

การเตรียมปุ๋ยละลายช้าที่มีแร่ธาตุไนโตรเจน และโพแทสเซียม
โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์

PREPARATION OF SLOW-RELEASE FERTILIZERS CONTAINING NITROGEN
AND POTASSIUM MINERALS USING ZEOLITE ADSORBENT

พัทธนันท์ นาถปิญิจ^{1,*} และ ชลธิชา นิवासประกฤติ²
Patthanant Natpinit^{1,*} and Chonticha Niwasprakrit²

¹ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

² ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมเกษตรสร้างสรรค์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

¹ Expert Centre of Innovative Industrial Robotics and Automation, Thailand Institute of Scientific and Technological Research.

² Expert Centre of Innovative Creating Agriculture. Thailand Institute of Scientific and Technological Research.

Received: 7 February 2022

Accepted: 24 June 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเตรียมปุ๋ยละลายช้าที่มีแร่ธาตุไนโตรเจน และโพแทสเซียม โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ สำหรับปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่ลาดชัน โดยคัดเลือกซีโอไลต์ 3 ชนิด ได้แก่ โดโลไมต์ ซีโอไลต์บ่อทุ่ง และซีโอไลต์ 4เอ ในการศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส, ความนำไฟฟ้า และค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก, ความเป็นกรด-เบสต่อการแลกเปลี่ยนไอออน และความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมของตัวดูดซับ 3 ชนิด เป็นต้น จากการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ 4เอ มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด จึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแร่ธาตุของซีโอไลต์ 4เอ ได้แก่ พฤติกรรมการดูดซับธาตุอาหาร, ระยะเวลา, ความเข้มข้นเริ่มต้น, รูปแบบในการดูดซับ และการทดสอบการละลายของปุ๋ย เป็นต้น ผลการวิจัยพบว่า ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ 4เอ มีค่ามากที่สุดเป็น 786 เซนติโมลต่อกิโลกรัม พฤติกรรมการดูดซับแอมโมเนียมและโพแทสเซียมใน

* ผู้ประสานงาน: พัทธนันท์ นาถปิญิจ

อีเมล: Patthanant_n@tistr.or.th

ซีโอไลต์ 4เอ เป็นไปตามแบบจำลองฟรันทซ์ ซึ่งมีความสำคัญภาพในการดูดซับเป็น 20.39 มก. แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ และที่ 17.48 มก. โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ที่สัดส่วน %solid ที่ 0.5% ระดับพีเอช และระยะเวลาไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อการดูดซับแร่ธาตุ รูปแบบการดูดซับแร่ธาตุของซีโอไลต์ 4เอ มีขั้นตอนการดูดซับ 2 รอบ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด โดยรอบที่ 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.02 โมลาร์ ใช้ตัวดูดซับที่ %solid 0.5% รอบที่ 2 ที่ %solid 0.25% ในสารละลายเดิม จะได้อัตราการดูดซับแอมโมเนียม และโพแทสเซียมเป็น 71.76 และ 61.11 ตามลำดับ และมีสัดส่วนการดูดซับแร่ธาตุต่อซีโอไลต์เป็น 26.68 มก. แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ และ 28.91 มก. โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ และจากการทดสอบการละลายของปุ๋ยพบว่า ปุ๋ยซีโอไลต์ 4เอ+แอมโมเนียม และ 4เอ+โพแทสเซียม มีอัตราการละลายครั้งที่ 0.157 กรัมแอมโมเนียมต่อลิตร และ 0.129 กรัมโพแทสเซียมต่อลิตร ซึ่งจัดว่าเป็นปุ๋ยละลายช้าที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยของแร่ธาตุได้

คำสำคัญ: ปุ๋ยละลายช้า, ซีโอไลต์ 4เอ, แอมโมเนียม, โพแทสเซียม, การดูดซับ

Abstract

The objective of this investigation aims to the preparation of slow-release fertilizers containing nitrogen and potassium minerals using zeolite adsorbent for growing maize in slope areas. 3 types of zeolite such as dolomite, zeolite for shrimp farm, and zeolite 4A were selected. The characteristic properties of zeolites were studied as pH, conductivity and cation exchange capacity (CEC), pH for ion exchange, and the ammonium adsorption capacity of 3 adsorbents, etc. The experiment result was shown that zeolite 4A had the optimal adsorption capacity. Therefore, the factors affecting the nutrients adsorption of zeolite 4A were conducted as minerals adsorption behavior, duration time, initial concentration, adsorption pattern, and fertilizer solubility test, etc. The research demonstrated that the cation exchange capacity of zeolite 4A was the highest at 786 cmol/kg. The ammonium and potassium

adsorption behavior of zeolite 4A were on the Freundlich model that the adsorption capacity was as 20.39 mg NH₄/g zeolite and 17.48 mg K/g zeolite at 0.5% of the solid proportion. Moreover, pH and duration time had not affected but the initial concentration of both minerals affects the adsorption. The adsorption pattern of zeolite 4A had 2 cycles for the maximum adsorption capacity. In cycle 1st, the initial concentration was 0.02 M at 0.5% of solid proportion and cycle 2nd was at 0.25% of solid proportion in the original solution. The ammonium and potassium adsorption efficiency was 71.76% and 61.11% respectively. In addition, the adsorption capacity of both minerals was 26.68 mg NH₄/g zeolite and 28.91 mg K/g zeolite. The fertilizer solubility test indicated that zeolite 4A+NH₄ and 4A+K fertilizers had a steady solubility rate of 0.157 g NH₄/L and 0.129 g K/L. It summarized that zeolite fertilizer was a slow-release fertilizer controlling both minerals release.

