

การตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นองค์ประกอบ

Fixation and Release of Ammonium (NH_4^+) in Soils Containing 2:1 Clay Minerals

ทิมทอง ดรุณสนธยา^{*}, อาภัสนันท์ สุดเจริญ และ วิทยา จินดาลuang
Timtong Darunsontaya^{*}, Apatsanun Sudcharoen and Wittaya Jindaluang

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
^{*}Corresponding author: Email: fagrttd@ku.ac.th

(Received: 1 August 2017; Accepted: 13 December 2017)

Abstract: Fixation and release of ammonium (NH_4^+) are the important processes influencing nitrogen availability in soils, particularly in soils containing 2:1 clay minerals, because of such clay minerals can fix ammonium in their interlayer sites. The objective of this study was to investigate soil factors affecting fixation and release of NH_4^+ in soils containing 2:1 clay minerals. The representative soils in this study were Takhli soil series (Tk), Ban Mi soil series (Bm) and Chong Khae soil series (Ck). Soil samples from plough layer (Ap horizon) were collected to determine exchangeable NH_4^+ and non-exchangeable NH_4^+ contents. Fixation and release of ammonium were studied by addition of 1,000 mg NH_4^+ /kg soil and incubated soil samples at field capacity for a week. The results showed that exchangeable NH_4^+ contents in these soils were very low (0.01-3.95 mg/kg) and non-exchangeable NH_4^+ contents ranged from 71.4 to 119.3 mg/kg. Fixation of NH_4^+ contents varied from 11 to 90 mg NH_4^+ /kg soil and release of NH_4^+ contents varied from 211 to 703 mg NH_4^+ /kg soil. Ammonium release showed good fit with parabolic diffusion ($R^2 = 0.85-0.97$) and Elovich equation ($R^2 = 0.93-0.99$). These results indicated that release of NH_4^+ in these soils was diffusion controlled-process and may occur on heterogeneous surfaces i.e. exchange site and interlayer site of 2:1 clay minerals, including adsorption sites of organic matter. Soil factors affecting adsorption, fixation and release of NH_4^+ in these soils were extractable Ca, extractable Mg and organic matter content. Ammonium adsorption tended to decrease with increasing extractable Ca content. Whereas ammonium fixation tended to decrease with increasing extractable Mg and organic matter contents and vice-versa for ammonium released.

Keywords: Exchangeable NH_4^+ , non-exchangeable NH_4^+ , released kinetic, smectite

บทคัดย่อ: การตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจนในดิน โดยเฉพาะดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากแร่ดินเหนียวดังกล่าวสามารถตรึงแอมโมเนียมไว้ในหีบของโครงสร้างได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยทางดินที่ส่งผลต่อการตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นองค์ประกอบ ชุดดินตัวแทนสำหรับการศึกษา ได้แก่ ชุดดินตาสี ชุดดินบ้านหมี่ และชุดดินช่องแค เก็บตัวอย่างดินจากชั้นไทรพอร์มาวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้และรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ ศึกษาการตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดินโดยการเติม 1,000 มิลลิกรัม NH_4^+ /กิโลกรัมดิน และบ่มตัวอย่างดินที่ระดับความจุความชื้นสนามเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่า ชุดดินที่ใช้ศึกษาทั้งหมดมีปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในระดับต่ำมาก (0.01-3.95 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) และดินมีปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้อยู่ในพิสัย 71.4-119.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ปริมาณการตรึงแอมโมเนียมในดินผันแปรตั้งแต่ 11-90 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และการปลดปล่อยแอมโมเนียมผันแปรตั้งแต่ 211-703 มิลลิกรัม/กิโลกรัม การปลดปล่อยแอมโมเนียมสามารถอธิบายได้ดีด้วยสมการ parabolic ($R^2 = 0.85-0.97$) และ Elovich ($R^2 = 0.93-0.99$) แสดงให้เห็นว่าลักษณะการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดินที่ทำการศึกษาเกิดจากกระบวนการแพร่ และอาจเกิดการปลดปล่อยจากผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอจากพื้นผิวภายนอกและพื้นที่ผิวภายในของแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ตลอดจนพื้นที่ผิวดูดซับของอินทรีย์วัตถุ ปัจจัยทางดินที่ส่งผลต่อลักษณะการดูดซับ การตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดิน ได้แก่ ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ และปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน โดยปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมที่สกัดได้ และการตรึงแอมโมเนียมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของแมกนีเซียมที่สกัดได้และปริมาณอินทรีย์วัตถุ ส่วนปริมาณการปลดปล่อยแอมโมเนียมจะแปรผกผันกับปริมาณการตรึงแอมโมเนียม

คำสำคัญ: แอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ จลนศาสตร์การปลดปล่อย แร่สเมกไทต์

คำนำ

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช และส่งผลต่อการให้ผลผลิต ตลอดจนองค์ประกอบทางเคมีของพืช (อุไรวรรณ และจิรัชศักดิ์, 2559) โดยแอมโมเนียม (ammonium; NH_4^+) เป็นไนโตรเจนรูปหนึ่งซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักและมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืช การทำการเกษตรโดยทั่วไปมักมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม เช่น ปุ๋ยยูเรีย ซึ่งเมื่อดินมีความชื้นเพียงพอธาตุไนโตรเจนในปุ๋ยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป NH_4^+ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพของดินนาซึ่งจะมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปของ NH_4^+ มากกว่าไนโตรเจนในรูปของไนเตรต (NO_3^-) เนื่องจากดินในสภาพดังกล่าวจะเกิดกระบวนการ denitrification ของ NO_3^- และเกิดการสูญเสียธาตุปุ๋ยไนโตรเจนไปในรูปของก๊าซ (N_2) (ทัศนีย์, 2550) โดยทั่วไป NH_4^+ จะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของคอลลอยด์ดิน และอยู่ในรูปแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนได้

(exchangeable NH_4^+) เช่นเดียวกับแคตไอออน (cations) อื่น ๆ ซึ่งเป็นรูปที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที อย่างไรก็ตาม NH_4^+ บางส่วนในดินจะถูกตรึงเข้าไปอยู่ภายในหีบ (interlayer) ของโครงสร้างแร่ดินเหนียว และเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (non-exchangeable NH_4^+) (Nieder *et al.*, 2011) โดยมีการศึกษาพบว่า กลไกการถูกตรึงของ NH_4^+ โดยแร่ดินเหนียวนั้นจะมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องคล้ายกันกับกระบวนการตรึงโพแทสเซียม (K^+) เนื่องจาก NH_4^+ มีขนาดของโมเลกุลที่ถูกล้อมรอบด้วยน้ำ (hydrated size) ใกล้เคียงกับ K^+ จึงทำให้ NH_4^+ สามารถถูกตรึงในหีบระหว่างชั้น (interlayer) ของแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 (เช่น แร่เวอร์มิคิวไลต์ สเมกไทต์ และซิลไลต์) ได้ เช่นเดียวกับ K^+ (Nommik, 1965) โดยทั่วไปแอมโมเนียมในรูปที่ถูกตรึงหรือแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้นั้น เป็นรูปที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ซึ่งมีความสามารถในการตรึงแอมโมเนียมนั้น อาจช่วยลดการ

