก. ดังนั้นจากปริมาณที่สกัดได้ที่ระยะเวลาการสกัดต่างๆ เบื้องต้นสมมุติฐานได้ว่าน่าจะเกิดการแทนที่ของแมกนีเซียม (IR = 0.86 Å) กับแคลเซียม (IR = 1.14 Å) เนื่องจากธาตุทั้งสองมีประจุเท่ากันและขนาดใกล้เคียงกัน (Holleman *et al*., 2001)

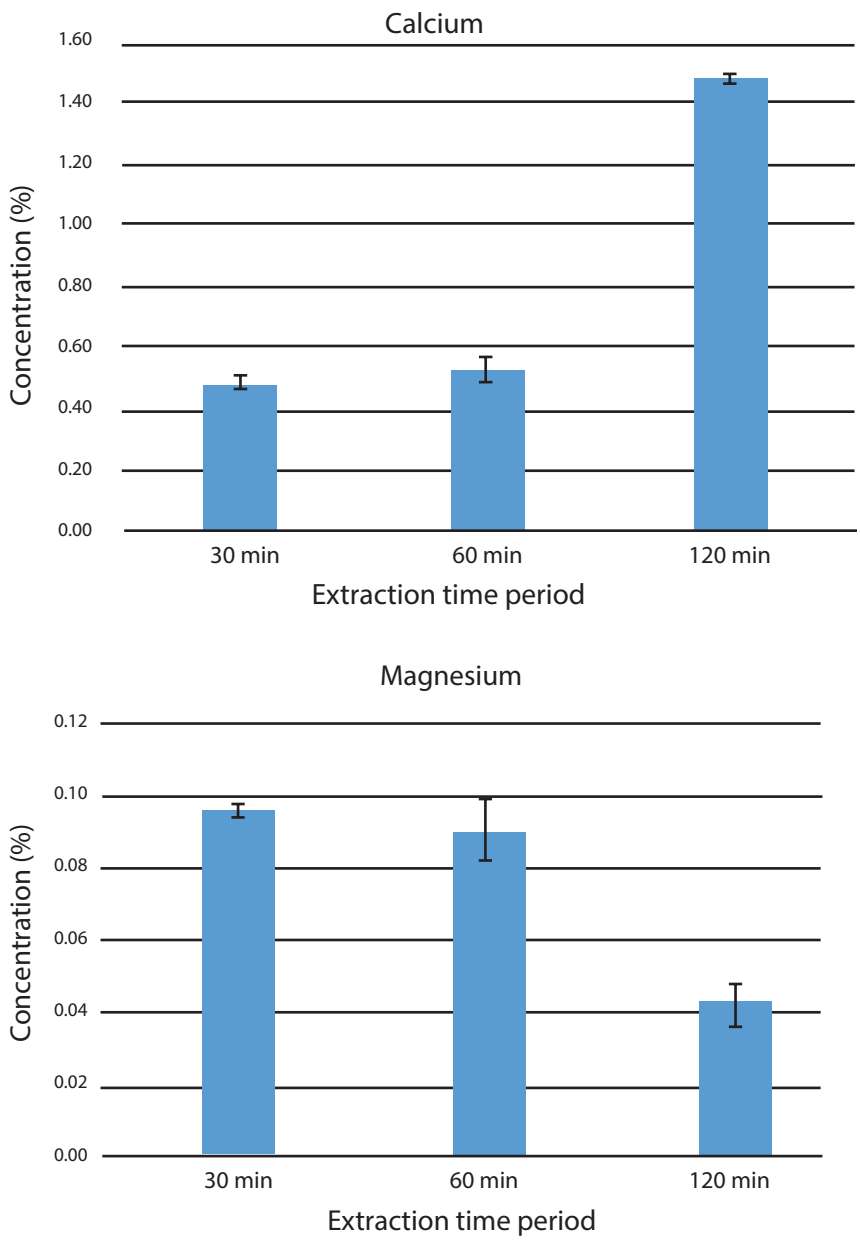

Figure 5 Water extractable release kinetics of calcium and magnesium in the Leo fertilizer