Keywords: slow-release fertilizer, zeolite 4A, ammonium, potassium, adsorption

บทนำ

เทคโนโลยีการจัดการธาตุอาหาร หรือปุ๋ยให้เป็นปุ๋ยละลายช้าสำหรับการปลูกพืชในพื้นที่ลาดชัน น่าจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยเพิ่มผลผลิตการปลูกข้าวเลี้ยงสัตว์ได้ เนื่องจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชที่สามารถปลูกได้ในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ใช้น้ำน้อยและสามารถปลูกได้ในฤดูแล้ง ซึ่งให้ผลตอบแทนสูง (Granados et al., 1994) นอกจากนี้ยังพบว่า การปลูกข้าวโพดจะทำให้ดินสูญเสียแร่ธาตุอาหารในดิน ส่งผลให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ลดลง โดยอัตราการสูญเสียไนโตรเจน ประมาณ 13.1 กก./ไร่ ฟอสฟอรัสประมาณ 7.7 กก./ไร่ และโพแทสเซียม 5.4 กก./ไร่ (กอบเกียรติ ไพศาลเจริญ และคณะ, 2551) จะเห็นได้ว่าหากมีการนำตัวดูดซับแร่ธาตุมาใช้ในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เพื่อให้แร่ธาตุในปุ๋ยเกิดการละลายอย่างค่อยเป็นค่อยไป เพื่อให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด รวมทั้งยังสามารถเก็บกักเหลือไว้ในดิน เพื่อไม่ให้ดินเกิดการสูญเสียแร่ธาตุมากเกินไป

ปุ๋ยละลายช้าที่ใช้กันในปัจจุบัน เป็นปุ๋ยเคมีที่มีการควบคุมการละลาย และการปลดปล่อยแร่ธาตุอาหารให้ออกมาอย่างสม่ำเสมอ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน เพื่อให้พืชได้รับสารอาหารอย่างเพียงพอ และต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่ ปุ๋ยละลายช้าที่ใช้มักเป็นปุ๋ยเคมีที่บรรจุอยู่ในสารเคลือบโพลิเมอร์ หรือเรซิน เพื่อควบคุมการละลาย และการปลดปล่อย การใช้ปุ๋ยละลายช้าต่อครั้ง จะสามารถยืดเวลาการเติมซ้ำได้นาน โดยการใส่ปุ๋ยเพียงครั้งเดียว แร่ธาตุอาหารจะอยู่ได้นาน 3-6 เดือน ซึ่งต่างจากปุ๋ยเคมีทั่วไปที่ละลายเร็ว และปลดปล่อยธาตุอาหารสูงในสัปดาห์แรก พืชไม่สามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ทัน

การพัฒนาปุ๋ยละลายช้ามีการนำตัวดูดซับชนิดต่างๆ มาใช้ โดยเฉพาะซีโอไลต์ (ปธานิน แสงอรุณ และคณะ, 2560) เนื่องจากตัวดูดซับประเภทซีโอไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน การที่ตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์เป็นที่นิยมมากในทางเกษตรกรรม เนื่องจากช่องว่างภายในโครงสร้างซีโอไลต์สามารถกักเก็บน้ำได้สูง มีความหนาแน่นต่ำ มีปริมาตรช่องว่างมากเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Breck, 1974) ซีโอไลต์ที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน คือ ซีโอไลต์ชนิดคลินอพติโลไลต์ (Clinoptilolite) ซึ่งเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติ สามารถช่วยจับแอมโมเนียได้สูงและปล่อยออกมาช้าๆ จึงช่วยให้ดินยึดไนโตรเจนไว้ได้นาน (Witter & Lopez, 1988) นอกจากนี้มีการนำซีโอไลต์มาใช้ในพื้นที่การเกษตร เพื่อการเพาะปลูกธัญพืช ผัก และผลไม้กันเป็นจำนวนมาก (Torii, 1978) เนื่องจากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน (Butorac et al., 2002) ซึ่งสามารถช่วยลดการสูญเสียแร่ธาตุอาหารได้ด้วย โดยเฉพาะไนโตรเจนและโพแทสเซียม (Polat et al., 2004) จากคุณสมบัติที่มีความเป็นต่างอ่อนๆ ทำให้สามารถรักษาสภาพบัพเฟอร์ และระดับพีเอชของดินได้ (Milosevic et al., 2009) ในการเพาะปลูกได้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้ในการปลูกแอปเปิ้ล โดยมีอัตราการใช้ที่ 2-8 กิโลกรัมต่อต้น (Polat et al., 2004) หรือ 4-8 ตันต่อเอเคอร์ โดยได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 13-38% (Torii, 1978) และมีการนำซีโอไลต์ชนิดคลินอพติโลไลต์ มาใช้ในการปลูกข้าว ในอัตรา 8 หรือ 16 ตันต่อเฮกแตร์ ซึ่งสามารถดูดซับไนโตรเจนไว้ได้ถึง 65% (Kavoosi, 2007)

ซีโอไลต์ในธรรมชาติ ได้แก่ analcime, chabazite, clinoptilolite, heulandite, natrolite, phillipsite, dolomite และ stilbite มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประมาณ 100-300 เซนติโมล/กิโลกรัม ซีโอไลต์ธรรมชาติที่ราคาถูกได้แก่ โคลโลไมต์ หรือ ซีโอไลต์ที่ใช้ในบ่อกัก เนื่องจากมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในระดับหนึ่ง แต่มี

ค่าค่อนข้างต่ำ ประมาณ 80-150 เซนติโมล/กิโลกรัม แต่ซีโอไลต์สังเคราะห์ ได้แก่ A, X, Y และ 4A มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงถึง 600-900 เซนติโมล/กิโลกรัม ดินที่มีซีโอไลต์ผสมอยู่ จะมีการชะล้างของแร่ธาตุไนโตรเจน และโพแทสเซียมน้อยกว่า ดินที่ไม่มีซีโอไลต์ผสมอยู่ (นงลักษณ์ วิบูลสุข และ พวงเล็ก โมรากุล, 2539) นอกจากนี้ยังพบว่าซีโอไลต์คลิнопติโลไลต์ สามารถตรึงไนโตรเจนให้มีระดับคงที่ และคงอยู่ได้ยาวนานขึ้น (Barbarick & Pirela, 1984)

การดูดซับแอมโมเนียมไอออน โดยใช้ซีโอไลต์ คลิнопติโลไลต์ มีอัตราส่วนที่ซีโอไลต์ 1 กรัมสามารถดูดซับแอมโมเนียมได้ 150 ไมโครโมล/ลบ.เดซิเมตร โดยใช้เวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง พบว่าแอมโมเนียมสามารถปลดปล่อยออกมาได้อย่างช้าๆ นอกจากนี้ยังพบว่าถ้ามีการเคลือบผิวด้วยพาราฟิน จะช่วยให้การปลดปล่อยได้ช้าลงมากยิ่งขึ้น (Mihok et al., 2020) นอกจากนี้ยังพบว่า สเม็คไทต์และแกลลอลิกไนต์สามารถดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟตได้ โดยมีความสามารถในการดูดซับเป็น 5.12 มก./ก. และ 199.87 มก./ก. ตามลำดับ และมีอัตราการปลดปล่อยแอมโมเนียมเป็น 32.26 มก./ล.-นาทีก และอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตเป็น 7.73 มก./ล.-นาทีก (นิพนธ์ ใจสุทธิ และคณะ, 2562) การนำซีโอไลต์ที่เสริมด้วยแอมโมเนียมมาใช้ในการปลูกสตรอเบอร์รี่พบว่า สามารถเพิ่มผลผลิตสตรอเบอร์รี่ได้มาก และมีผลต่อการเจริญเติบโต และการสังเคราะห์แสงได้เป็นอย่างดี (Giulia et al., 2020)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นวิธีเตรียมปุ๋ยละลายช้าที่มีแร่ธาตุไนโตรเจน และโพแทสเซียม โดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ เพื่อให้มีองค์ประกอบของแร่ธาตุ เพื่อนำไปใช้ในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์บนพื้นที่สูง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาคุณสมบัติสารดูดซับ

1.1 ความเป็นกรด-เบส (Wang & Peng, 2010) อบอุ่นอย่างซีโอไลต์ในตูบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งซีโอไลต์ 1 กรัม เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออน 100 มล. จากนั้นต้มสารแขวนลอยที่ 90 องศาเซลเซียส และกวนเป็นเวลา 20 นาที ทิ้งให้เย็นในอุณหภูมิห้อง และกรองซีโอไลต์ด้วยตัวกระดาดกรองเบอร์ 42 วัดสารละลายที่ได้ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ที่ทำการเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายมาตรฐานที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง

1.2 ความนำไฟฟ้า (Wang & Peng, 2010) อบตัวอย่างซีโอไลต์ในตูบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งซีโอไลต์ 1 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร กวน 30 นาที นำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้ามาตรฐาน

1.3 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Chapman, 1965) อบตัวอย่างซีโอไลต์ที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งซีโอไลต์ 1 กรัม ทำให้ซีโอไลต์อิ่มตัวด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต (Ajax Finechem Pty Ltd./Analytical grade) (NH_4OAc) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่สภาวะค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 7 ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองและล้างตัวอย่างด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต 3-4 ครั้ง และล้างซีโอไลต์ด้วยเอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 ประมาณ 3-4 ครั้ง จากนั้นให้น้ำซีโอไลต์ไปแช่ในสารละลายโซเดียมอะซิเตต หรือโพแทสเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรอง และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียมไอออนที่ถูกแทนที่ออกมาจากซีโอไลต์โดยการกลั่นและไตเตรต

1.4 ความเป็นกรด-เบสต่อการแลกเปลี่ยนไอออน ชั่งซีโอไลต์ 1 กรัม แห้งลงในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ajax Finechem Pty Ltd./Analytical grade) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 100 มล. ทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 7-7.5 เทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง

1.5 ความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมของตัวดูดซับ 3 ชนิด ตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ ไดโลไมต์ (เกรดทางการค้า) และ ซีโอไลต์บ่อกุ้ง (เกรดทางการค้า) ใช้้อย่างละ 25 กรัมและซีโอไลต์ 4เอ (เกรดทางการค้า) 10 กรัม ทำการดูดซับโดยใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 100 มล. ทำการเขย่าตลอดเวลา ด้วยเครื่องกวน เป็นเวลา 30 นาที

2. การศึกษาการดูดซับธาตุอาหาร

2.1 การศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับธาตุอาหาร พฤติกรรมของการดูดซับธาตุอาหารของสารดูดซับ (adsorption isotherm) ใช้แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์-ฟรุนด์ลิช ดังสมการที่ 1 และ 2

$$\text{Langmuir Adsorption Isotherm} \quad C_e/Q_e = C_e/Q_o + 1/(K_L Q_o) \quad (1)$$

$$\text{Freundlich Adsorption Isotherm} \quad \log Q_e = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad (2)$$

โดยที่ C_e = Equilibrium conc. (mg/l)
 Q_e = monolayer adsorption capacity of adsorbent (mg/g)
 K_L = Langmuir adsorption constant (L/mg)
 K_f = Freundlich coefficient (L/mg)
 $1/n$ = dimensionless constant (ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน)

โดยใช้ซีโอไลต์ 0.25-10 กรัม ในแอมโมเนียมคลอไรด์หรือโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ทำการเขย่าตลอดเวลา ด้วยเครื่องกวน เวลาดูดซับ 30 นาที

2.2 การศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมที่ระยะเวลาต่างๆ ซังซีโอไลต์ 0.5 กรัมในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ 100 มล. ทำการเขย่าตลอดเวลา ด้วยเครื่องกวน โดยเวลาที่ทดลองการดูดซับ 5 10 15 30 60 และ 120 นาที

2.3 การศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ซังซีโอไลต์ 0.5 กรัมในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ในช่วง 0.01-0.1 โมลาร์ 100 มล. ทำการเขย่าตลอดเวลา ด้วยเครื่องกวน ใช้เวลาในการดูดซับ 15 นาที

2.4 การศึกษารูปแบบในการดูดซับแอมโมเนียม และโพแทสเซียม เปรียบเทียบรูปแบบในการดูดซับ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 ใช้ซีโอไลต์ 4เอ 0.5 กรัม (รอบที่ 1 และรอบที่ 2) ในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์หรือโพแทสเซียมคลอไรด์ (Ajax Finechem pty Ltd./Analytical grade) 0.02 โมลาร์ 100 มล. ทำการเขย่าตลอดเวลา ด้วยเครื่องกวน เป็นเวลา 15 นาที

วิธีที่ 2 ใช้ซีโอไลต์ 4เอ 0.5 กรัม (รอบที่ 1) และ 0.25 กรัม (รอบที่ 2) ในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์หรือโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.02 โมลาร์ 100 มล. ทำการเขย่าตลอดเวลา ด้วยเครื่องกวน เป็นเวลา 15 นาที

3. การทดสอบการละลายของปุ๋ย

นำปุ๋ยที่เตรียมได้ ประมาณ 1.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นคราวละ 50 มล. โดยตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำมากรองแยกตะกอน และสารละลายส่วนใส ส่วนตะกอน นำกลับไปละลายในน้ำกลั่นอีกครั้ง โดยทำซ้ำเช่นนี้เรื่อยไป จนครบ 500 มล. ส่วนสารละลายส่วนใส นำมาวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. การศึกษาคุณสมบัติสารดูดซับ

