

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลธรรมชาติจากขานอ้อยสำหรับชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย: อิทธิพลของกรดที่ใช้เชื่อมขวาง

Natural carboxymethyl cellulose hydrogel from bagasse for slow-release urea fertilizers: Effect of crosslinking acids

ปรัชญา วาเทสทิ¹ และ วียารัตน์ กุมุทานา^{1*}

Prachya Watasit¹ and Wiyarat Kumutanat^{1*}

Received: 16 July 2024 ; Revised: 24 September 2024 ; Accepted: 6 November 2024

บทคัดย่อ

ขานอ้อยเป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ซึ่งในแต่ละปีจะมีปริมาณขานอ้อยเหลือทิ้งเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยขานอ้อยบางส่วนจะถูกเผาเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากขานอ้อยเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย ในขั้นตอนแรกเซลลูโลสที่สกัดได้จากขานอ้อยจะถูกสังเคราะห์เป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นทำการเชื่อมขวางของโครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้กลายเป็นวัสดุไฮโดรเจลโดยใช้กรดชนิดต่างๆ (กรดซิตริก กรดซักซินิก และกรดทาร์ทาริก) ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 %w/w สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างถูกศึกษาด้วยเทคนิค Attenuated total reflection infrared (ATR-IR) spectroscopy เทคนิค X-ray diffraction (XRD) และเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ตามลำดับ สันฐานวิทยาของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) จากการทดลองพบว่าวัสดุไฮโดรเจลปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น $1700-1722\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะเอสเทอร์ที่เกิดจากการเชื่อมขวางของโครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และข้อมูลทางสันฐานวิทยาบ่งบอกได้ว่ายูเรียถูกดูดซับบนพื้นผิวของไฮโดรเจล ผลการทดสอบการบวมพบว่าการใช้ปริมาณกรด 1%w/w ในการเชื่อมขวาง ให้ผลการบวมมากกว่าการใช้ปริมาณกรด 3 และ 5 %w/w ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการปลดปล่อยยูเรีย โดยวัสดุไฮโดรเจลที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรด 1 %w/w ช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้มากกว่าการใช้กรด 3 และ 5 %w/w นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กรดซักซินิก 1 %w/w ในการเชื่อมขวางสามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าการใช้กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก ผลการศึกษาปริมาณความชื้นในดินบ่งบอกได้ว่าหลังจากปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียแล้ววัสดุไฮโดรเจลยังสามารถช่วยรักษาความชื้นในดินได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาขานอ้อยเป็นวัสดุไฮโดรเจลสำหรับชะลอการปลดปล่อยยูเรียในทางการเกษตร

คำสำคัญ: ขานอ้อย, ไฮโดรเจล, ยูเรียปลดปล่อยช้า, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, การเชื่อมขวางด้วยกรด

Abstract

Sugarcane bagasse is an agricultural waste obtained from sugar industries. Each year, there is a large amount of abandoned bagasse occurring. When bagasse waste is burned to generate electric power, it leads to environmental impact. Accordingly, the objective of this research is to study the preparation of hydrogels from bagasse to be used as materials for the slow release of urea. In the first step, the extracted cellulose from bagasse was synthesized into carboxymethyl cellulose. Then carboxymethyl cellulose was crosslinked to hydrogel materials using various types of acids (citric acid, succinic acid and tartaric acid) at concentrations of 1, 3 and 5 %w/w. Chemical and physical properties

