

จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยปลดปล่อยช้าด้วยวัสดุผสมอัลจิเนต-ทัลคัมในรูปแบบแอโรเจล

N-Release Kinetics of Slow-Release Fertilizer by Alginate-Talcum Aerogel Composite Materials

วัชระ ทองเสมอ¹ และสุนทรี แสงจันทร์^{2*}

Wadchara Thongsamer¹ and Suntree Sangjan^{2*}

Received 29 August 2022, Revised 31 August 2022, Accepted 31 August 2022

ABSTRACT

N-slow release fertilizer was fabricated using new materials as urea adsorbent; sodium alginate (SA) and talcum (T) were used to form aerogel beads with various SA:T ratios, that are 10:0 (T0), 10:1 (T1), 10:2 (T2), 10:5 (T5), 10:10 (T10) and 10:30 (T30). The structures of aerogel beads were characterized by XRD and FT-IR spectrometry. Regarding this our research, The N-release kinetics by Zero-order, First-order and Higuchi models. Were studied all release kinetic model results showed the release of urea in SA-T aerogel beads. The results show that the release rate of urea depends on SA:T ratios in aerogel beads. For the first-order model, it was found that the lowest urea release rate was around 0.2713 day^{-1} for T2, which were lower than three times of T0, free talcum. These results attributed that adding talcum into SA-T aerogel beads significantly affects the release rate of urea in the slow-release fertilizer. This research shows that N-slow release fertilizers in the form of aerogel that beads can furtherly improve the efficiency of slow-release fertilizers.

Keywords: Slow-release fertilizer, Aerogel, Alginate, Talcum, Composites

บทคัดย่อ

ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าสังเคราะห์ด้วยการใช้วัสดุชนิดใหม่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกักเก็บไนโตรเจนคือ โซเดียมอัลจิเนตและทัลคัม ซึ่งถูกนำมาขึ้นรูปในลักษณะแอโรเจลที่อัตราส่วนระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมแตกต่างกัน คือ 10:0 (T0), 10:1 (T1), 10:2 (T2), 10:5 (T5), 10:10 (T10) และ 10:30 (T30)

¹ โครงการจัดตั้งภาควิชาฟิสิกส์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Physics, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

^{2*} โครงการจัดตั้งภาควิชาฟิสิกส์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Physics, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* Corresponding author: Tel 09-0995-3209, E-mail address: faasstp@ku.ac.th

โครงสร้างของเม็ดแอรโอเจลถูกนำมาตรวจสอบด้วยกระบวนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และกระบวนการส่องผ่านแสง โดยงานวิจัยนี้มีการศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยปุ๋ยในโตรเจนด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบ ได้แก่ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง และ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของฮิกูชิ พบว่าการปลดปล่อยในโตรเจนจากวัสดุแอรโอเจลสอดคล้องกับทุกรูปแบบของ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อย ผลการทดลองพบว่าค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่งมีค่าต่ำสุด คือ 0.2713 ต่อวัน สำหรับปุ๋ยยูเรียปลดปล่อยช้าในรูปแบบแอรโอเจล T2 ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำกว่าวัสดุแอรโอเจลในกรณีที่ไม่มีการเติมทัลคัม T0 ผลการทดลองอธิบายได้ว่าการเติมทัลคัมส่งผลต่อการปลดปล่อยในโตรเจนจากปุ๋ยแอรโอเจลอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยในโตรเจนในรูปแบบของแอรโอเจลสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของปุ๋ยปลดปล่อยช้าได้มากขึ้น

คำสำคัญ: ปุ๋ยปลดปล่อยช้า แอรโอเจล อัลจิเนต ทัลคัม สารเชิงประกอบ

คำนำ

ในปัจจุบันความต้องการอาหารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่ทางการเกษตรซึ่งเป็นแหล่งผลิตอาหารที่สำคัญนั้นกลับลดลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของชุมชนเมืองที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และก้าวรุกรุกล้ำพื้นที่ทางการเกษตรอย่างรวดเร็ว (Tilmana *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2021) ดังนั้นการผลิตพืชทางการเกษตรจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ปัจจัยทางการเกษตร เช่น ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตและควบคุมคุณภาพผลผลิตทางการเกษตร โดยการใช้ปุ๋ยเคมีได้อย่างเหมาะสมจะสามารถลดการตกค้างของสารทางการเกษตรที่อาจนำไปสู่การก่อมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดโรคต่อเกษตรกรและผู้บริโภค อย่างไรก็ตามในปัจจุบันพบว่าเกษตรกรมีการใช้ปุ๋ยเกินความจำเป็นในปริมาณสูง (Millar *et al.*, 2014) จึงจะเป็นสาเหตุให้เกิดการตกค้างของสารเคมีทางการเกษตรทั้งการตกค้างในดินและลงสู่แหล่งน้ำของชุมชนเกษตรกรก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำกับชุมชนเกษตรกรในระยะยาวอีกด้วย ดังนั้นแนวทางในการใช้ปุ๋ยให้เกิดประสิทธิภาพ เช่น การแบ่งการใส่ปุ๋ยตามความต้องการของพืช หรือการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยหรือปลดปล่อยช้า จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของปุ๋ยที่ให้กับพืช (นิษฐา, 2560) ซึ่งสามารถลดต้นทุนในกระบวนการ