ตารางที่ 1 สมบัติของตัวดูดซับ

โดโลไมต์			ซีโอไลต์บ่อกุ้ง			ซีโอไลต์ 4เอ		
pH	EC	CEC	pH	EC	CEC	pH	EC	CEC
9.17	149	97	9.69	142	131	10.23	219	786

หมายเหตุ: หน่วย EC (ค่าการนำไฟฟ้า) คือ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

หน่วย CEC (ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก) คือ เซนติโมลต่อกิโลกรัม

จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ในช่วง 9.17-10.23 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง แสดงว่าสามารถรักษาสภาพะบบฟอไรโนดินได้ดี เนื่องจากดินมีค่าความเป็นกรดสูง (Milosevic et al., 2009) นอกจากนี้จะเห็นว่า โดโลไมต์ และ ซีโอไลต์บ่อกุ้ง มีค่าการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าต่ำกว่าซีโอไลต์ 4เอ โดยค่าการนำไฟฟ้าเป็น 149, 142 และ 219 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) พบว่าซีโอไลต์ 4เอ มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือซีโอไลต์บ่อกุ้ง และโดโลไมต์ตามลำดับ โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็น 786 131 และ 97 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หากเปรียบเทียบกับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินกล่าวได้ว่าซีโอไลต์มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับสูง (มากกว่า 40 เซนติโมล/กิโลกรัม) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) แสดงให้เห็นว่า ซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิดสามารถนำมาใช้เป็น ตัวดูดซับแร่ธาตุอาหารได้ (Butorac et al., 2002)

จากตารางที่ 2 เห็นได้ว่า ซีโอไลต์ 4เอ มีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียม (มก./ก.ซีโอไลต์) ได้ดีกว่าซีโอไลต์บ่อกุ้ง และโดโลไมต์อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์ 4เอ มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่สูงกว่ามาก ทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนบวกในซีโอไลต์กับแอมโมเนียมได้มากกว่า ซีโอไลต์ชนิดอื่น (Polat et al., 2004) ซึ่งซีโอไลต์บ่อกุ้ง และโดโลไมต์มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกใกล้เคียงกัน จึงทำให้ดูดซับแอมโมเนียมไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าการดูดซับแอมโมเนียม

ของโดโลไมต์ ซีโอไลต์บ่อกุง และซีโอไลต์ 4เอ เป็น 0.056, 0.073 และ 1.394 มก.แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ

จากตารางที่ 3 พบว่าการปรับระดับความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลางก่อนการดูดซับแอมโมเนียมไม่มีความแตกต่างกับการไม่ปรับระดับความเป็นกรด-ด่างก่อนการดูดซับ โดยปริมาณแอมโมเนียมที่ถูกดูดซับได้มีค่าเป็น 1.37 มก. แสดงว่าการดูดซับไม่ขึ้นกับระดับพีเอชของสารละลาย แต่ขึ้นกับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ (Butorac et al., 2002)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมของตัวดูดซับ 3 ชนิด

ตัวอย่างที่	กรัม	แอมโมเนียมที่ถูกดูดซับ (มก.)	การดูดซับแอมโมเนียม (มก./ก.)
โดโลไมต์	25.0488	1.4127	0.056
ซีโอไลต์บ่อกุง	25.0068	1.8282	0.073
ซีโอไลต์ 4เอ	10.0193	14.2101	1.394

ตารางที่ 3 ผลระดับความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับแอมโมเนียม

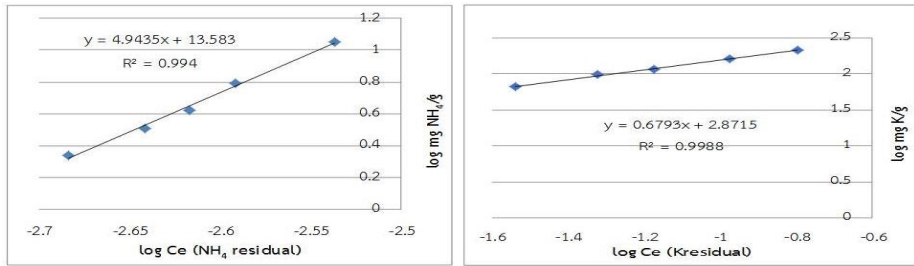
ตัวอย่างที่	กรัม	แอมโมเนียมที่ถูกดูดซับ (มก.)
ปรับพีเอชเป็นกลาง	1.0058	1.37
ไม่ปรับพีเอช	1.0026	1.37

2. การศึกษาการดูดซับธาตุอาหาร

2.1 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับธาตุอาหาร

เมื่อปริมาณซีโอไลต์ 4เอ เพิ่มมากขึ้น ปริมาณการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากการดูดซับแอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์มีค่าลดลง ดังนั้นจึงต้องอาศัยแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์-ฟรุนด์ลิช มาอธิบายพฤติกรรมการดูดซับธาตุอาหารของซีโอไลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 1 และตารางที่ 4-5 พบว่าพฤติกรรมการดูดซับแอมโมเนียมและโพแทสเซียมของซีโอไลต์ 4เอ เป็นแบบฟรุนด์ลิช โดยสัดส่วนการดูดซับแอมโมเนียมหรือโพแทสเซียมต่อปริมาณซีโอไลต์ มีปริมาณลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่ม