สูญเสียแอมโมเนียมไปจากดินโดยกระบวนการชะละลาย (leaching) หรือลดการสูญเสียไนโตรเจนไปในรูปของก๊าซ (volatilization) และช่วยลดการปนเปื้อนของแอมโมเนียมในแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดน้ำเน่าเสีย (eutrophication) (Buss *et al.*, 2004; Du *et al.* 2005) นอกจากนี้ แอมโมเนียมในรูปที่ถูกตรึงหรือแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้นั้นอาจถูกปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชในภายหลังได้เช่นกัน (Schneiders and Scherer, 1998) ทั้งนี้ ลักษณะการตรึงแอมโมเนียมในดินแต่ละบริเวณนั้นมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสมบัติของดิน เช่น ชนิดของแร่ดินเหนียว (clay mineral types) เนื้อดิน (soil texture) ความเข้มข้นของ K^+ ในสารละลายดิน (K concentration in soil solution) ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity) และ ศักย์รีดอกซ์ของดิน (soil redox potential) เป็นต้น (Nieder *et al.*, 2011) ซึ่งในดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นองค์ประกอบนั้น นอกจากชนิดของแร่ดินเหนียว องค์ประกอบที่ส่งผลต่อการตรึงแอมโมเนียมแล้ว สมบัติทางประจุของแร่ยังมีอิทธิพลต่อการตรึงแอมโมเนียมในดินด้วย (Coulombe *et al.*, 1996) จะเห็นได้ว่ากระบวนการตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมของดินนั้นอาจช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุไนโตรเจนให้แก่พืช รวมถึงช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนของธาตุปุ๋ยไนโตรเจนต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น การศึกษาลักษณะการตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมของดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นองค์ประกอบ จะทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยทางดินที่ส่งผลต่อการตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียม และเป็นประโยชน์ต่อการจัดการปุ๋ยไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมในดินที่ทำการศึกษาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ เคมีและแร่วิทยาของดิน

ดินที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาซึ่งมีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ 1) ชุดดินตาคลี (Tk) ซึ่งเป็นดินที่ดอนที่ใช้ปลูกข้าวโพด 2) ชุดดินบ้านหมี่ (Bm) และ 3) ชุดดินช่องแค (Ck) เป็นดินที่ลุ่มที่ใช้ในการปลูกข้าว โดยสถานที่เก็บตัวอย่างดินแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 เก็บตัวอย่างชั้นดินบนที่ระดับความลึกชั้นไคพรวน (Ap horizon) ทำการวิเคราะห์สมบัติดินทางฟิสิกส์ และเคมีตามวิธีมาตรฐาน (National Soil Survey Center, 1996) ประกอบด้วย การแจกกระจายขนาดอนุภาคดิน โดยวิธี pipette (Gee and Bauder, 1986) พีเอชดิน (soil pH) อัตราส่วนดินต่อน้ำ เท่ากับ 1:1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter) โดยวิธี wet-oxidation (Nelson and Sommers, 1996) ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total N) โดยวิธี Kjeldahl method (National Soil Survey Center, 1996) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) โดยวิธี Bray II (Bray and Kurtz, 1945) ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนและปริมาณเบสที่สกัดได้ ด้วย 1M NH_4OAc pH 7.0 (Thomas, 1982) วิเคราะห์ชนิดของแร่องค์ประกอบในอนุภาคขนาดดินเหนียว และอนุภาคขนาดทรายแป้ง ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) (Whitting, 1965)

การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมในดิน

ทำการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable NH_4^+) โดยใช้ ดิน 3 กรัม เติม 2M KCl 30 มิลลิลิตร นำไปเขย่า 1 ชั่วโมง จากนั้น กรองและเก็บสารละลายใส่ไปวัดปริมาณแอมโมเนียมโดย

Table 1. Soil sampling sites

Soil series	Location
Takhli (Tk)	Nakhon Sawan Field Crops Research Center, Suk Samran subdistrict, Tak Fa district, Nakhon Sawan province
Ban Mi (Bm)	Nong Don subdistrict, Nong Don district, Saraburi province
Chong Khae (Ck)	Roeng Rang subdistrict, Sao Hai district, Saraburi province

colorimetric method ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542) ปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้วิเคราะห์โดยนำตะกอนตัวอย่างที่เหลื้อมาเติม 1 M HCl 20 มิลลิลิตร และนำไปต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้น กรองและเก็บสารละลายไปวัดปริมาณแอมโมเนียมโดย colorimetric method (Ranjbar and Jalali, 2014)

การศึกษาการตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมของดิน

ศึกษาการตรึงแอมโมเนียม โดยบ่มตัวอย่างดินแต่ละชุดดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ด้วย NH_4Cl อัตรา 1,000 มิลลิกรัม NH_4^+ /กิโลกรัมดิน ตัวอย่างชุดดินละ 2 ข้ว ทำการบ่มเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ที่ระดับความจุความชื้นสนาม (field capacity; FC) เมื่อครบ 1 สัปดาห์ นำตัวอย่างดินไปผึ่งให้แห้งจากนั้นนำตัวอย่างดินที่แห้งแล้วไปวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ตามวิธีการข้างต้น

ศึกษาการปลดปล่อยแอมโมเนียม โดยนำตัวอย่างดินหลังการบ่มที่แห้งแล้ว จำนวน 1 กรัม ตัวอย่างชุดดินละ 2 ข้ว นำมาเติม 0.01M CaCl_2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 15 นาที นำไป centrifuge และแยกเก็บสารละลายไว้ ส่วนตัวอย่างตะกอนดินที่เหลือนำไปทำการเขย่าด้วย 0.01M CaCl_2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เช่นเดิมจำนวน 10 ครั้ง แบบต่อเนื่อง (sequential extraction) ครั้งละ 15 นาที ดังนั้น จะได้ปริมาณแอมโมเนียมสะสม (cumulative content) ที่ปลดปล่อยออกมาที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120,