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

* Corresponding author: Email wiyarat.kum@rru.ac.th

of the samples were studied by Attenuated total reflection infrared (ATR-IR) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and Thermogravimetric analysis (TGA) technique, respectively. The results showed the hydrogel materials presented infrared absorption at wavenumber in the range $1700\text{--}1722\text{ cm}^{-1}$ corresponding to the vibration of ester bonds occurring from crosslinking of carboxymethyl cellulose structures. The X-ray diffraction pattern and morphological information indicated that urea was adsorbed on the surface of the hydrogel. The results of water swelling suggest that the hydrogel obtained from crosslinking with 1 %w/w of acid provided a higher water swelling than using 3 and 5 %w/w of acid crosslinking. This result is relative to the slow release of urea; found that the hydrogel materials, which were crosslinked by 1 %w/w of acid, can slow up the release of urea better than the hydrogel obtained from 3 %w/w and 5 %w/w acid crosslinking. In addition, the hydrogel obtained from 1 %w/w succinic acid crosslinking can slow up the release of urea better than the hydrogel obtained from citric and tartaric crosslinking. The results of moisture in soil indicated that after completely releasing urea, the hydrogel material can also maintain the moisture in soil. Therefore, it is appropriate to develop bagasse into hydrogel materials to slow the release of urea in agriculture.

Keywords: Bagasse, hydrogel, slow-release urea, carboxymethyl cellulose, acid crosslink

บทนำ

ขานอ้อยเป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น โรงงานผลิตน้ำตาล ซึ่งหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลจะมีขานอ้อย (sugarcane bagasse) เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่ขานอ้อยจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า (Wibowo *et al.*, 2024) จากการศึกษาพบว่าขานอ้อยมีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 41-55 (Teixeira *et al.*, 2015) ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะนำขานอ้อยมาพัฒนาเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถนำเซลลูโลสที่ได้จากธรรมชาติมาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล (hydrogel) เพื่อใช้เป็นวัสดุกักเก็บความชื้นได้ (Ban *et al.*, 2022) โดยสารไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างตาข่ายสามมิติที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก ด้วยคุณสมบัติที่ดีนี้จึงทำให้วัสดุไฮโดรเจลถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น ใช้เป็นวัสดุอุ้มน้ำในภาคการเกษตร ใช้สำหรับช่วยควบคุมการปลดปล่อยยา และใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ (Antony *et al.*, 2024)

ในปัจจุบันปุ๋ยเคมีมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มสารอาหารให้มีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชแต่ละชนิด ในแต่ละปีพบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าปุ๋ยเคมีจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยที่เป็นธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ปุ๋ยยูเรีย ที่ช่วยเพิ่มธาตุไนโตรเจน ซึ่งจำเป็นในช่วงแรกของการเพาะปลูกที่ต้องเร่งการเจริญเติบโตของพืชอย่างรวดเร็ว ทำให้พืชมีลำต้นยาว มีใบดก ใบใหญ่ ใบสีเขียวเข้ม อย่างไรก็ตามปุ๋ยยูเรียมี

คุณสมบัติในการละลายน้ำได้อย่างรวดเร็ว (นิษฐา คูหะธรรมคุณ และสายันต์ แสงสุวรรณ, 2560) ในขณะที่พืชมีความสามารถในการดูดซึมแร่ธาตุในปริมาณที่จำกัดในแต่ละวัน ดังนั้นทำให้ปุ๋ยยูเรียที่ไม่ถูกดูดซึมจะเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย (NH_3) ระเหยสู่บรรยากาศ หรือถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอยู่ในรูปของสารประกอบไนเตรท (NO_3^-) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศใกล้เคียง (Swify *et al.*, 2024) ดังนั้นการพัฒนาปุ๋ยที่ช่วยชะลอการปลดปล่อยแร่ธาตุได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยในปัจจุบันมีหลายๆ งานวิจัยให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับการชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย โดยการใช้สารเคลือบชนิดต่างๆ เช่น กำมะถัน (Ali *et al.*, 2022) เรซินหรือเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Bilal *et al.*, 2020) และสารไฮโดรเจล (Hnoosong *et al.*, 2021, Cheng *et al.*, 2018) โดยในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพัฒนาขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นไฮโดรเจลชีวภาพเพื่อชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย ซึ่งไฮโดรเจลชีวภาพมีข้อดีคือเมื่อใช้ปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียหมดแล้ว วัสดุชนิดนี้สามารถช่วยกักเก็บความชื้นในดิน นอกจากนี้ไฮโดรเจลจากขานอ้อยยังสลายตัวได้ง่ายในธรรมชาติโดยไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Olad *et al.*, 2018)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเปรียบเทียบชนิดของกรดและปริมาณของกรดที่ใช้ในการเชื่อมขวางโครงสร้างคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส ที่ส่งผลต่อการชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความสามารถในการกักเก็บความชื้นในดินของวัสดุไฮโดรเจลอีกด้วย