มากขึ้น ทั้งที่ปริมาณการดูดซับมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยพบว่า จากสมการพหุนามที่ได้ของการดูดซับแอมโมเนียม คือ $y = 4.9435x + 13.583$ สามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ได้ โดยที่ร้อยละ 60 ของการดูดซับ ($\log Ce = x = 0.004$) จะมีศักยภาพในการดูดซับเป็น 20.39 มก.แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ (10^4y) ซึ่งจะมีค่าตรงกับสัดส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายแอมโมเนียมที่ใช้ในการดูดซับ (%solid) ที่ 0.5% ดังแสดงในตารางที่ 4 หรือ ที่ร้อยละ 70 ของการดูดซับ ($\log Ce = x = 0.003$) จะมีศักยภาพในการดูดซับเป็น 11.23 มก.แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ (10^4y) และได้สัดส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายแอมโมเนียมที่ใช้ในการดูดซับ (%solid) ที่ 1.0% ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยทั่วไปมักเลือกใช้ซีโอไลต์ที่สามารถดูดซับแอมโมเนียมได้ในช่วง 14-32 มิลลิกรัมแอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ (Nguyen, 1997) ในทำนองเดียวกันพบว่า จากสมการพหุนามที่ได้ของการดูดซับโพแทสเซียม คือ $y = 0.6793x + 2.8715$ สามารถคำนวณความสามารถในการดูดซับโพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ได้ โดยที่ร้อยละ 50 ของการดูดซับ ($\log Ce = x = 0.005$) จะมีศักยภาพในการดูดซับเป็น 20.34 มก.โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ (10^4y) และได้สัดส่วน %solid ที่ 0.25% ดังแสดงในตารางที่ 5 หรือ ที่ร้อยละ 60 ของการดูดซับ ($\log Ce = x = 0.004$) จะมีศักยภาพในการดูดซับเป็น 17.48 มก.โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ (10^4y) และได้สัดส่วน %solid ที่ 0.5% ดังแสดงในตารางที่ 5 ในการวิจัยนี้จึงได้เลือกที่ %solid 0.5% เพื่อให้สอดคล้องกับการดูดซับแอมโมเนียม จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการดูดซับแอมโมเนียมหรือโพแทสเซียมของ ซีโอไลต์ 4เอ ขึ้นกับตำแหน่งในโครงสร้างต่อการดูดซับ ซึ่งอนุมานได้ว่าพฤติกรรมการดูดซับมี 3 ลำดับ คือ 1) แอมโมเนียมหรือโพแทสเซียมไอออนแพร่จากสารละลายไปสู่ซีโอไลต์ เนื่องจากความเข้มข้นในอนุภาคที่แตกต่างกัน โดยไอออนจะแพร่จากสารที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่สารที่มีความเข้มข้นต่ำ 2) แอมโมเนียมหรือโพแทสเซียมไอออนสัมผัสหรือแลกเปลี่ยนไอออนที่อยู่บนพื้นผิวของซีโอไลต์ และ 3) แอมโมเนียมหรือโพแทสเซียมไอออนกระจายตัวไปยังรูพรุนในโครงสร้างของซีโอไลต์ เพื่อถูกดูดซับเก็บไว้ให้มีความเสถียรภาพมากขึ้น (Mihok et al., 2020)



ก. การดูดซับแอมโมเนียม

ข. การดูดซับโพแทสเซียม

รูปที่ 1 แบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

ตารางที่ 4 อัตราการดูดซับแอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ 4 เอ ในการดูดซับแอมโมเนียม

g zeolite	mg NH_4 ab	% NH_4 ab	mg NH_4/gZ	Ce	$\log C_e$	$\log \text{mgNH}_4/\text{g}$
0.5014	10.22	60.30	20.39	0.0039	-2.43	1.31
1.0566	11.72	69.12	11.23	0.0029	-2.54	1.05
2.0018	12.34	72.79	6.15	0.0026	-2.59	0.79
3.0039	12.59	74.26	4.19	0.0024	-2.62	0.62
4.0270	12.84	75.74	3.20	0.0023	-2.64	0.50
5.0476	12.84	75.74	2.54	0.0023	-2.64	0.41
6.0570	13.21	77.94	2.18	0.0021	-2.68	0.34
7.0710	13.21	77.94	1.88	0.0021	-2.68	0.27

ตารางที่ 5 อัตราการดูดซับโพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ 4 เอ ในการดูดซับโพแทสเซียม

gZeolite	mg Kab	%Kab	mgK/gZ	Ce	$\log C_e$	$\log \text{mgK/gZ}$
0.2574	5.5	14.47	21.4	0.16	-0.80	2.33
0.5035	8.2	21.58	16.3	0.11	-0.98	2.21
1.0070	11.8	31.05	11.7	0.07	-1.17	2.07
2.0095	19.4	51.05	9.7	0.05	-1.32	1.98
4.0205	26.7	70.26	6.6	0.03	-1.54	1.82

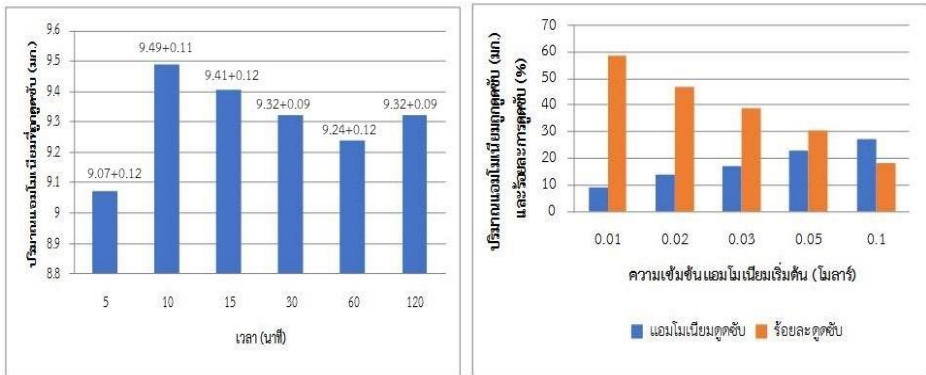
2.2 การศึกษาการดูดซับธาตุอาหารที่ระยะเวลาต่างๆ

ในการทดลอง ใช้สัดส่วน %solid 0.5% ในการหาระยะเวลาในการดูดซับ แสดงได้ดังรูปที่ 2 ก. พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 5 นาที เป็น 10 นาที ปริมาณแอมโมเนียมถูกดูดซับมากขึ้น และที่ระยะเวลา 10 นาที มีการดูดซับมากที่สุด ที่ 9.4905 มก. หลังจากนั้นเวลาเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณแอมโมเนียมถูกดูดซับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารละลายแอมโมเนียมและไอออนบวกในโครงสร้างซีโอไลต์เกิดการแลกเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งสามารถเกิดการดูดซับ และการปลดปล่อยได้ เมื่อระยะเวลามากขึ้น เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างแอมโมเนียมและโครงสร้างซีโอไลต์เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นได้ เมื่อมีโลหะร่วมบนตัวรองรับซีโอไลต์ หรือมีการแลกเปลี่ยนโลหะทรานซิชันในโครงสร้างซีโอไลต์หรือโลหะอื่นๆ เช่น Fe Cu Mn Ca เป็นต้น (Lin et al., 2013) เพื่อเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากไอออนโลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนต่างกัน โดยเฉพาะแอมโมเนียมมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนหรือแทนที่ไอออนได้ดีกว่าโซเดียม แคลเซียม และเหล็ก ตามลำดับ (Lin et al., 2013) หรือปรับเสถียรภาพของโครงสร้างซีโอไลต์ ให้มีความสมดุลระหว่างไอออนบวกและลบในโครงสร้างของซีโอไลต์ก่อน (Hwang & Tai, 2010) นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียม ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นแอมโมเนียมเริ่มต้นและเวลาการดูดซับ (Murkani et al., 2015) จึงสรุปได้ว่าระยะเวลาไม่มีผลต่อการดูดซับมากนัก เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นกับ ชนิดของไอออนที่แลกเปลี่ยนในโครงสร้างซีโอไลต์ โครงสร้างของซีโอไลต์ และความชื้นในอากาศ (ศิริสุข ลอยหา, 2556)