135 และ 150 นาทีนำสารละลายทั้งหมดไปวัดปริมาณแอมโมเนียม โดย colorimetric method จากนั้นนำค่าที่ได้มาอธิบายลักษณะการปลดปล่อยแอมโมเนียมด้วยสมการที่ใช้อธิบายจลนศาสตร์การปลดปล่อยธาตุอาหารในดิน (Havlin and Westfall, 1985; Jardine and Sparks, 1984; Sparks *et al.*, 1980) ได้แก่

- Parabolic diffusion model :

$$q = a + bt^{1/2} \quad (\text{Eq.1})$$

- Elovich equation :

$$q = a + b \ln(t) \quad (\text{Eq.2})$$

- Power function :

$$\ln(q) = \ln(a) + b \ln(t) \quad (\text{Eq.3})$$

โดย q หมายถึง ปริมาณแอมโมเนียมที่ปลดปล่อย ณ เวลา t และคำนวณหาอัตราเร็วและปริมาณการปลดปล่อย จากค่าความชัน (slope) และจุดตัดแกนตั้ง (intercept) ที่ได้จากสมการตามลำดับ

ผลการทดลอง

สมบัติทางฟิสิกส์ เคมี แร่วิทยาของดิน

ผลการวิเคราะห์การแจกกระจายขนาดอนุภาคดิน (ตารางที่ 2) พบว่า ชุดดินตาคลี (Tk) มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง ชุดดินบ้านหมี่ (Bm) มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว และชุดดินช่องแค (Ck) มีเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน พบว่า ดินที่ใช้ทำการศึกษามีค่าพีเอชเป็นกรดปานกลางถึงด่างปานกลาง ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในพิสัย 30.5-58.8 เซนติโมล/กิโลกรัม โดยมีค่าอยู่ในระดับสูงมาก ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง (16-27 กรัม/กิโลกรัม) ไนโตรเจนรวม

Table 2. Some physicochemical properties of studied soils

Soil series	Sand	Silt	Clay	Texture	pH	OM	TN	Avail. P	CEC	Extr. Ca	Extr. Mg	Extr. Na	Extr. K
	(-----%------)					(---g/kg---)		mg/kg	(cmol _e /kg)	(-----g/kg-----)			
Tk	15.4	51.6	33.0	SiCL	8.2	16	0.77	39.3	41.8	13.5	0.32	0.08	0.18
Bm	4.1	34.2	61.7	C	6.9	30	0.90	16.2	58.8	11.6	0.74	0.27	0.11
Ck	5.5	45.3	49.2	SiC	5.9	27	0.98	3.4	30.5	4.3	0.58	0.29	0.14

SiCL = silty clay loam; C = clay; SiC = silty clay; TN=Total nitrogen; OM=organic matter; Avail. P = available P; CEC= cation exchange capacity; Extr.= extractable

ในทุกชุดดิน มีค่าอยู่ในระดับต่ำมาก (0.77-0.98 กรัม/กิโลกรัม) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มีค่าอยู่ในระดับต่ำถึงสูง (3.4-39.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ปริมาณแคลเซียมที่สกัดได้มีค่าอยู่ในระดับสูงมาก (21.6-67.4 เซนติโมล/กิโลกรัม) ปริมาณแมกนีเซียมที่สกัดได้มีค่าอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (2.9-6.3 เซนติโมล/กิโลกรัม) ปริมาณโซเดียมที่สกัดได้มีค่าอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมาก (0.33-1.25 เซนติโมล/กิโลกรัม) และปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้มีค่าอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (0.28-0.46 เซนติโมล/กิโลกรัม)

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแร่วิทยาของดินในอนุภาคขนาดดินเหนียว (ตารางที่ 3) พบว่า ดินที่ใช้ทำการศึกษามีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 คือ แร่สเมกไทต์ (smectite) เป็นแร่องค์ประกอบหลัก และพบแร่ควอตซ์ในปริมาณเล็กน้อย ชุดดินบ้านหมี่พบแร่ดินเหนียวประเภท 1:1 คือ แร่เคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบในปริมาณเล็กน้อย ส่วนชุดดินช่องแคพบแร่ดินเหนียวประเภทอื่น ๆ นอกจากแร่สเมกไทต์ คือ แร่อีไลต์ และแร่เคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบในปริมาณเล็กน้อยถึงน้อย ตามลำดับ ดังนั้นชุดดินช่องแคจึงมีปริมาณสัมพัทธ์ของแร่สเมกไทต์น้อยที่สุด แต่มีปริมาณสัมพัทธ์ของแร่เคโอลิไนต์สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดดินอื่น ๆ ส่วนผลการศึกษาแร่องค์ประกอบในอนุภาคขนาดทรายแป้ง พบว่า ดินที่ใช้ทำการศึกษามิมีแร่ควอตซ์เป็นแร่องค์ประกอบหลัก

นอกจากนี้ ชุดดินตาคลีพบแร่แคลไซต์ในปริมาณมาก ส่วนดินชุดดินบ้านหมี่ และชุดดินช่องแค พบแร่ดินเหนียวในกลุ่ม 7 อังสตรอม และกลุ่ม 10 อังสตรอม รวมถึงพบแร่แอลไบต์ (albite) และแร่อนาเทส (anatase) เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณเล็กน้อย

ปริมาณแอมโมเนียมในรูปต่าง ๆ ของดิน

ปริมาณแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable NH_4^+) ของตัวอย่างดินก่อนบ่ม (control) ที่ทำการศึกษามีค่าอยู่ในพิสัย 0.01-3.95 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ตารางที่ 4) ซึ่งมีค่าอยู่ในระดับต่ำมาก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนรวมของดินที่มีค่าอยู่ในระดับต่ำมาก ส่วนปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (non-exchangeable NH_4^+) มีค่าอยู่ในพิสัย 71.4-119.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่ารูปที่แลกเปลี่ยนได้อย่างชัดเจน โดยชุดดินช่องแคมีปริมาณแอมโมเนียมทั้งรูปที่แลกเปลี่ยนได้และแลกเปลี่ยนไม่ได้มากกว่าชุดดินอื่น ๆ

ผลการศึกษาปริมาณแอมโมเนียมในตัวอย่างดินหลังบ่ม (treated soil) พบว่า ปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้และรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างดินก่อนบ่ม (control) ในทุกชุดดิน (ภาพที่ 1) แสดงให้เห็นว่า แอมโมเนียมที่ใส่ลงไปไนดิน ส่วนหนึ่งจะถูกดูดซับอยู่ที่บริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยน (exchange site)

Table 3. Semi-quantitative minerals of clay and silt fractions for investigated soils