สรุปผล

ปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ที่ทำการศึกษามีสมบัติทุกประการ ตามข้อกำหนดปุ๋ยอินทรีย์ กรมวิชาการเกษตร โดยสมบัติที่โดดเด่นของปุ๋ยนี้คือปริมาณอินทรียวัตถุซึ่งมีสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังมีธาตุอาหารเป็นองค์ประกอบหลายธาตุ นอกจากนี้ ผลการศึกษาการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในส่วนที่สกัดได้ด้วยน้ำ พบว่าธาตุที่มีโอกาสเกิดผลกระทบเชิงลบกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสนั้นน้อยมาก แม้ว่าธาตุไนโตรเจนส่วนใหญ่จะละลายได้ภายใน 30 นาทีของการสกัด แต่ปริมาณที่สกัดได้ต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีในปุ๋ย ส่วนธาตุฟอสฟอรัสนั้น พบว่าแม้สามารถละลายในน้ำได้ดีกว่าไนโตรเจน แต่การปลดปล่อยเกิดขึ้นช้า โอกาสที่ทั้งสองธาตุนี้จะเหลือจากการดูดใช้โดยพืชและไหลสู่สิ่งแวดล้อม เช่น น้ำใต้ดิน หรือน้ำผิวดิน จึงถือว่าต่ำมาก ดังนั้นจากผลการศึกษาปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์ที่ทำการศึกษาซึ่งได้จากการผสมลีโอนาร์ไดต์ แกลบไบโอชาร์ และกากถั่วเหลือง (โปรตีน 42 เปอร์เซ็นต์) จำนวน 45, 35 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาตรฐานและมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม จึงสามารถใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ทางเลือกใหม่ของเกษตรกรที่สนใจ โดยเฉพาะผู้ที่อยู่ใกล้แหล่งลีโอนาร์ไดต์ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การนำปุ๋ยไปใช้เกิดประโยชน์สูงสุด ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอัตราการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ลีโอนาร์ไดต์กับพืชและดินประเภทต่างๆ ในระดับโรงเรือนหรือภาคสนามต่อไป นอกจากนี้ เพื่อให้เกิดความหลากหลายในการนำลีโอนาร์ไดต์ไปใช้ในแต่ละพื้นที่ สำหรับวัสดุที่นำมาผสมนั้น หากเกษตรกรหรือผู้สนใจไม่ได้ต้องการผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อนำไปขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร ก็อาจใช้วัสดุอื่นๆ ที่มีในท้องถิ่นที่มีสมบัติเป็นด่างและค่าการนำไฟฟ้าต่ำ มีธาตุอาหารหลักโดยเฉพาะไนโตรเจนสูง และมีธาตุไม่พึงประสงค์ต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมวิชาการเกษตรกำหนด สำหรับปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐานแทนกากถั่วเหลืองได้ เช่น เปลือกถั่วลิสงบด อีกทั้งอาจใช้วัสดุอื่นแทนแกลบไบโอชาร์ได้ เช่น ขุยไผ่ ขุยไผ่หมัก และแกลบเผา แต่แนะนำว่าควรใช้ลีโอนาร์ไดต์ในสูตรการผสมไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุผสมทั้งหมด

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2548. ประกาศกรมวิชาการเกษตร: เรื่องมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548. กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กลุ่มงานวิเคราะห์ปุ๋ย. 2541. คู่มือวิธีวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์. กองเกษตรเคมี. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2551. การขอขึ้นทะเบียน การออกใบสำคัญการขึ้นทะเบียน การขอแก้ไขรายการทะเบียน และแก้ไขรายการทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 แก้ไขเพิ่มเติม โดยพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2551. ประกาศกรมวิชาการเกษตร. เล่ม 125 ตอนพิเศษ 67 ง: 13-14.

กัญจน์กรวลัย ฤทธิ์เรืองเดช. 2554. การประเมินลักษณะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ที่จำหน่ายในเขตภาคกลางและผลของกระบวนการปั้นเม็ดต่อคุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชาญยุทธ รัตนพรหมมณี กวิพร จินะจันตา และ อรวรรณ ฉัตรสีรุ้ง. 2560. ผลของลีโอนาร์ไดต์ต่อการปรับปรุงคุณภาพดินและผลผลิตข้าว. วารสารเกษตร 33(2): 215-224.

ณธรรศ สมจันทร์ และ อรวรรณ ฉัตรสีรุ้ง. 2557. การปรับปรุงคุณภาพลีโอนาร์ไดต์สำหรับเป็นวัสดุปรับปรุงดิน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 37(1): 33-43.

นรีลักษณ์ ชูวรเวช. 2548. เอกสารวิชาการเรื่อง ความรู้เกี่ยวกับปุ๋ยอินทรีย์. สำนักวิจัยและพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร, กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 53 น.