2.3 การศึกษาการดูดซับธาตุอาหารที่ความเข้มข้นแอมโมเนียมเริ่มต้น

จากรูปที่ 2 ข. เห็นได้ว่า ที่สัดส่วน %solid 0.5% เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมในสารละลายเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น จาก 0.01, 0.02, 0.03, 0.05 และ 0.1 โมลาร์ ตามลำดับ ซีโอไลต์สามารถดูดซับแอมโมเนียมได้มากขึ้น โดยมีปริมาณการดูดซับเป็น 8.91, 13.99, 17.32, 22.89 และ 27.47 มก. ตามลำดับ แต่ร้อยละการดูดซับแอมโมเนียม กลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 58.79%, 46.67%, 38.81%, 30.56% และ 18.33% ตามลำดับ ทำให้เกิดการสูญเสียแอมโมเนียมในปริมาณมาก เนื่องจากพฤติกรรมดูดซับแอมโมเนียมของซีโอไลต์ เป็นการดูดซับตามแบบจำลองฟรอนด์ลิช โดยปริมาณการดูดซับแอมโมเนียม

เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียมเพิ่มมากขึ้น (Murkani et al., 2015)



ก. การดูดซับที่ระยะเวลาต่างๆ

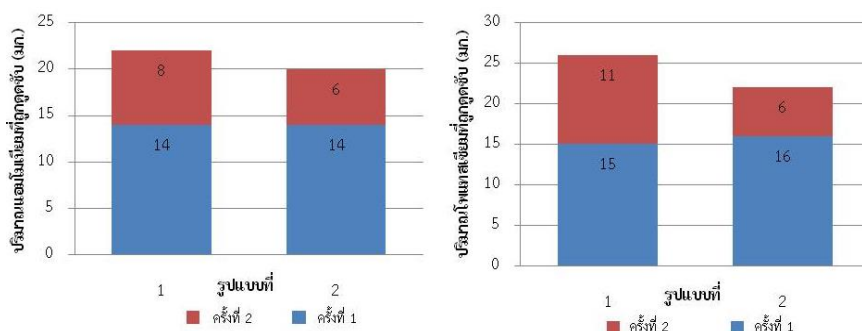
ข. การดูดซับที่ความเข้มข้นต่างๆ

รูปที่ 2 แอมโมเนียมที่ถูกดูดซับที่ระยะเวลา และความเข้มข้นต่างๆ

2.4 การศึกษารูปแบบในการดูดซับแอมโมเนียม และโพแทสเซียม

จากรูปที่ 3 เห็นได้ว่า ปริมาณแอมโมเนียมและโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับ และเหลืออยู่หลังการดูดซับครั้งแรกที่สัดส่วน %solid ที่ 0.5% ของรูปแบบที่ 1 และ 2 ในครั้งที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมในรูปแบบที่ 1 และ 2 เป็น 14 มก. และ 14 มก. ตามลำดับ และโพแทสเซียมที่ 15 มก. และ 16 มก. ตามลำดับ ซึ่งแต่ละแร่ธาตุไม่แตกต่างกันมากนัก ปริมาณแอมโมเนียมและโพแทสเซียมที่เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 50 และ 60 จากเริ่มต้น ตามลำดับ แต่การดูดซับในครั้งที่ 2 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการดูดซับมีความแตกต่างกัน โดยรูปแบบที่ 1 การดูดซับครั้งที่ 2 ใช้สัดส่วน%solid ที่ 0.5% แต่รูปแบบที่ 2 การดูดซับครั้งที่ 2 ใช้สัดส่วน%solid ที่ 0.25% พบว่า การดูดซับแอมโมเนียมครั้งที่ 2 ในรูปแบบที่ 1 และ 2 เป็น 8 มก. และ 6 มก. ตามลำดับ ส่วนโพแทสเซียมเป็น 11 มก. และ 6 มก. ตามลำดับ เนื่องจากพฤติกรรมการดูดซับแบบฟรอนต์ลิช ปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถเพิ่มการดูดซับได้อย่างมีนัยสำคัญ และประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมและโพแทสเซียมจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ (Murkani et al., 2015) ซึ่งรูปแบบที่ 1 มีทั้งปริมาณการดูดซับ และร้อยละการดูดซับมากกว่ารูปแบบที่ 2 แต่เมื่อเทียบสัดส่วนการดูดซับต่อซีโอไลต์พบว่า รูปแบบที่ 2 มีค่ามากกว่ารูปแบบที่ 1 เนื่องจากในรูปแบบที่ 2 มีปริมาณ

ของซีโอไลต์ที่ใช้้น้อยกว่าในรูปแบบที่ 1 โดยปริมาณซีโอไลต์โดยรวมในการดูดซับแอมโมเนียมในรูปแบบที่ 2 มีสัดส่วนซีโอไลต์รวมเป็น 0.75% ส่วนรูปแบบที่ 1 มีสัดส่วนซีโอไลต์รวมเป็น 1.0% ซึ่งปริมาณตัวดูดซับในรูปแบบที่ 1 ที่ใช้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 25 ซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการสังเคราะห์ปุ๋ยละลายช้า นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ซีโอไลต์ 4เอ ดูดซับแอมโมเนียมได้น้อยกว่าโพแทสเซียมในระดับ %solid 0.5% เท่ากัน เนื่องจากขนาดของแอมโมเนียมมีขนาดใหญ่กว่าโพแทสเซียม จึงทำให้การดูดซับเข้าไปในโครงสร้างของซีโอไลต์ได้น้อยลง รวมทั้งค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity; EN) ของโพแทสเซียมมีค่าต่ำกว่าแอมโมเนียมด้วย จึงถูกดูดด้วยประจุลบซึ่งเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์ได้มากกว่า