Soil series	Clay fraction				Silt fraction					
	Smec	Ill	Kao	Qtz	Qtz	7 Å clay	10 Å clay	Cal	Ab	An
Tk	xxxx	-	-	x	xxx	-	-	xxx	-	-
Bm	xxxx	-	tr	tr	xxxx	-	tr	-	-	tr
Ck	xxx	tr	x	tr	xxxx	tr	tr	-	-tr	-

Smec= smectite; Ill = illite; Kao = kaolinite; Qtz = quartz; Cal = calcite; Ab = albite; An = anatase

tr= trace (<5%), x= small (5-20%), xx= moderate (20-40%), xxx= large (40-60%), xxxx= dominant (>60%)

Table 4. Exchangeable NH_4^+ and non-exchangeable NH_4^+ contents in control soils

Soil series	Exchangeable NH_4^+ (-----mg/kg-----)	Non-exchangeable NH_4^+ (-----mg/kg-----)
Tk	0.83	71.4
Bm	0.01	73.8
Ck	3.95	119.3

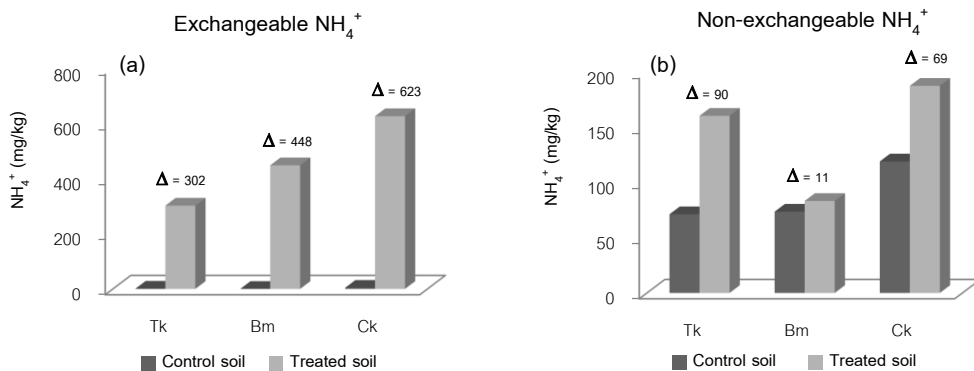


Figure 1. Exchangeable NH_4^+ (a) and non-exchangeable NH_4^+ contents (b) in control and treated soil samples

และบางส่วนถูกตรึงอยู่ภายในหีบ (interlayer) ของแร่ดินเหนียว ซึ่งทั้ง 3 ชุดดินมีปริมาณการดูดซับและการตรึงแอมโมเนียมแตกต่างกันอย่างชัดเจน

ปริมาณแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในตัวอย่างดินหลังบ่ม มีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างดินก่อนบ่มอยู่ในพิสัย 302-623 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ภาพที่ 1a) โดยชุดดินช่องแคมีปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดดินอื่น ๆ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (non-exchangeable NH_4^+) ที่บ่งบอกถึงปริมาณแอมโมเนียมที่ถูกตรึงในหีบของแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 พบว่า ชุดดินตาคลีมีปริมาณแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้เพิ่มขึ้นสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 90 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินก่อนบ่ม (ภาพที่ 1b) และชุดดินบ้านหมี่มีปริมาณแอมโมเนียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้เพิ่มขึ้นต่ำที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 11 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินก่อนบ่ม อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าในช่วงระยะการทดลองบ่มดิน 1 สัปดาห์ แอมโมเนียมที่ใส่ลงไป ในดินอาจถูกดูดซับอยู่ที่บริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนมากกว่าถูกตรึงอยู่ภายในหีบของแร่ดินเหนียว

ลักษณะการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดิน

เมื่อทำการสกัดแอมโมเนียมในดินที่ทำการศึกษาน้ำยาสกัด 0.01 M CaCl_2 พบว่า ชุดดินบ้านหมี่สามารถสกัดแอมโมเนียมได้สูงสุด และสามารถสกัดได้จำนวน 8 ครั้ง (105 นาที) ส่วนชุดดินช่องแค และ

ชุดดินตาคลี สามารถสกัดแอมโมเนียมได้เพียง 6 ครั้ง (90 นาที) และ 5 ครั้ง (75 นาที) ตามลำดับ ผลการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยแอมโมเนียมสะสมพบว่า ชุดดินบ้านหมี่มีการปลดปล่อยแอมโมเนียมสูงที่สุด คือ 703 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ภาพที่ 2a) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณแอมโมเนียมรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ในตัวอย่างดินหลังบ่มของชุดดินบ้านหมี่ที่มีการตรึงแอมโมเนียมไว้ได้ต่ำที่สุด (ภาพที่ 1b) ในขณะที่ชุดดินตาคลีมีการปลดปล่อยแอมโมเนียมต่ำที่สุด คือ 211 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เมื่อนำข้อมูลปริมาณการปลดปล่อยแอมโมเนียมมาอธิบายลักษณะการปลดปล่อยด้วยสมการทั้ง 3 สมการ พบว่า ทั้ง 3 สมการสามารถอธิบายลักษณะการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดินที่ทำการศึกษาได้ดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสมการ parabolic diffusion, สมการ Elovich equation และ สมการ power function อยู่ในพิสัย 0.85-0.97, 0.93-0.97 และ 0.89-0.98 ตามลำดับ (ภาพที่ 2b-2d) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าตัวแปรจากสมการต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความชัน (อัตราเร็วในการปลดปล่อย) และจุดตัดแกนตั้ง (ปริมาณในการปลดปล่อย) จากสมการทั้ง 3 สมการพบว่า ชุดดินบ้านหมี่มีค่าความชันสูงกว่าชุดดินตาคลีและชุดดินช่องแคในสมการ parabolic diffusion และ Elovich equation แต่เมื่อพิจารณาค่าความชันของสมการ power function พบว่า ชุดดินบ้านหมี่มีค่าความชันน้อยกว่าชุดดินตาคลี ส่วนค่าจุดตัดแกนตั้งนั้น ชุดดินบ้านหมี่มีค่าสูงกว่าชุดดินอื่น ๆ ในทุกสมการ (ตารางที่ 5)