ผลิตทางการเกษตรโดยตรง รวมถึงลดมลพิษที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนทางการเกษตรอีกด้วย ในปัจจุบันชุมชนเมืองมีแนวโน้มให้ความสนใจในการทำการสวนเกษตรมากขึ้น โดยเฉพาะจากเหตุการณ์ระบาดของโรคโควิด-19 ทำให้ประชาชนต้องใช้เวลาในการทำงานที่บ้านมากขึ้น จึงเล็งเห็นความสำคัญในการปลูกผักสวนครัว ไม้ดอกและไม้ประดับประเภทต่างๆ ในอาคารบ้านเรือนหรืออาคารชุดที่พักอาศัย เพื่อเสริมสร้างสภาวะแวดล้อมให้น่าอยู่อาศัย แต่บุคคลเหล่านี้ไม่มีทักษะในการดูแลปลูกพืช เช่น การให้ปุ๋ยและน้ำอย่างไรให้พอเหมาะ ดังนั้นถ้ามีผลิตภัณฑ์ที่ตอบโจทย์ในการใช้ประโยชน์ เช่น ให้ครั้งเดียวพืชสามารถอยู่รอดได้ 1-2 สัปดาห์

ดังนั้นหากสามารถผลิตเม็ดปุ๋ยที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยปริมาณธาตุอาหารได้อย่างเหมาะสมและสามารถเก็บกักความชื้นไว้ได้ในระยะเวลาหนึ่ง อีกทั้งมีรูปลักษณะภายนอกที่สวยงามแตกต่างไปจากปุ๋ยในรูปแบบเดิมๆ ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ที่ต้องทำสวนเกษตรในชุมชนเมือง

โซเดียมอัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพไม่เป็นพิษ สลายตัวได้ตามธรรมชาติ มีความสามารถในการเก็บกักน้ำ และมีราคาถูก ในปัจจุบันโซเดียมอัลจิเนตถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น ด้านบรรจุภัณฑ์ (De Oliveira Filho *et al.*, 2019)

ด้านอาหาร (Wang *et al.*, 2018) ด้านการแพทย์ (Soumia *et al.*, 2020) ด้านเทคโนโลยีตรวจจับ (Márquez *et al.*, 2017) ด้านสิ่งแวดล้อม (Sangjan *et al.*, 2019; Sangjan *et al.*, 2020) และด้านการเกษตร (Shen *et al.*, 2020)

ทัลคัม (Talcum) หรือ ทัลค (Talc) เป็นสารประกอบของแมกนีเซียมซิลิเกต ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ประกอบด้วย ซิลิกา แมกนีเซียมออกไซด์ และน้ำ มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความพรุนสูง ทนทานต่อการด่าง และมีสภาพพื้นผิวแบบไฮโดรโฟบิก

งานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งมั่นที่จะสังเคราะห์และศึกษาวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพโซเดียมอัลจิเนตร่วมกับแร่ทัลคัมมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการเป็นปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้า เนื่องจากทั้งโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมมีโครงสร้างโมเลกุลแสดงความเป็นประจุลบมีแนวโน้มในการสร้างพันธะกับโมเลกุลของแอมโมเนียมในปุ๋ยยูเรียเพื่อใช้ในการปลดปล่อยไนโตรเจน อีกทั้งในส่วนของสมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพเหล่านี้มีความสามารถในการเก็บกักน้ำภายในเม็ดสารเชิงประกอบ จึงสามารถช่วยลดอัตราการสูญเสียน้ำจากการระเหยได้อีกทางหนึ่งด้วย อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับหน้าดิน จึงเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยสารเคมีในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดการสูญเสียน้ำปุ๋ยอย่างไร้ประโยชน์ โดยงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าโดยใช้วัสดุเชิงประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตร่วมกับทัลคัมในรูปแบบวัสดุแอโรเจล โดยจะทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมอัลจิเนตต่อทัลคัมต่ออัตราการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย จากผลการศึกษาปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าระหว่างโซเดียมอัลจิเนตร่วมกับทัลคัมในรูปแบบไฮโดรเจลพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ (S.Sangjan *et al.* 2021) งานวิจัยนี้สังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตร่วมกับทัลคัมในรูปแบบ

วัสดุแอโรเจลโดยคาดหวังว่าปุ๋ยแอโรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นจะสามารถควบคุมอัตราการปลดปล่อยและสามารถเพิ่มมูลค่าให้ปุ๋ยที่เหมาะสมสำหรับพืชเศรษฐกิจ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมวัสดุแอโรเจลของทัลคัมร่วมกับอัลจิเนต การเตรียมปุ๋ยแอโรเจลของทัลคัมร่วมกับอัลจิเนต เริ่มจากการละลายโซเดียมอัลจิเนตในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นเติมทัลคัมลงไปโดยอัตราส่วนของอัลจิเนตต่อทัลคัม ดังแสดงดัง Table 1 หลังจากนั้นนำมาผสมกับยูเรีย 20 กรัม กวนจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นขึ้นรูปเป็นเม็ด แล้วนำไปแช่ลงใน CaCl_2 6 % โดยมวล ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สุดท้ายนำเม็ดเจลที่ผ่านการแช่แข็งไปผ่านกระบวนการอบแห้งเยือกแข็ง (Freeze-dried) จะได้เป็นวัสดุแอโรเจลของทัลคัมร่วมกับอัลจิเนตจะใส่ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าจากวัสดุแอโรเจลของทัลคัมร่วมกับอัลจิเนต

2. ศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของสารเชิงประกอบแอโรเจล

- ศึกษาโครงสร้างพันธะทางเคมีด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) บริษัท Perkin Model รุ่น Spectrum GX ตรวจวัดค่าการส่องผ่านแสงตั้งแต่เลขคลื่น 600-3600 ต่อเซนติเมตร ด้วยอัตรา 8 รอบต่อนาทีเพื่อวิเคราะห์หาหมู่ functional โดยศึกษาจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในสารเชิงประกอบ

- ศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกด้วย X-ray Diffractometer (XRD) บริษัท Rigaku รุ่น MiniflexII ทำการสแกนที่มุม $10 - 60$ องศา ด้วยอัตราเร็ว 4 องศาต่อนาที เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารเชิงประกอบ

3. ศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อย การศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยโดยการนำเม็ดปุ๋ยแอมโรเจลที่ทำการบรรจุเรียบร้อยแล้ว ปริมาณ 20 กรัม แช่ในน้ำกลั่น 200 มล. หลังจากนั้นเก็บตัวอย่าง 1 มล. เป็นเวลา 2 วัน นำน้ำตัวอย่างมาหาปริมาณยูเรียจากค่าการส่องผ่านแสงด้วยเครื่อง FT-TR หรือค่าการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี โดยการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายยูเรียและค่าการส่องผ่านแสงหรือค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นนำปริมาณยูเรียที่ปลดปล่อยในช่วงเวลาต่างๆ โดยทำการทดสอบการปลดปล่อยในแต่ละตัวอย่างซ้ำ 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาศึกษาจากค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยด้วยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เช่น จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ (Zero-order kinetic model) จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง (First-order kinetic model) จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi (Higuchi kinetic model) (He *et al.*, 2015; Madusanka *et al.*, 2017; Patel *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2020)

จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์

$$\frac{W_t}{W_\infty} = k_0 t$$

จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง

$$\frac{W_t}{W_\infty} = 1 - e^{-k_1 t}$$

หรือ

$$\ln(W_\infty / (W_\infty - W_t)) = k_1 t$$

จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi

$$\frac{W_t}{W_\infty} = k_H t^{1/2}$$

เมื่อ W_t และ W_∞ คือมวลของยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลาใดๆ และที่เวลาสุดท้ายหน่วย กรัม ตามลำดับ k_0 k_1 และ k_H คือ ค่าคงที่การปลดปล่อยของจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง และจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi ตามลำดับ

Table 1 Sodium alginate and talcum ratio in aerogel composites

sample	Sodium alginate(g)	Talcum(g)
T0	10	0
T1	10	1
T2	10	2
T5	10	5
T10	10	10
T30	10	30

ผลและวิจารณ์

1. การศึกษาโครงสร้างพันธะทางเคมีและโครงสร้างผลึกของวัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างของบิวาปลดปล่อยช้า

โดยการศึกษาโครงสร้างพันธะทางเคมีวัสดุที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นบิวาในโตรเจนปลดปล่อยช้า คือ โซเดียมอัลจิเนตและทัลคัม โดยใช้วิธีการศึกษาจากค่าการส่องผ่านแสง (FT-IR) ซึ่งเป็นการศึกษาจากการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดในโครงสร้างพันธะทางเคมีที่ต่างกัน แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างพันธะทางเคมีของโซเดียมอัลจิเนต ทัลคัม และสารเชิงประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัม ดัง Table 1 พบว่าโซเดียมอัลจิเนตแสดงการสั่นของพันธะ

carboxylate group (C=O)จากการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 1604 และ 1408 cm^{-1} ส่วนทัลคัมแสดงการสั่นของโครงสร้างพันธะในกลุ่ม Siloxane group (Si-O-Si) ที่เลขคลื่น 1040 cm^{-1} และโครงสร้างพันธะ Si-O-Mg แสดงการสั่นที่เลขคลื่น 677 cm^{-1} และโครงสร้างพันธะทางเคมีของสารเชิงประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมแสดงให้เห็นโครงสร้างพันธะโดยรวมระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมโดยที่ไม่แสดงโครงสร้างพันธะใหม่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าการรวมตัวของโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมเป็นการรวมตัวในรูปแบบของสารเชิงประกอบเท่านั้น โดยไม่ก่อให้เกิดโครงสร้างในรูปแบบใหม่ที่แตกต่างจากโครงสร้างเดิม สำหรับการศึกษาคโครงสร้าง

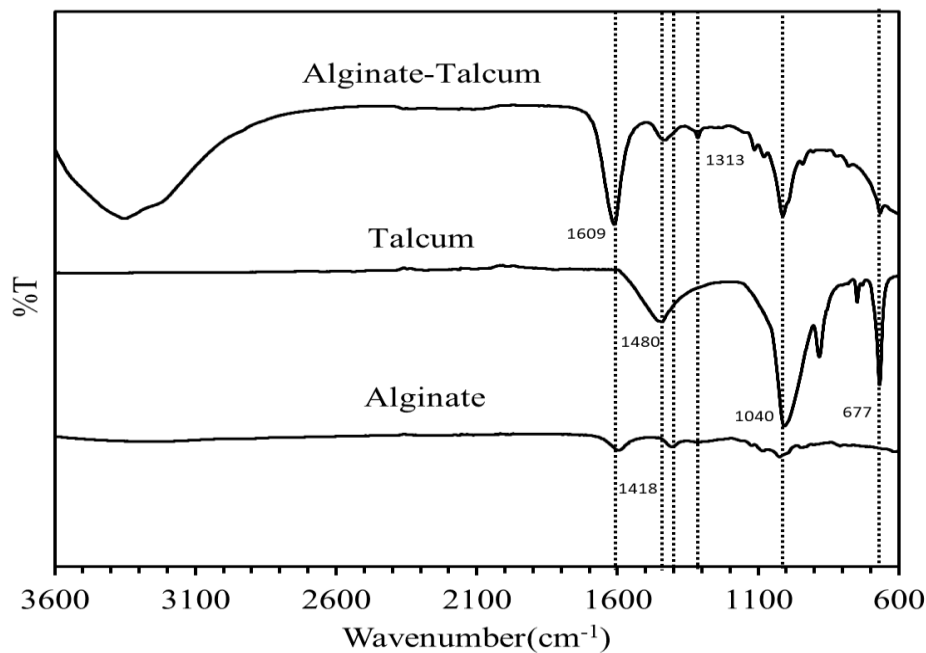


Figure 1 Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) spectra of Alginate, Talcum, and Alginate-Talcum composite