วิวัฒน์ โตธิรกลุ, พลยุทธ ศุขสมิติ และ จินดารัตน์ โตกมลธรรม. 2552. การเตรียมสารประกอบเกลือฮิวเมตจากดินปนถ่านหินจากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง. สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เขต 3, กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

แสงดาว แลนรอด (เขาแก้ว), จริยา อามาตย์มนตรี ชัยภัทร คงแก้ว และ คณพล จุฑามณี. 2563. การผลิตปุ๋ยอินทรีย์จากลีโอนาร์ไดต์ตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์กรมวิชาการเกษตร. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 38 (1): 93-103.

หทัยชนก นันทพานิช และภาสกร นันทพานิช. 2555. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการค้า ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.

Dao, T. H. and M.A. Cavigeli. 2003. Mineralizable carbon, nitrogen, and water-extractable phosphorus release from stockpile and composted manure and manure-amended soils. Agronomy Journal 95:405–413.

Hoffman, G.L., D.J. Nikols, S. Stuhec and R.A. Wilson. 1993. Evaluation of leonardite (humalite) resources of Alberta. Alberta Research Council Open file report 45 p.

Holleman, A.F., E. Wiberg and N. Wiberg. 2001. Inorganic Chemistry. San Diego Academic Press Berlin New York De Gruyter. 1884 p.

Huang, P.M. and R. Fujii. 1996. Selenium and arsenic, pp. 793–83. In D.L. Sparks (ed.) Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.

Kalaitzidis, S., S. Papazisimou, A. Giannouli, A. Bouzinos and K. Christanis. 2003. Preliminary comparative analyses of two Greek leonardites. Fuel. 82: 859–861.

Khaokaew, S., R.L. Chaney, L. Landrot, M. Ginder-Vogel and D.L. Sparks. 2011. Speciation and release kinetics of

cadmium in an alkaline paddy soil under various flooding periods and draining conditions. Environmental Science & Technology 45(10): 4249-4255.

Landrot, G., K. Jutamanee, P. Sooksamiti and S. Khaokaew. 2014. Capacity of humic acids extracted at the large scale from Mae-Moh leonardite to be used as soil amenments based on their chemical properties, pp. 2960. In Proceeding of the 20th World Congress of Soil Science. 8-13 June 2014, Korean Society of Soil Science and Fertilizer. Jeju, South Korea.

Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Communication in Soil Science and Plant Analysis 15(12): 1409-1416.

Nyakatawa E.Z, D.A Mays, R. Britton, R.O. Pacumbaba Jr, H.R Howard and N.G Svendsen. 2010. Nitrogen and phosphorus transport in runoff from compost berms on a simulated military training landscape. Waste Management & Research 29 (2): 188-196.

Olivella, M.A., M. Sole, R. Gorchs, C. Lao and F.X.C. D. Heras. 2011. Geochemical characterization of a spanish leonardite coal. Archives of Mining Sciences 56(4): 789–804.

Pochadom, S., S. Khaokaew, P. Sooksamiti, K. Jutamanee and G. Landrot. 2013. Chemical Characterizations of Leonardite from Mae Moh Mine for Agricultural Applications, pp.243-249 In The 51st Kasetsart University Annual Conference, Bangkok, Thailand.

Ratanaprommanee, C., K. Chinachanta, F. Chaiwan and A. Shutsrirung. 2016. Chemical characterization of leonardite and its potential use as soil conditioner and plant growth enhancement. Asia-Pacific Journal of Science and Technology 22(4): 1-10.

Rodriguez, R.R., N.T. Basta, S.W. Casteel, F.P. Armstrong and D.C. Ward. 2003. Chemical extraction methods to assess bioavailable arsenic in soil and solid media. Journal of Environmental Quality 32:876–884.

Sharpely, A. and B., Moyer. 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. Journal of Environmental Quality 29(6): 1462-1469.

Simandl, G.J., J. Simandl and P.B. Aylen. 2001. Leonardite-type material at red lake diatomite deposit, Kamloops area, BC, pp.371-378. In Geological Fieldwork 2000: A Summary of Field Activities and Research. Ministry of Energy and Mines.

Zhang, M, Z. He, A. Zhao, H. Zhang, D.M. Endale and H.H. Schomberg. 2011. Water-extractable soil organic carbon and nitrogen affected by tillage and manure application. Soil Science 176 (6): 307-312.