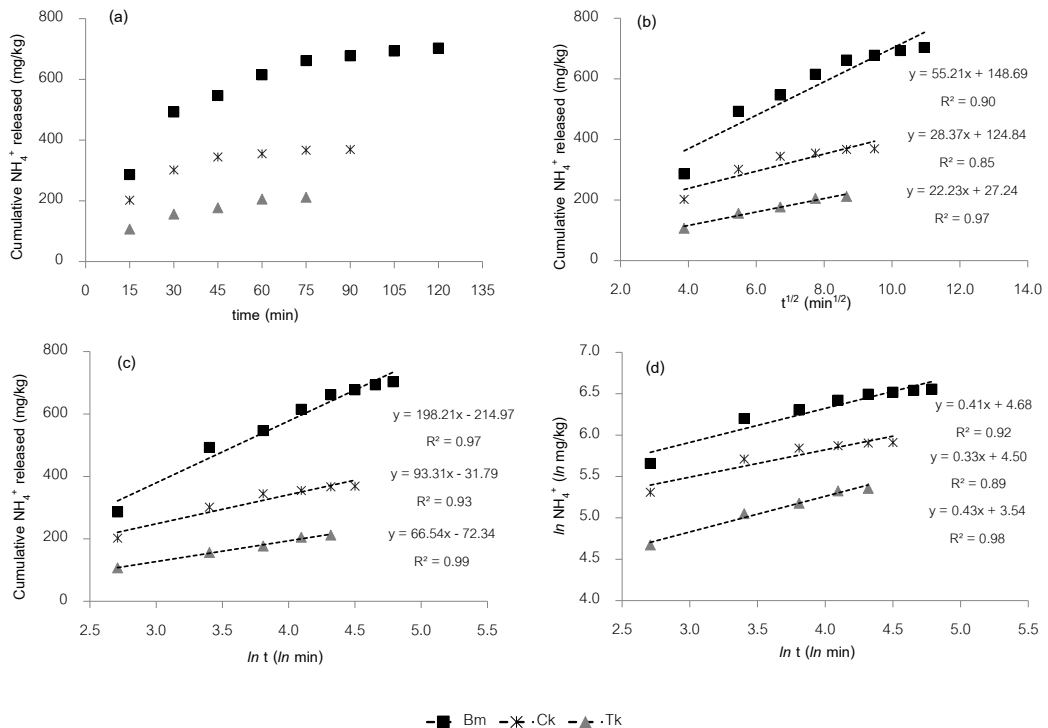


Figure 2. Ammonium released characteristics (a) and data fitted to models describing NH_4^+ released (b) parabolic diffusion model (c) Elovich equation and (d) power function

Table 5. Parameters of models used to describe the released kinetic of NH_4^+ in studied soils

Soil series	Parabolic diffusion			Elovich equation			Power function		
	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2
Tk	22.2	27.2	0.97	66.5	72.3	0.99	0.43	3.54	0.98
Bm	55.2	149	0.90	198	215	0.97	0.41	4.68	0.92
Ck	28.4	125	0.85	93.3	31.8	0.93	0.33	4.50	0.89

วิจารณ์

สมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และแร่วิทยาของดิน

ชุดดินที่ใช้ในการศึกษา สามารถจำแนกออกเป็นดินในอันดับ Vertisols และ Mollisols (Soil Survey Staff, 2014) โดยชุดดินบ้านหมี่ (Bm) และชุดดินช่องแค (Ck) เป็นดินในอันดับ Vertisols ส่วนชุดดินตาคลี (Tk) เป็นดินในอันดับ Mollisols ดินที่ใช้ทำการศึกษานี้ทุกชุดดินมีวัตถุต้นกำเนิดจากตะกอนน้ำพา (alluvium) จากหินเนื้อละเอียด ได้แก่ หินปูน และหินมาร์ล จึงทำให้ดินมีเนื้อดินค่อนข้างละเอียด โดยชุดดินตาคลีซึ่งจัดเป็น

ดินเนื้อปูน (calcareous soil) มีค่าพีเอชเป็นด่างปานกลางและสูงกว่าชุดดินอื่นๆ ชุดดินที่ทำการศึกษานี้ทั้งหมดมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity; CEC) อยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก สอดคล้องกับลักษณะของเนื้อดินที่มีเนื้อดินละเอียด แร่องค์ประกอบหลักเป็นแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 คือ แร่ สเมกไทต์ และมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง (ตารางที่ 2) อย่างไรก็ตาม ค่า CEC ของชุดดินช่องแคมีค่าต่ำกว่าชุดดินอื่นๆ เนื่องจากได้รับอิทธิพลมาจากสัดส่วนปริมาณสัมพัทธ์ของแร่สเมกไทต์ที่ต่ำกว่าชุดดินอื่นๆ และมีสัดส่วนปริมาณสัมพัทธ์ของแร่เคลไลไนต์

ที่สูงกว่าชุดดินอื่น ๆ ปริมาณเบสที่สกัดได้พบว่า ธาตุแคลเซียม (Ca^{2+}) และ แมกนีเซียม (Mg^{2+}) เป็นแคตไอออนเด่นของดินที่ทำการศึกษานี้ ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะทั่วไปของดินในอันดับ Vertisols และ Mollisols (Buol *et al.*, 2011) ส่วนปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ของชุดดินบ้านหมี่ และชุดดินช่องแค มีค่าอยู่ในระดับต่ำมากถึงต่ำ ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าดินดังกล่าวจะมีเนื้อดินเป็นดินเนื้อละเอียด และมีค่า CEC สูง แต่อาจพบปัญหาการขาดธาตุโพแทสเซียมได้ (สุภัทราและคณะ, 2558)

การตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมในดิน

เมื่อพิจารณาการดูดซับแอมโมเนียมที่พื้นผิวแลกเปลี่ยน พบว่า ชุดดินช่องแคมีปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมสูงกว่าชุดดินอื่น ๆ (ภาพที่ 1a) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากค่า CEC ของชุดดินช่องแค พบว่า ชุดดินช่องแคมีค่า CEC ต่ำกว่าชุดดินอื่น ๆ (ตารางที่ 2) แต่กลับสามารถดูดซับแอมโมเนียมได้สูงกว่าชุดดินอื่น ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณ Ca^{2+} ที่สกัดได้ในชุดดินช่องแคมีค่าต่ำ จึงทำให้เกิดการแข่งขันของแคตไอออนระหว่าง NH_4^+ และ Ca^{2+} น้อยกว่าชุดดินตาคลีและชุดดินบ้านหมี่ซึ่งมีปริมาณ Ca^{2+} ที่สกัดได้สูงกว่า ส่วนชุดดินบ้านหมี่และชุดดินช่องแคมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวสูงกว่าชุดดินตาคลี จึงสามารถดูดซับแอมโมเนียมได้สูงกว่าชุดดินตาคลี (ตารางที่ 1) นอกจากนี้ การแลกเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนของแร่ดินเหนียวจะขึ้นอยู่กับอำนาจในการแทนที่ (replacing power) ของแคตไอออนต่าง ๆ ในดิน ซึ่งในกรณีของแร่ดินเหนียวสเมกไทต์นั้น Ca^{2+} จะมีอำนาจในการแทนที่มากกว่าแคตไอออนตัวอื่น ๆ (Nommik and Vahtras, 1982) จึงอาจทำให้ Ca^{2+} เกิดการดูดซับที่บริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนได้สูงและทำให้ดินมีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนสำหรับการดูดซับ NH_4^+ ได้น้อยลง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chen (1997) ที่รายงานว่าในดินที่มีปริมาณ Ca^{2+} สูง ดินจะมีความพอใจเลือก (affinity) ดูดซับ Ca^{2+} มากกว่า NH_4^+ เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Feigenbaum *et al.* (1990) ที่รายงานว่าเมื่อดินมีปริมาณ Ca^{2+} และ Mg^{2+} เพิ่มขึ้น K^+ บริเวณพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนจะ

ถูกแลกเปลี่ยนโดย Ca^{2+} และ Mg^{2+} ได้ง่ายขึ้น ซึ่งอาจให้ผลในลักษณะเช่นเดียวกันกับ NH_4^+ ในดินที่ทำการศึกษานี้ เนื่องจาก K^+ และ NH_4^+ มีพฤติกรรมทางประจุและขนาดของไอออนที่ถูกล้อมรอบด้วยน้ำที่ใกล้เคียงกัน

ผลการศึกษาลักษณะการตรึงและการปลดปล่อยแอมโมเนียมของดิน พบว่า ชุดดินบ้านหมี่สามารถตรึงแอมโมเนียมได้ดีที่สุด (ภาพที่ 1b) และมีการปลดปล่อยแอมโมเนียมได้ในปริมาณที่สูงกว่าชุดดินอื่น ๆ (ภาพที่ 2a) ในขณะที่ชุดดินตาคลีมีปริมาณการตรึงแอมโมเนียมได้สูงที่สุด และมีปริมาณการปลดปล่อยแอมโมเนียมได้ต่ำที่สุด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ชุดดินบ้านหมี่ซึ่งมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว และมีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวรวมถึงค่า CEC สูงที่สุด แต่กลับมีความสามารถในการตรึงแอมโมเนียมได้ต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะทางประจุของแร่ดินเหนียวในชุดดินดังกล่าวมีความจำเพาะเจาะจงกับแคตไอออนชนิดอื่นหรือสารประกอบอื่น ๆ มากกว่าแอมโมเนียม โดยผลการศึกษาพบว่าปริมาณการตรึงแอมโมเนียมมีแนวโน้มแปรผกผันกับปริมาณ Mg^{2+} ที่สกัดได้ และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (ตารางที่ 2) จึงมีความเป็นไปได้ว่าดินที่มีปริมาณ Mg^{2+} สูงนั้น Mg^{2+} อาจเกิดการแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนที่อยู่ในหีบของแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ได้ ซึ่งโดยทั่วไป Mg^{2+} จะมีขนาดไอออนที่ถูกล้อมรอบด้วยน้ำใหญ่กว่า NH_4^+ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ทำให้ Mg^{2+} สามารถแลกเปลี่ยนกับ NH_4^+ หรือ K^+ ที่อยู่ในหีบของแร่ดินเหนียวได้ และส่งผลให้ NH_4^+ ในหีบของแร่ดินเหนียวค่อย ๆ ถูกปลดปล่อยออกมา (Nommik and Vahtras, 1982) นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาพบว่าอินทรีย์วัตถุในดินอาจเกิดการแย่งที่ NH_4^+ ในการดูดซับเข้าไปภายในบริเวณหีบของโครงสร้างแร่ดินเหนียวโดยมีรายงานว่า การเพิ่มสารฮิวมิก (humic substances) ลงไปในดิน ส่งผลให้ประจุและพื้นที่ผิวของดินที่มีแร่สเมกไทต์เป็นองค์ประกอบมีค่าลดลง จึงทำให้ดินมีการตรึง NH_4^+ ที่ลดลงด้วย (Zhang *et al.*, 2013) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Martin-Martinez and Perez-Rodriguez (1969) ที่ศึกษาพบว่าสารฮิวมิกสามารถถูกดูดซับเข้าไปภายในหีบของโครงสร้างแร่ดินเหนียวสเมกไทต์ได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารฮิวมิกที่มีมวลโมเลกุลต่ำ

นอกจากนี้ Perez-Rodriguez *et al.* (1977) ได้รายงานว่ สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับในบริเวณหลิขของโครงสร้างแร่ดินเหนียวมักเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายโปรตีน (Protein-like) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jindaluang *et al.* (2013) ที่ศึกษาองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในลุ่มดินเนื้อละเอียดที่มีแร่สเมกไทต์เป็นองค์ประกอบในประเทศไทย และพบว่าดินลุ่มดังกล่าวมีสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) อยู่ในลุ่มเอไมด์ (amide; $-NH_2$) เป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีความเป็นไปได้ว่า สารอินทรีย์ดังกล่าว อาจถูกดูดซับอยู่ภายในหลิขของโครงสร้างแร่สเมกไทต์ในดินที่ทำการศึกษ ทำให NH_4^+ ในดินถูกตรึงลดลงและเกิดการปลดปล่อยมากขึ้น ดังนั้น หากพิจารณาปริมาณการตรึงแอมโมเนียมโดยแร่ดินเหนียวและการดูดซับแอมโมเนียมไว้ที่ผิวคอลลอยด์ของดินที่ทำการศึกษา ชูดดินตาคลึงจะมีปริมาณการดูดซับและการตรึงแอมโมเนียมไว้ได้น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชูดดินบ้านหมี่และชูดดินชองแค ดังนั้น การสูญเสียแอมโมเนียมจากกระบวนการชะลายเมื่อมีการใส่ปุ๋ยแอมโมเนียม อาจเกิดได้มากในชูดดินตาคลึงมากกว่าชูดดินอื่น ๆ