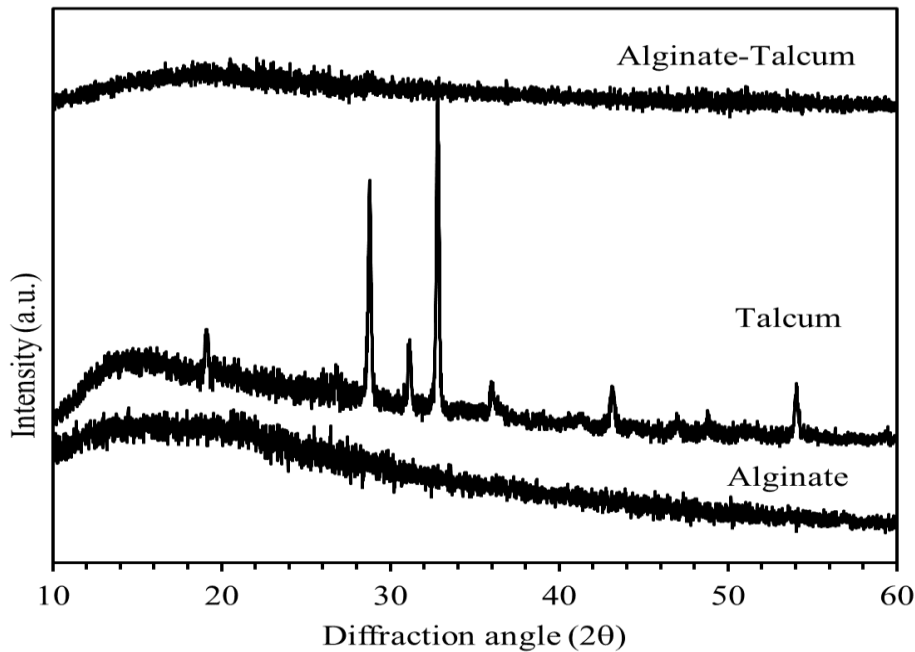


Figure 2 The X-ray diffraction (XRD) pattern of Alginate, Talcum, and Alginate-Talcum composite (T2)

ความเป็นผลึกของโซเดียมอัลจิเนต ทัลคัม และสารเชิงประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัม แสดงดัง Table 2 พบว่า โซเดียมอัลจิเนตแสดงโครงสร้างเป็นอสัณฐานหรือไม่มีความเป็นผลึก เนื่องจากไม่แสดงตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ส่วนทัลคัมแสดงตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อย่างชัดเจนโดยพบตำแหน่งการเลี้ยวเบนอย่างชัดเจนที่มุมการเลี้ยวเบน 28.80, 35.98 และ 43.18 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างผลึกของ SiO_2 , MgO และ Fe_2O_3 ตามลำดับ (Swietlicki, M., *et al.*, 2020; Balakrishnan, G., *et al.*, 2020; Sirega, J., *et al.*, 2019) ส่วนโครงสร้างผลึกของสารเชิงประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัม พบว่า โครงสร้างไม่เป็นผลึกทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของทัลคัมถูกรวมคลุมไว้ด้วยโซเดียมอัลจิเนตที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพนั่นเอง

2. ศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อย

อัตราการปลดปล่อยยูเรียของปุ๋ยแอมโรเจลปลดปล่อยช้าศึกษาจากการวัดปริมาณ

ยูเรียด้วยการวัดจากค่าการส่องผ่านแสงจากสารละลายตัวอย่างในช่วงระยะเวลาการปลดปล่อย 2 วัน แสดงดัง Table 3 หลังจากนั้นนำมาศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยในรูปแบบต่างๆ คือ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi

การศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ ของสารประกอบแอมโรเจลของปุ๋ยยูเรียที่มีวัสดุเกาะยึดเป็นโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมในรูปแบบแอมโรเจล ด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{W_t}{W_\infty}$ และระยะเวลาในการปลดปล่อย แสดงดังรูปที่ 4 หลังจากนั้นพิจารณาเส้นแนวโน้มของกราฟในรูปแบบของกราฟเส้นตรงแล้วพิจารณาสมการของเส้นแนวโน้ม โดยค่าความชันของกราฟจะแสดงค่าคงที่อัตราการการปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ของปุ๋ยยูเรียในรูปแบบแอมโรเจล ในทำนองเดียวกัน การศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง ก็สามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(W_\infty/(W_\infty - W_t))$

กับเวลาในการปลดปล่อย แสดงดัง Table 5 และ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{W_t}{W_\infty}$ กับ รากที่สองของเวลา ในการปลดปล่อย แสดงดัง Table 6 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ ค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง และค่าคงที่การปลดปล่อยของ Higuchi แสดงดัง Table 2 พบว่าอัตราการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียที่ศึกษาจากจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยในทุกรูปแบบให้ผลที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ เม็ดปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรตที่มีการเติมทัลคัมใน ปริมาณที่เล็กน้อยคือ T1 และ T2 จะทำให้อัตรา การปลดปล่อยยูเรียเกิดขึ้นได้ช้ากว่าในกรณีที่ใช้ โซเดียมอัลจิเนตเพียงอย่างเดียว โดยหากพิจารณา จากจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง พบว่าอัตราการปลดปล่อยยูเรียของ T1 และ T2 มี อัตราการปลดปล่อยลดลงจาก T0 คิดเป็นร้อยละ 17.79 และ 32.51 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าทัลคัม ส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียอย่างมี นัยสำคัญ โดยเฉพาะปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต T2 แสดงค่าคงที่ อัตราการปลดปล่อยต่ำที่สุดแสดงให้เห็นถึง ความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดี ที่สุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเติมทัลคัมลงใน ปริมาณที่เล็กน้อยส่งผลให้มีความสามารถในการ ยึดเกาะโมเลกุลของแอมโมเนียมเพิ่มขึ้นจึงสามารถ ชะลอการปลดปล่อยยูเรียในรูปของแอมโมเนียมได้ดี เนื่องจากแร่ทัลคัมมีโครงสร้างในรูปแบบของแอนอิออน $Si_4O_{10}^{4-}$ ซึ่งมีความสามารถในการสร้างพันธะ ในการยึดเกาะกับแอมโมเนียมไอออนซึ่งเป็นผลจาก การแตกตัวของยูเรีย ซึ่งเป็นกลไกเดียวกับการดูด ชั้บแอมโมเนียมในโครงสร้างของวัสดุประเภทซี โอไลท์ที่องค์ประกอบโครงสร้างซิลิเกต เช่นกัน