ก. รูปแบบการดูดซับแอมโมเนียม ข. รูปแบบการดูดซับโพแทสเซียม

รูปที่ 3 การดูดซับแอมโมเนียมและโพแทสเซียมในรูปแบบต่างๆ

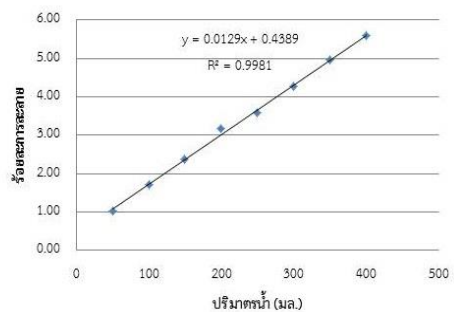
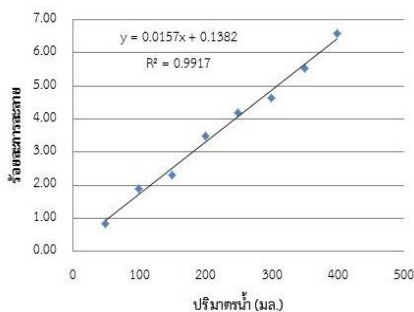
รูปแบบที่ 1 ครั้งที่ 1 และ 2 ที่สัดส่วน %solid ที่ 0.5%

รูปแบบที่ 2 ครั้งที่ 1 และ 2 ที่สัดส่วน %solid ที่ 0.5% และ 0.25% ตามลำดับ

3. การทดสอบการละลายของปุ๋ย

จากรูปที่ 4 เห็นได้ว่าปุ๋ย 4เอ+แอมโมเนียม และปุ๋ย 4เอ+โพแทสเซียม มีลักษณะการละลายแบบเดียวกันคือ มีร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น และอัตราการละลายค่อนข้างคงที่ เนื่องจากได้กราฟที่มีความชันเป็นเส้นตรง และมีค่า $R^2 > 0.99$ โดยมีความการละลายอยู่ที่ 0.157 กรัมแอมโมเนียมต่อลิตร และ 0.129 กรัมโพแทสเซียมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงว่าปุ๋ยที่เตรียมจากการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับทั้งแอมโมเนียม และโพแทสเซียมสามารถควบคุมการละลายของปุ๋ยได้ เมื่อเทียบกับปุ๋ยละลายช้าออสโมโค้ท พบว่ามีอัตราการละลายอยู่ที่ 0.3004 กรัมต่อลิตร (วรวิษฐา แสงฤทธิ์, 2547) หรือ 0.558 กรัมต่อลิตร (จิตตริรา

บัวเทศ, 2554) ซึ่งปุ๋ยออสโมโค้ทเป็นปุ๋ยทางการค้า มีหลายสูตร เช่น 13:13:13 หรือ 12:25:6 เป็นต้น โดยเป็นปุ๋ยเคมีที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ เป็นการนำปุ๋ยเคมีที่ละลายเร็ว มาเคลือบด้วยสารเรซินธรรมชาติ เมื่อนำไปใช้งาน น้ำจะซึมผ่านชั้นเคลือบผิวเรซินเข้าไป ละลายแร่ธาตุที่อยู่ภายใน และแร่ธาตุจะซึมผ่านชั้นเคลือบออกมาด้วยกระบวนการออสโมซิส เพื่อที่จะสามารถควบคุมการละลายและการปลดปล่อยของแร่ธาตุในปุ๋ยได้ เมื่อแร่ธาตุละลายหมดแล้วจะเหลือแต่เปลือกเรซิน ภายนอก (จิตตริรา บัวเทศ, 2554) เมื่อเทียบกับ โดยปุ๋ย ซีโอไลต์ 4เอ+แอมโมเนียม และ 4เอ+โพแทสเซียม เป็นการดูดซับแร่ธาตุในโครงสร้าง ซีโอไลต์ ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นกับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ (Lin et al., 2013) ซึ่งจากการทดลองพบว่า ปุ๋ยซีโอไลต์ 4เอ+แอมโมเนียม และ 4เอ+โพแทสเซียม มีแอมโมเนียมและโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบประมาณ 26 มก./ก. และ 63 มก./ก. ตามลำดับ หรือ 2.6% และ 6.3% ตามลำดับเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปุ๋ยออสโมโค้ทค่อนข้างมาก จึงทำให้มีอัตราการละลายที่ต่ำกว่า



ก. ปุ๋ยซีโอไลต์ 4เอ+แอมโมเนียม

ข. ปุ๋ยซีโอไลต์ 4เอ+โพแทสเซียม

รูปที่ 4 อัตราการละลายของปุ๋ยซีโอไลต์ 4เอ+แอมโมเนียม และ 4เอ+โพแทสเซียม

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การดูดซับแอมโมเนียม และโพแทสเซียมในตัวดูดซับไม่ขึ้นกับระดับพีเอชของสารละลาย และระยะเวลา แต่ขึ้นกับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์ ซึ่งซีโอไลต์ 4เอ มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็น 786 เซนติโมลต่อ กิโลกรัม มีค่ามากกว่าโดโลไมต์และซีโอไลต์บ่อทุ่ง ลักษณะการดูดซับของแอมโมเนียมและโพแทสเซียมในซีโอไลต์ 4เอ เป็นไปตามแบบจำลองฟรอนด์ลิจ โดยพบว่า ถ้าให้ซีโอไลต์

มีความสามารถในการดูดซับแร่ธาตุต่อกรัมซีโอไลต์ที่ร้อยละ 60 จะมีศักยภาพในการดูดซับเป็น 20.39 มก.แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ และที่ 17.48 มก.โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ที่สัดส่วน %solid ที่ 0.5% รูปแบบในการเตรียมปุ๋ยละลายช้าที่ใช้ซีโอไลต์ 4เอ เป็นตัวดูดซับ มีขั้นตอนการดูดซับ 2 รอบ โดยรอบที่ 1 ให้ใช้สัดส่วน %solid ที่ 0.5% ความเข้มข้นเริ่มที่ 0.02 โมลาร์ รอบที่ 2 ให้ใช้สัดส่วน %solid ที่ 0.25% และใช้สารละลายเดิมที่เหลืออยู่ ซึ่งสรุปได้ว่า ซีโอไลต์ 4เอ สามารถดูดซับแอมโมเนียม และโพแทสเซียมได้ร้อยละ 71.76 และ 61.11 ตามลำดับ และมีสัดส่วนการดูดซับแร่ธาตุต่อซีโอไลต์เป็น 26.68 มก.แอมโมเนียมต่อกรัมซีโอไลต์ และ 28.91 มก.โพแทสเซียมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ และจากการทดสอบการละลายของปุ๋ยพบว่า ปุ๋ยซีโอไลต์ 4เอ+แอมโมเนียม และ 4เอ+โพแทสเซียมจัดว่าเป็นปุ๋ยละลายช้าได้ เนื่องจากมีอัตราการละลายที่คงที่ 0.157 กรัมแอมโมเนียมต่อลิตร และ 0.129 กรัมโพแทสเซียมต่อลิตร ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง/References