จลนศาสตร์การปลดปล่อยแอมโมเนียมในดิน

ลักษณะการปลดปล่อย NH_4^+ ที่อธิบายได้ดีด้วยสมการ parabolic diffusion แสดงให้เห็นว่า ดินที่ทำการศึกษามีลักษณะการปลดปล่อย NH_4^+ โดยกระบวนการแพร่ (diffusion controlled-process) โดยมีการศึกษาพบว่ากระบวนการแพร่เป็นกระบวนการเคลื่อนที่หลักของ NH_4^+ ในดิน (Chen, 1997) ซึ่งการปลดปล่อย NH_4^+ ในดินที่ทำการศึกษาอาจเกิดการปลดปล่อยจากหลิขของโครงสร้างแร่ดินเหนียว ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการปลดปล่อย K^+ จากโครงสร้างของแร่ซิลิเกต ที่สามารถอธิบายการปลดปล่อยได้ดีด้วยสมการ parabolic diffusion (Feigenbaum *et al.*, 1981) ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่า NH_4^+ อาจถูกปลดปล่อยออกมาจากหลิขของโครงสร้างแร่ดินเหนียวเช่นเดียวกัน ส่วนสมการ Elovich equation นั้นแสดงถึงลักษณะการแพร่ของแคตไอออนที่เกิดบนผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous surfaces) ดังนั้น การปลดปล่อยแอมโมเนียมในดินที่ทำการศึกษาอาจเกิดการปลดปล่อยจาก 2 พื้นผิวที่ดูดซับ ได้แก่ พื้นผิวแลกเปลี่ยน

ภายนอก (exchange site) และ จากบริเวณภายในหลิข (interlayer) ของโครงสร้างแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 สอดคล้องกับผลการศึกษาอื่น ๆ ที่รายงานว่ ลักษณะการปลดปล่อย NH_4^+ และ K^+ ในดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 เป็นองค์ประกอบ สามารถอธิบายได้ดีด้วยสมการ Elovich equation (Havlin and Westfall, 1985; Jalali, 2006; Ranjbar and Jalali, 2014) นอกจากนี้ ยังมีความเป็นไปได้ว่า การปลดปล่อย NH_4^+ จากกระบวนการแพร่ในดินที่ทำการศึกษาอาจเกิดการปลดปล่อยจากพื้นผิวตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นของผสม ได้แก่ ส่วนที่เป็นอินทรีย์สารหรืออินทรีย์วัตถุ และส่วนที่เป็นอนินทรีย์สารหรือแร่ดินเหนียว (Sparks, 2003) ดินที่ทำการศึกษา ยังสามารถอธิบายลักษณะการปลดปล่อยแอมโมเนียมได้ดีด้วยสมการ power function ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถใช้อธิบายลักษณะการปลดปล่อย NH_4^+ ภายในช่วงเวลาน้อย ๆ หรือช่วงต้นของการทดลอง (ช่วงต้นของปฏิกิริยาแบบ S-curve) และเป็นลักษณะการปลดปล่อยที่เกิดจากพื้นผิวตัวดูดซับที่มีความสม่ำเสมอ (homogeneous surfaces) (Aharoni and Suzin, 1982; Sparks, 2003) ลักษณะดังกล่าวอาจแสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกของการทดลองการปลดปล่อย NH_4^+ ในดินที่ทำการศึกษา อาจเกิดการปลดปล่อย NH_4^+ มาจากพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนของแร่ดินเหนียว หรือเกิดจากพื้นที่ผิวดูดซับของคอลลอยด์อินทรีย์วัตถุในดินเพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นกระบวนการปลดปล่อย NH_4^+ ในดินที่ทำการศึกษาจะเกิดการปลดปล่อย NH_4^+ ออกมาจากพื้นที่ผิวดูดซับของแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุพร้อม ๆ กัน

เมื่อพิจารณาค่าความชันหรืออัตราเร็วในการปลดปล่อยของสมการ parabolic diffusion และ Elovich equation พบว่า ชูดดินบ้านหมี่สามารถปลดปล่อยแอมโมเนียมได้เร็วกว่าชูดดินอื่น ๆ (ตารางที่ 5) อาจเนื่องมาจากชูดดินบ้านหมี่มีปริมาณ Mg^{2+} ที่สกัดได้ และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่าชูดดินอื่น ๆ ส่งผลให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนหรือการแทนที่ของ Mg^{2+} และคอลลอยด์ของสารอินทรีย์กับ NH_4^+ ได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชูดดินอื่น ๆ (Nommik and Vahtras, 1982; Zhang *et al.*, 2013) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าความชันจากสมการ power function พบว่า ในช่วงต้นของ

การทดลอง ชุดดินตาคีสามารถปลดปล่อยแอมโมเนียมได้เร็วกว่าชุดดินอื่น ๆ อาจเนื่องมาจาก โดยทั่วไปการปลดปล่อยแคตไอออนในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการมักจะเป็นการปลดปล่อยจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่น ๆ ในสารละลายดินได้ง่าย และตามด้วยกระบวนการปลดปล่อยจากพื้นผิวภายในหลีบของโครงสร้างแร่ดินเหนียวที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ช้ากว่า (Comans and Hockley, 1992; Jardine and Sparks, 1984) โดยมีรายงานว่าในดินที่มีแร่สเมกไทต์เป็นองค์ประกอบ การแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่บริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยน จะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภทอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบ (Sparks, 2003) ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ว่าในช่วงต้นของกระบวนการปลดปล่อย NH_4^+ จะเกิดจากการปลดปล่อยจากแอมโมเนียมในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งชุดดินตาคีมีปริมาณ Ca^{2+} ที่สกัดได้สูงกว่าชุดดินอื่น ๆ จึงอาจส่งผลให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนแคตไอออนระหว่าง Ca^{2+} และ NH_4^+ ที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วกว่าชุดดินอื่น ๆ (Nommik and Vahtras, 1982) นอกจากนี้ ค่าความชันของสมการ power function มีค่าต่ำกว่า 1 ในทุกชุดดินแสดงให้เห็นว่า ดินที่ทำการศึกษามีการปลดปล่อย NH_4^+ ลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น (Carey and Metherell, 2003; Nilawonk *et al.*, 2008)

สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ดินที่ทำการศึกษาถึงแม้จะมีเนื้อดินละเอียดและมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) สูง แต่ลักษณะการดูดซับกระบวนการตรึง และกระบวนการปลดปล่อย NH_4^+ ในดินมีความผันแปรไปตามปัจจัยทางดิน ได้แก่ ปริมาณ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ตลอดจนปริมาณและองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในดิน ดังนั้น การจัดการปุ๋ยไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมในดินที่ทำการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีปริมาณ Ca^{2+} และ Mg^{2+} สูง ควรพิจารณาถึงอัตราการใส่ปุ๋ยแอมโมเนียมในแต่ละครั้ง เนื่องจาก NH_4^+ ที่ใส่ลงไปดินอาจถูกแทนที่ด้วย Ca^{2+} และ Mg^{2+} ได้ง่าย จึงทำให้มีความเสี่ยงต่อการสูญเสีย NH_4^+ จากกระบวนการ