(Huang *et al.*, 2015) อีกทั้งการเติมทัลคัมลงใน โครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตส่งผลต่อความ แข็งแรงของเม็ดปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต จากงานวิจัยของ Ammar และคณะ (2017) ประยุกต์ใช้ทัลคัมเป็น สารเติมแต่งในการทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรงให้ พอลิเมอร์ ดังนั้นการเติมทัลคัมลงในอัลจิเนตส่งผล ให้เม็ดปุ๋ยมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทำให้การแทรกตัว ของโมเลกุลของน้ำเข้าไปในโครงสร้างปุ๋ยแอมโมเนียม ไนเตรตเป็นไปได้อย่างช้าส่งผลให้การสลายตัวของ โครงสร้างโซเดียมอัลจิเนตเกิดได้ช้ายิ่งขึ้น จึง ส่งผลให้การปลดปล่อยโมเลกุลของปุ๋ยเกิดขึ้นได้ช้า ลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง T0 ที่ปราศจาก ทัลคัมนั้นส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะ ยูเรียเกิดขึ้นได้น้อยลงหรือในทางกลับกันคือส่งผล ให้อัตราการปลดปล่อยยูเรียเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณทัลคัมในปุ๋ย แอมโมเนียมไนเตรตสูงขึ้นไปกล่าวคือในตัวอย่างของ T5-T30 กลับพบว่าค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากผลดังกล่าว อธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณทัลคัมที่มากเกินไป นั้นส่งผลให้ความสามารถการขึ้นรูปเม็ดปุ๋ยแอมโม นีเนียมไนเตรตให้เกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอขึ้นเป็นไปได้อย่าง ช้า ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตในแต่ละตัวอย่าง นั้นมีปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งหากปริมาณของแร่ทัลคัม มีปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้การขึ้นรูปเกิดขึ้นได้ ช้าและส่งผลต่อความแข็งแรงของเม็ดปุ๋ยแอมโมเนียม ไนเตรตซึ่งหากโครงสร้างของเม็ดปุ๋ยมีความบวมพร่องหรือ ความไม่สม่ำเสมอในการรวมตัวของสารเชิง ประกอบก็จะนำไปสู่การปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียก็จะมี อัตราที่เร็วขึ้นตามมาด้วย ในส่วนของตัวอย่างปุ๋ย T0 ที่เป็นเม็ดปุ๋ยที่ปราศจากแร่ทัลคัมซึ่งก็พบว่า อัตราการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกัน

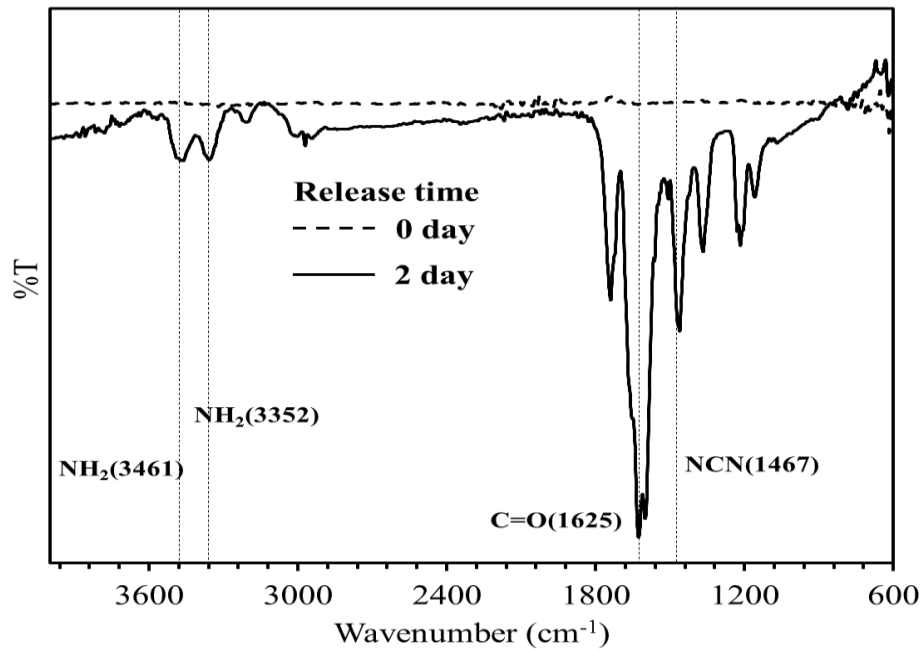


Figure 3 The urea release of slow release fertilizer aerogel bead by FT-IR spectra (T2)