- กรมพัฒนาที่ดิน. (2553). *คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี*. กรมพัฒนาที่ดิน.
- กอบเกียรติ ไพศาลเจริญ, อัจฉรา นันทกิจ, สมปอง หมั่นแจ้ง และ ไพโรจน์ พันธุ์ฤกษ์. (2551). การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยชีวภาพกับ การผลิตข้าวโพดสายพันธุ์ นครสวรรค์ 2 ในชุดดินวังสะพุง. *วารสารวิชาการเกษตร*, 1(1), 82-90.
- จิตตธีรา บัวเทศ. (2554). *การผลิตปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลิโอไนต์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- นงลักษณ์ วิบูลสุข และ พวงเล็ก โมรากุล. (2539). *การใช้ซีโอไลต์ปรับปรุงดิน เพื่อการเกษตร*. กลุ่มงานวิจัยเคมีดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร. 1-13.

- นิพนธ์ ใจสุทธิ, คณิตา ตังคณานุรักษ์, วัชรพงษ์ วาระรัมย์ และ ดาวจรัส เกตุโรจน์. (2562). สมบัติของปุ๋ยทางเลือกที่ได้จากการดูดซับธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยสเม็คไทต์และถ่านลอยลิกไนต์. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 19(2), 131-141.
- ปธานิน แสงอรุณ, ธเรศ ศรีสถิตย์ และ พงษ์เสรีฐ ศรีพรหม. (2560). สภาพที่เหมาะสมในการเพิ่มค่าความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุบวกของการปรับสภาพถ่านลอยถ่านหิน โดยวิธีพ่นผิวตอบสนอง. *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*, 31(3), 57-64.
- วริษฐา แสงฤทธิ์. (2547). *ปุ๋ยที่เคลือบด้วยน้ำมันชักแห้ง เพื่อการปลดปล่อยแบบควบคุม*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- ศิรินุช ลอยหา. (2556). ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 41(1), 56-66.
- Barbarick, K. A., & Pirela, H. J. (1984). Agronomic and horticultural uses of zeolite. In: Pond, W.G., & Mumpton, F.A., editors. *Zeo-agriculture: Use of Natural Zeolites in Agriculture and Aquaculture*. Boulder, CO, USA: Westview Press, 93–104.
- Breck, D. W. (1974). *Zeolite Molecular Sieves*. John Wiley and Sons, New York.
- Butorac, A., Filipan, T., Basic, F., Butorac, J., Mesic, M., & Kisic, I. (2002). Crop response to the application of special natural amendments based on zeolite tuff. *Rostlinná Výroba*, 48, 118-124.
- Chapman, H. D. (1965). *Cation exchange capacity*. In *Methods of Soil Analysis (Number 9 in the Series Agronomy), Part 2*, A. Black, ed. Madison, Wisconsin: American Institute of Agronomy. 891-901.
- Granados, G., Kitbamroong, C., Tavarasook, C., Chatasiri, M., Grudloyma, P., Chotichun, S., & Boonpradab, S. (1994). Winter maize in paddy fields research conducted in Thailand in 1992-1994. pp. 26.

- Giulia, C., Valentina, C., Enrica, F., Ilaria, M., Roberta, G., Marco, G., & Giovanna, G. (2020). Characterization and use of absorbent materials as slow-release fertilizers for growing strawberry: Preliminary results. *Sustainability*, 12, Doi:10.3390/su12176854.
- Hwang, C. L., & Tai, N. H. (2010). Removal of dimethylsulfide by adsorption on ionexchanged zeolites. *Applied Catalysis B: Environmental*, 93, 363-367.
- Kavoosi, M. (2007). Effects of Zeolite Application on Rice Yield, Nitrogen Recovery, and Nitrogen Use Efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38, 69-76.
- Lin, L., Lei, Z., Wang, L., Liu, X., Zhang, Y., & Wan, C. (2013). Adsorption mechanisms of high-levels of ammonium onto natural and NaCl-modified zeolites. *Separation and Purification Technology*, 103(15-20).
- Mihok, F., Macko, J., Orinak, A., Orinakov, R., Koval, K., Katarina Sisakov., K., Petrus, O., & Kostek, Z. (2020). Controlled nitrogen release fertilizer based on zeolite clinoptilolite: Study of preparation process and release properties using molecular dynamics. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3, Doi.org/10. 1016/j.desal.2011.03.030.
- Milosevic, T., & Milosevic, N. (2009). The effect of zeolite, organic and inorganic fertilizers on soil chemical properties, growth and biomass yield of apple trees. *Plant, Soil and Environment*, 55(12), 528-535.
- Murkani, M., Nasrollahi, M., Ravanbakhsh, M., Bahrami, P., Jaafarzadeh, N., & Fard, H. (2015). Evaluation of natural zeolite clinoptilolite efficiency for the removal of ammonium and nitrate from aquatic solution. *Environmental health engineering and management Journal*, 2(1), 17-22.
- Nguyen, M. L. (1997). *Retention and subsequent nitrification of wastewater ammonium in natural New Zealand zeolites*. Proc., UNEP—For Life on Earth—Int. Regional Conf. Perth, Australia: Murdoch University.

- Polat, E., Karaca, M., Demir, H., & Naci-Onus, A. (2004). Use of Natural Zeolite Clinoptilolite in Agriculture. *Journal of Fruit Ornamental and Plant Research*, 12, 183-189.
- Torii, K. (1978). *Utilization of natural zeolite in Japan*, in “Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Use” Sand, L.B., Mumpton, F.A., Editor. Pergamon Press, Elmsford, New York, pp. 441-450.
- Wang, S., & Peng, Y. (2010). Review natural zeolites as effective adsorbents in wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156, 11-24.
- Witter, E., & Lopez-Real, J. (1988). Nitrogen losses during the composting of sewage sludge, and the effectiveness of clay soil, zeolite, and compost in adsorbing the volatilized ammonia. *Biological Wastes*, 23(4), 279-294.