ต่าง ๆ เช่น การชะละลาย (leaching) ได้ นอกจากนี้ การจัดการอินทรีย์วัตถุในดินที่ทำการศึกษา อาจมีความจำเป็นในการพิจารณาถึงปริมาณและชนิดของอินทรีย์วัตถุร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของดินในการดูดซับ NH_4^+ จากการใส่ปุ๋ยไว้ในดินได้ในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุต่อพลวัตของแอมโมเนียมในดินที่ทำการศึกษา เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการจัดการอินทรีย์วัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับทุนอุดหนุนในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 547 หน้า.
- ทัศนีย์ อัดตะนันท์. 2550. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 359 หน้า.
- ทัศนีย์ อัดตะนันท์ และ จงรักษ์ จันทรเจริญสุข. 2542. การวิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 108 หน้า.
- สุภัทรา หลวงทะ ญัฐพล จิตมาตย์ และ เสาวนุช ถาวรพฤษ. 2558. การประเมินศักยภาพทางการเกษตรของดินเวอร์ทิกซอลส์ที่ใช้ปลูกข้าวของประเทศไทย. วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์ 2(4): 40-51.
- อุไรวรรณ ไอยสุวรรณ และ จีระศักดิ์ ขอบแต่ง. 2559. อิทธิพลของปุ๋ยไนโตรเจนต่อการย่อยสลายในกระเพาะรูเมนและองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าแพงโกล่า. วารสารเกษตร 32(1): 118-125.

- Aharoni, C. and Y. Suzin. 1982. Application of the Elovich equation to the kinetics of occlusion: Part 3. Heterogenous microporosity. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions* 78(8): 2329-2336.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59(1): 39-46.
- Buol, S.W., R.J. Southard, R.C. Graham and P.A. McDaniel. 2011. *Soil Genesis and Classification*. 6th ed. Wiley-Blackwell, Chichester. 543 p.
- Buss, S.R., A.W. Herbert, P. Morgan, S.F. Thornton and J.W.N. Smith. 2004. A review of ammonium attenuation in soil and groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37(4): 347-359.
- Carey, P.L. and A.K. Metherell. 2003. Rates of release of non-exchangeable potassium in New Zealand soils measured by a modified sodium tetraphenyl-boron method. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 46(3): 185-197.
- Chen, J.F. 1997. Adsorption and diffusion of ammonium in soils. pp. 87-111. *In*: Z.L. Zhu, Q.X. Wen and J. Freney (eds.). *Nitrogen in Soils of China*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Comans, R.N.J. and D.E. Hockley. 1992. Kinetics of cesium sorption on illite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56(3): 1157-1164.
- Coulombe, C.E., J.B. Dixon and L.P. Wilding. 1996. Mineralogy and chemistry of Vertisols. pp. 115-200. *In*: N. Ahmad and A. Mermut (eds.). *Vertisols and Technologies for Their Management*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Du, Q., S. Liu, Z. Cao and Y. Wang. 2005. Ammonia removal from aqueous solution using natural Chinese clinoptilolite. *Separation and Purification Technology* 44(3): 229-234.
- Feigenbaum, S., A. Bar-Tal and D.L. Sparks. 1990. Dynamics of soil potassium in multicationic systems. pp. 145-161. *In*: *Proceedings of the 22nd Colloquium of the International Potash Institute, Bern*.
- Feigenbaum, S., R. Edelstein and I. Shainberg. 1981. Release rate of potassium and structural cations from micas to ion exchangers in dilute solutions. *Soil Science Society of America Journal* 45(3): 501-506.
- 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*. SSSA Book Series 5. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
- Havlin, J.L. and D.G. Westfall. 1985. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal* 49(2): 366-370.
- Jalali, M. 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma* 135: 63-71.
- Jardine, P.M. and D.L. Sparks. 1984. Potassium-calcium exchange in a multireactive soil system: I. Kinetics. *Soil Science Society of America Journal* 48: 39-45.
- Jindaluang, W., I. Kheoruenromne, A. Suddhiprakarn, B.P. Singh and B. Singh. 2013. Influence of soil texture and mineralogy on organic matter content and

- composition in physically separated fractions soils of Thailand. *Geoderma* 195: 207-219.
- Martin-Martinez, F. and J.L. Perez-Rodriguez. 1969. Interlamellar adsorption of a black-earth humic acid on Na-montmorillonite. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 124: 52-57.
- National Soil Survey Center. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigation No. 42, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 539-579. *In*: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (eds.). *Methods of Soil Analysis: Part 2 - Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
- Nieder, R., D.K. Benbi, H.W. Scherer. 2011. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biology and Fertility of Soils* 47(1): 1-14.
- Nilawonk, W., T. Attanandana, A. Phonphoem, R. Yost and X. Shuai. 2008. Potassium release in representative maize-producing soils of Thailand. *Soil Science Society of America Journal* 72(3): 791-797.
- Nommik, H. 1965. Ammonium fixation and other reactions involving nonenzymatic immobilization of mineral nitrogen in soils. pp. 198-258. *In*: W.V. Bartholomew and F.E. Clark (eds.). *Soil Nitrogen*. Agronomy Monograph 10. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
- Nommik, H. and K. Vahtras. 1982. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. pp.123-171. *In*: F.J. Stevenson (ed.). *Nitrogen in Agricultural Soils*. Agronomy Monograph 22. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
- Perez-Rodriguez, J.L., A. Weiss and G. Lagaly. 1977. A natural clay organic complex from Andalusian black earth. *Clays and Clay Minerals* 25: 243-251.
- Ranjbar, F. and M. Jalali. 2014. Empirical and mechanistic evaluation of NH_4^+ release kinetic in calcareous soils. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 66(4): 606-615.
- Schneiders, M. and H.W. Scherer. 1998. Fixation and release of ammonium in flooded rice soils as affected by redox potential. *European Journal of Agronomy*: 8(3): 181-189.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Sparks, D.L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. 2nd ed. Academic Press, San Diego. 352 p.
- Sparks, D.L., L.W. Zelazny and D.C. Martens. 1980. Kinetics of potassium desorption in soil using miscible displacement. *Soil Science Society of America Journal* 44: 1205-1208.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. pp. 159-165. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 2 - Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy Inc., Madison, WI.
- Whitting, L.D. 1965. X-ray diffraction technique for minerals identification and mineralogical composition. pp. 671-698. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 2- Chemical and Microbiological Properties*.

Agronomy Monograph 9. American Society
of Agronomy Inc., Madison, WI.

Zhang, W.Z., Q.X. Chen, J.M. Zhou., D.H. Liu, H.Y.
Wang and C.W. Du. 2013. Influence of
humic acid on interaction of ammonium and
potassium ions on clay minerals.
Pedosphere 23(4): 493-502.