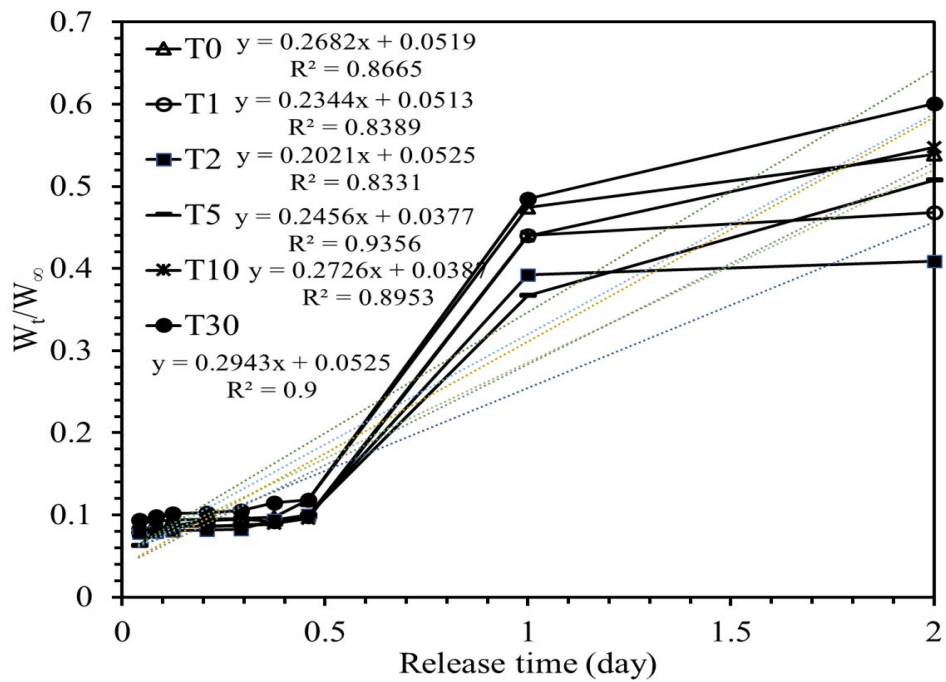


Figure 4 Zero-order kinetic model plot for the release of urea fertilizer

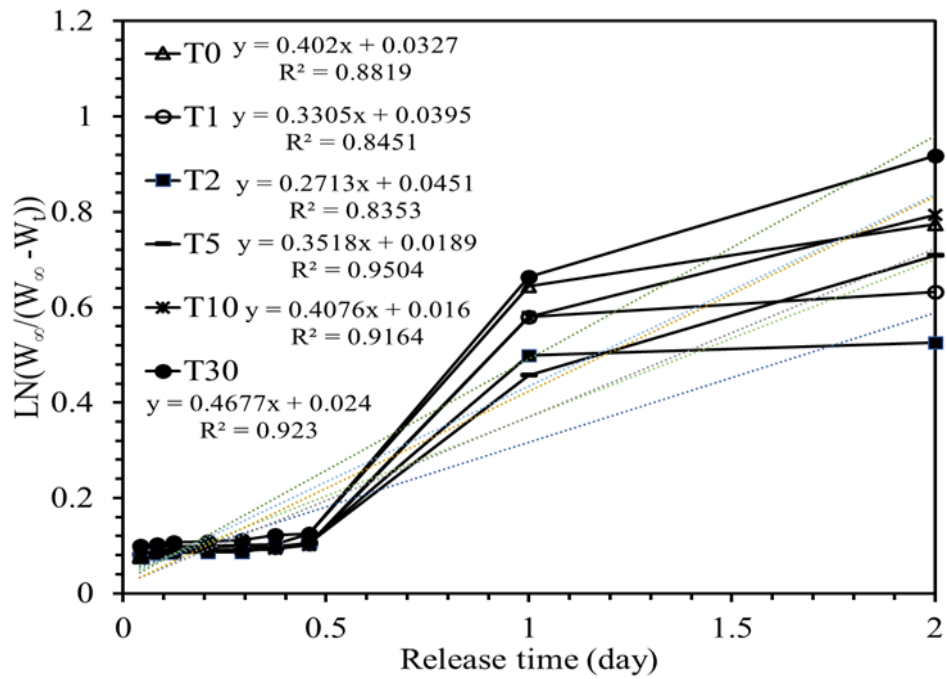


Figure 5 First-order kinetic model plot for the release of urea fertilizer

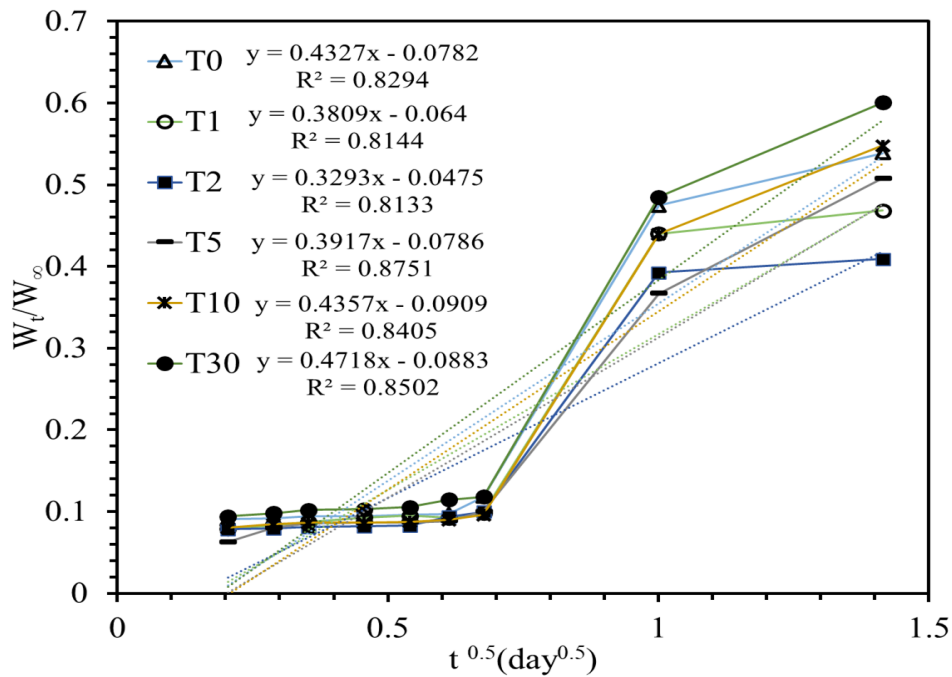
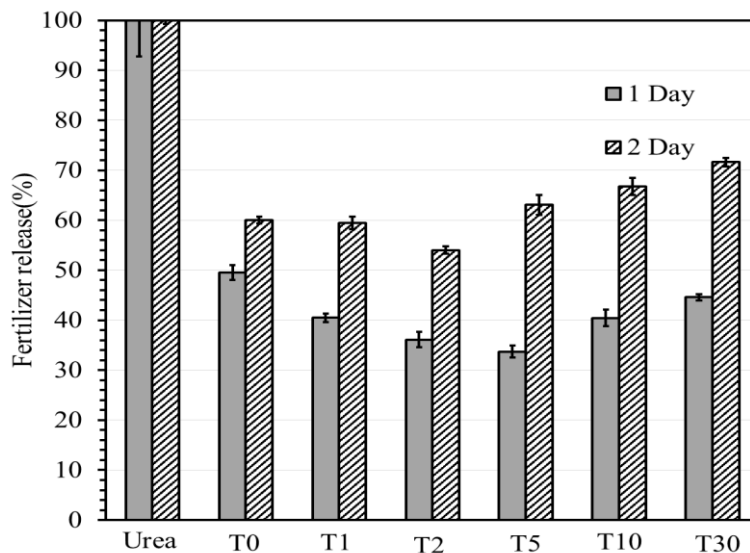


Figure 6 Higuchi kinetic model plot for the release of urea fertilizer

Table 2 Summary of kinetic parameters obtained by Zero-order, First-order, and Higuchi model for the release of urea fertilizer, respectively

sample	$K_0(\text{day}^{-1})$	R^2	$k_1(\text{day}^{-1})$	R^2	$k_H(\text{day}^{-1})$	R^2
T0	0.2682	0.8665	0.402	0.8819	0.1872	0.8294
T1	0.2344	0.8389	0.3305	0.8451	0.1450	0.8144
T2	0.2021	0.8331	0.2713	0.8353	0.1084	0.8133
T5	0.2496	0.9355	0.3518	0.9504	0.1534	0.8751
T10	0.2726	0.8953	0.4076	0.9164	0.1894	0.8405
T30	0.2943	0.9	0.4677	0.923	0.2225	0.8502

**Figure 7** The urea release rate comparison of slow release fertilizer aerogel beads for 1 and 2 day

การวัดค่าการปลดปล่อยไนโตรเจนจากปุ๋ยแอโรเจลประเภท T0-T30 สามารถหาได้จากการวัดค่ามวลของยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลาใดๆ (W_t) เปรียบเทียบกับปริมาณยูเรียทั้งหมด (W_∞) หลังจากนั้นนำมาคำนวณร้อยละการปลดปล่อยปุ๋ยดังสมการ

$$\text{Fertilizer release (\%)} = \left(\frac{W_t}{W_\infty} \right) \times 100$$

จากการศึกษาค่าการปลดปล่อยไนโตรเจนจากปุ๋ยแอโรเจลประเภท T0-T30 ในช่วงเวลา 2 วัน แสดงดัง Table 7 จากผลการทดลองพบว่าปุ๋ยยูเรียในรูปแบบที่เป็นผงสามารถละลายหมดในระยะเวลาสั้นกว่า 0.5 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อนำมาวัดปริมาณไนโตรเจนเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน พบว่าปุ๋ยยูเรียมีการปลดปล่อย

ไนโตรเจนทั้งหมดออกมาหรือคิดเป็น 100% ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ในขณะที่ปุ๋ยแอโรเจลที่มีเพียงอัลจินต (T0) มีการปลดปล่อยไนโตรเจนประมาณ 50% ในวันแรก และมีการปล่อยไนโตรเจนประมาณ 60% ในวันที่สอง และเมื่อมีการเติมทัลคัมในวัสดุควบคุมการปลดปล่อยในอัตราส่วนทัลคัมต่อโซเดียมอัลจินต 1:10 (T1) และ 2:10 (T2) พบว่าปริมาณไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยในวันแรกลดลงเป็น 40% และ 37% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมทัลคัมลงในวัสดุสำหรับควบคุมการปลดปล่อยโซเดียมอัลจินตสามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาในการปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนได้นานขึ้น

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าด้วยการนำวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์ชีวภาพโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเก็บกักยูเรียด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบแอโรเจลจากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีพบว่าวัสดุผสมระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลที่มีประจุลบจึงมีความสามารถในการเกาะยึดของธาตุไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมอิออน ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยปุ๋ย โดยพบว่าปุ๋ยแอโรเจลปลดปล่อยช้าที่มีส่วนผสมระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมนั้นสามารถชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยได้นานกว่าปุ๋ยแอโรเจลที่มีเฉพาะโซเดียมอัลจิเนตเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้วัสดุผสมระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและทัลคัมในรูปแบบของวัสดุแอโรเจลมีศักยภาพในการทำหน้าเป็นปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้า

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยมุ่งเป้าวิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีงบประมาณ 2564 รหัส KPS-RDI 2021-018

เอกสารอ้างอิง

นิษฐา กุหะธรรมคุณ และสายันต์ แสงสุวรรณ. (2560). ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยูเรียเพื่อประยุกต์ใช้ในทางเกษตรกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 19, 32-42.

Ammar, O., Bouaziz, Y., Haddar, N. & Mnif, N. (2017) Talc as Reinforcing Filler in Polypropylene Compounds: Effect on Morphology and Mechanical Properties. *Polym Sci.* 3, 1-8

- Balakrishnan, G., Velavana, R., Khalid Mufasa Batoob & Emad H. Raslan. (2020). Microstructure, optical and photocatalytic properties of MgO nanoparticles. *Results in Physics.* 16, 103013
- De Oliveira Filho, J. G. , Rodrigues, J. M. , Fernandes Valadares, A. C. , de Almeida, A.B., de Lima, T.M., Takeuchi, K. P. , Fernandes Alves, C. C. , de Figueiredo Sousa, H.A., da Silva, E.R., Dyszy, F.H., Egea, M. B. (2019). Active food packaging: Alginate films with cottonseed protein hydrolysates, *Food Hydrocolloids.* 92, 267-275.
- He, Y., Wu, Z., Tu, L., Han, Y., Zhang, G. & Li, C. (2015). Encapsulation and characterization of slow-release microbial fertilizer from the composites of bentonite and alginate. *Applied Clay Science,* 109-110, 68-75
- Huang, H., YangQiang, L., LiuLi, X. & Ding, H. (2015) Removal of ammonium from swine wastewater by zeolite combined with chlorination for regeneration. *Journal of Environmental Management,* 160, 333-341.
- Madusanka, N., Sandaruwan, C., Kottegoda, N., Sirisena, D., Munaweera, I., De Alwis, A., Karunaratne V. & Amaratunga Gehan A.J. (2017). Urea-hydroxyapatite-montmorillonite nanohybrid composites as slow release nitrogen compositions. *Applied Clay Science,* 150, 303-308.

- Márquez, A., Jiménez-Jorquera, C., Domínguez, C. & Muñoz-Berbel, X. (2017). Electrodepositable alginate membranes for enzymatic sensors: An amperometric glucose biosensor for whole blood analysis. *Biosensors and Bioelectronics*, 97, 136-142
- Millar, N., Doll, J. E. and Robertson, G. P. (2014). Climate Change and Agriculture. Fact Sheet Series—MSU Extension Bulletin, 3152, 1-5.
- Patel, S., Bajpai, A.K., Bajpai, J., Kumar, R. Saini & Acharya, S. (2017). Facile preparation of iron loaded calcium alginate nanocarriers and study of controlled release of iron. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 5337-5346.
- Sangjan, S. & Ponsanti, K.. (2019). Adsorption and Photocatalytic Kinetic of Wastewater Treatment by Photocatalyst-Alginate/Polyvinyl Alcohol Composite Beads. *Solid State Phenomena*, 287, 69-74.
- Sangjan, S. & Thongsamer, W. (2020). Application of Photocatalytic and Adsorption Process for Residue Organic Degradation Using Doped ZnO Composites Hydrogel Beads. *Key Engineering Materials*, 858, 109-115.
- Sangjan, S., & Thongsamer, W. (2021). Facile Fabrication of N-Slow Release Fertilizer Hydrogel Beads by Alginate-Based Composites. *Key Engineering Materials*, 889, 91–97.
- Siregaru, J., Sebayangl, K., Yulianto, B., & Humaidi, S., (2019) XRD Characterization of Fe₃O₄-ZnO Nanocomposite Material by the Hydrothermal Method. *The 1st International Conference on Physics and Applied Physics (The 1st ICP&AP) AIP Conf. Proc.* 2221, 110008-1-110008-4; <https://doi.org/10.1063/5-0003210> Published by AIP Publishing. 978-0-7354-1980-3/S30.00
- Shen, Y., Wang, H., Li, W., Liu, Z., Liu, Y., Wei, H. & Li, J. (2020). Synthesis and characterization of double-network hydrogels based on sodium alginate and halloysite for slow release fertilizers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 557-565.
- Soumia, A., Adel, M., Amina, S., Bouhadjar, B., Amal, D., Farouk, Z., Abdelkader, B. & Mohamed, S. (2020). Fe₃O₄-alginate nanocomposite hydrogel beads material: One-pot preparation, release kinetics and antibacterial activity International. *Journal of Biological Macromolecules*. 145, 466-475.
- Swietlicki, M., Chocy, D., Klepka, T., Prószyński, A., Kwasniewska, A., Borc, J., & Gładyszewski, G. (2020). The Structure and Mechanical Properties of the Surface Layer of Polypropylene Polymers with Talc Additions. *Materials*. 13, 698-711.

- Tilmana, D., Balzer, C., Hill, J. & Befort, B. L., (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 20260-20264
- Wang, J., Yang, Q., Zhang, L., Liu, M., Hu, N., Zhang, W., Zhu, W., Wang, R., Suo, Y., Wang, J. (2018). A hybrid monolithic column based on layered double hydroxide-alginate hydrogel for selective solid phase extraction of lead ions in food and water samples. *Food Chemistry*. 257, 155-162.
- Wu, C., Dan, Y., Tian, D., Zheng, Y., Wei, S. & Xiang, D. (2020). Facile fabrication of MOF(Fe)@alginate aerogel and its application for a high-performance slow-release N-fertilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 1073-1079.
- Zhang, F., Sun, Q., Mehrabadi, M., Khoshnevisan, B., Zhang, Y., Fan, X., Zhai, L., Xia, Y., Wu, M., Liu, D., Pan, J., Rafiee, S., Liu, H., (2021). Joint analytical hierarchy and metaheuristic optimization as a framework to mitigate fertilizer-based pollution. *Journal of Environmental Management*, 278, 111493