การทดลอง

1. อุปกรณ์และสารเคมี

วัสดุฐานอ้อยที่ได้จากพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา, กรดโมโนคลอโรอะซิติก (Sigma-Aldrich), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Univar), กรดซัคซินิก (Kemaus), กรดซิตริก (Kemaus), กรดทาร์ทาริก (Kemaus), เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (VELP SCIENTIFICA) เครื่องวัด pH (Innovation Beyond 2000, INDEX) และเครื่องปั่นละเอียด (HR2056, PHILIPS)

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ล้างฐานอ้อยด้วยน้ำสะอาด จากนั้นหั่นฐานอ้อยเป็นชิ้นเล็กๆ อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

2.2 การสกัดเซลลูโลสจากฐานอ้อย

ชั่งฐานอ้อย 35 กรัม เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10 %w/v ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ล้างเยื่อเซลลูโลสด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เป็นกลาง อบเยื่อเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วันปั่นเยื่อให้ละเอียด แล้วแช่เยื่อในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 5 %v/v ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน ล้างเยื่อด้วยน้ำกลั่น และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ปั่นเยื่อเซลลูโลสให้ละเอียดอีกครั้ง แล้วเก็บไว้ในโถสุญญากาศ และคำนวณหาผลผลิตร้อยละของผงเซลลูโลส ผลผลิตร้อยละเซลลูโลส = $(W_B/W_A) \times 100$

เมื่อ W_A และ W_B คือ น้ำหนักฐานอ้อยและน้ำหนักเซลลูโลส ตามลำดับ

2.3 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

แช่ผงเซลลูโลส 10 กรัม ในไฮโซโพรพานอล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร (ที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (30 %w/v) จำนวน 32 มิลลิลิตรผสมอยู่) เป็นเวลา 30 นาที เติมกรดโมโนคลอโรอะซิติก 12 กรัม ปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาผลผลิตร้อยละของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

$$\text{ผลผลิตร้อยละ CMC} = (W_C/W_A) \times 100$$

เมื่อ W_A และ W_C คือ น้ำหนักเซลลูโลสและน้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ

2.4 การสังเคราะห์ CMC-hydrogel

ละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 1 กรัม ใน น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เติมกรดเชื่อมขวาง (กรดซัคซินิก, กรดซิตริก และกรดทาร์ทาริก) ตามปริมาณที่กำหนด (1, 3 และ 5 %w/w) ปั่นกวนและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสอย่างต่อเนื่องจนมีลักษณะเหนียวและเหนียว เติมน้ำละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในภาชนะพิมพ์ จากนั้นอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพวัสดุไฮโดรเจล

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared (Nicolet 6700, Thermo Scientific) โดยวัดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง $4000-650 \text{ cm}^{-1}$ วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric analysis; Pyris 1, Perkin Elmer) ช่วงอุณหภูมิทดสอบ 50-700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{นาที่}$ ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; SmartLab, Rigaku) ศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวอย่างไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; Quanta 250, FEI) โดยตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งแบบการแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ก่อนวิเคราะห์

2.6 การทดสอบการบวมน้ำ

ตัดตัวอย่างไฮโดรเจลเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนักก่อนทำการทดสอบ ห่อตัวอย่างด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นแช่ในน้ำกลั่น บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบเป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60 และ 120 นาที แล้วคำนวณร้อยละการบวมน้ำ

$$\text{ร้อยละการบวมน้ำ} = ((B-A)/A) \times 100$$

เมื่อ A และ B คือ น้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจล ก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำตามลำดับ

2.7 การทดสอบการปลดปล่อยยูเรีย

ตัด CMC-hydrogel เป็นชิ้นเล็กๆ จำนวน 0.5 กรัม ใส่ในสารละลายยูเรีย 5 %w/v จำนวน 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้จน CMC-hydrogel ดูดซับละลายสารยูเรียจนหมด จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง การทดสอบปลดปล่อยยูเรียเริ่มจากแช่ตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรเจลในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายตามเวลาที่กำหนด (0.08, 0.16, 0.25, 0.5, 1, 5, 10, 30, 60,

120, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที่) วิเคราะห์ปริมาณยูเรียของสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer; UV mini 1240V, SHIMADZU) โดยตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร ตามวิธีของ Potts (1963)

2.8 การทดสอบการกักเก็บความชื้นในดิน

ผสมตัวอย่าง CMC-hydrogel 1 กรัม ในดิน 10 กรัมลงในภาชนะ บันทึกน้ำหนัก (W_1) เติมน้ำกลั่นจำนวน 10 มิลลิลิตร (W_2) จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 1 วัน จนครบ 7 วัน (W_t) แล้วคำนวณปริมาณความชื้นในดินตามสมการ

$$\text{ความชื้นในดิน (\%)} = \frac{W_2 - (W_t - W_1)}{W_1} \times 100$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การสังเคราะห์ CMC-hydrogel

การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากวัสดุขานอ้อย ขั้นตอนแรกต้องนำขานอ้อยมากำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน จากการทดลองพบว่าได้ผลผลิตเป็นเซลลูโลส 35.82% จากนั้นสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยนำเซลลูโลสที่ได้มาทำปฏิกิริยากับกรดมอนอคลอโรอะซิติก พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 25.66% ในขั้นตอนสุดท้ายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่จะถูกนำมาเชื่อมขวางโครงสร้าง (crosslink) เพื่อเตรียมเป็นวัสดุไฮโดรเจล พบว่าได้ผลผลิตร้อยละ 23.51 (Table 1) โดยจากปฏิกิริยาเคมีพบว่าโครงสร้าง CMC จะถูกเชื่อมขวางด้วยกรดผ่านการเกิดพันธะเอสเทอร์ แสดง Figure 1

Table 1 Percentage yield of products

Products	Percentage yield (%)
Cellulose	35.82
CMC	25.66
CMC-hydrogel	23.51

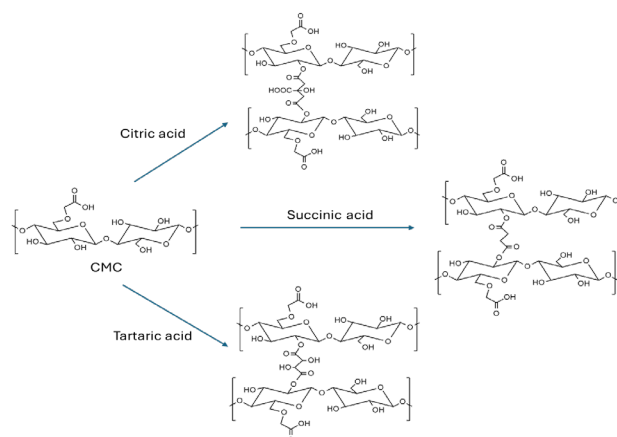


Figure 1 Crosslink reaction of carboxymethyl cellulose with acids

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารตัวอย่าง ได้แก่ ขานอ้อย เซลลูโลส CMC และ CMC-hydrogel ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Attenuated total reflection infrared (ATR-IR) spectroscopy สเปกตรัมการดูดกลืนแสงแสดงดัง Figure 2 และ 3 ตัวอย่างขานอ้อยปรากฏพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญ คือ ที่ตำแหน่ง 1726 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C=O stretching ของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่เป็นองค์ประกอบในขานอ้อย ตำแหน่ง 1631 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบต้าของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่วนตำแหน่ง 1033 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-O stretching ของโครงสร้างเซลลูโลส การดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง 3334 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H stretching ที่ตำแหน่ง 2918 และ 2821 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching แบบ asymmetric และ symmetric ตามลำดับ (Scheufele *et al.*, 2015)

ผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลสที่สกัดได้ พบการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 1641 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับในโครงสร้าง (Wulandari *et al.*, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH Group) ที่เลขคลื่น 3334 cm^{-1} ในขณะที่ตำแหน่ง 1026 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O stretching (Abdel-Halim, 2013)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่สังเคราะห์ได้ปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญ คือ ที่เลขคลื่น 1587 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่ carboxylate (Mohamood *et al.*, 2021) นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 1012 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C-O stretching (Rozali *et al.*, 2015)

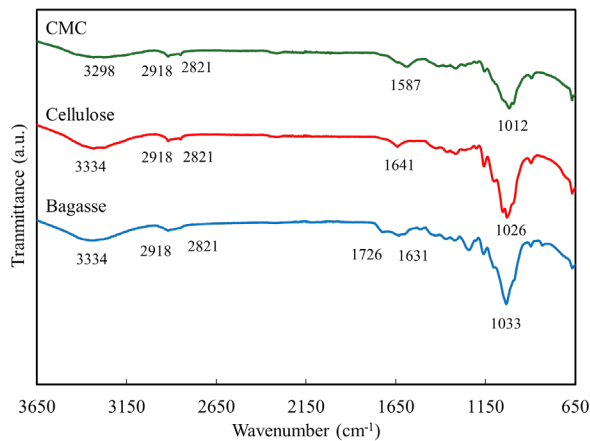


Figure 2 Infrared spectrum of bagasse cellulose and Carboxymethyl cellulose

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (CMC-hydrogel) ที่สังเคราะห์ได้จากการเชื่อมขวางโครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟอนิก, กรดซิตริก และกรดทาร์ทาริกมีผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ดังแสดงใน Figure 3 จากสเปกตรัมพบว่าโครงสร้างไฮโดรเจลทั้งสามชนิดปรากฏการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1587 cm^{-1} เช่นเดียวกันกับที่พบในโครงสร้าง CMC ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่ carboxylate อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงในช่วง $1700\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ พบว่าวัสดุไฮโดรเจลมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดมากกว่าวัสดุ CMC อาจเป็นผลมาจากการรวมกันของพีคของหมู่ฟังก์ชัน carboxylate และหมู่คาร์บอนิลของกรดที่ใช้ในการเชื่อมขวาง และพบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1722 cm^{-1} สำหรับไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก ซึ่งสอดคล้องกับช่วงการดูดกลืนแสงของหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาเชื่อมขวางของกรดและหมู่ไฮดรอกซิลของโครงสร้าง CMC นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1408 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C-O bending ของกรดที่ใช้เชื่อมขวาง (Paris Junior *et al.*, 2021) ซึ่งปรากฏในสเปกตรัมของ CMC-hydrogel ชัดเจนกว่าสเปกตรัมของ CMC จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถอนุมานได้ว่ากรดที่เติมลงไปสามารถเชื่อมขวางโครงสร้างของ CMC ได้

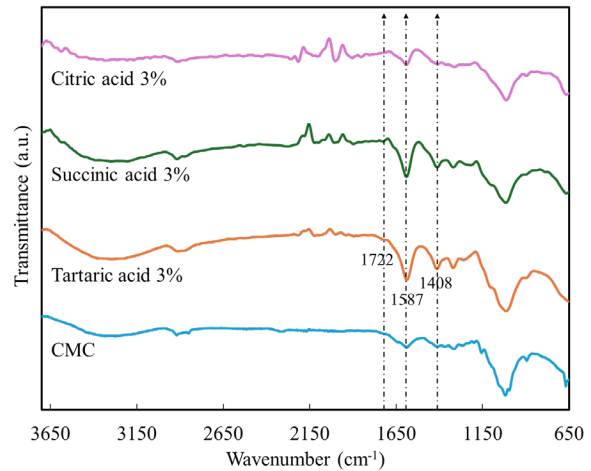


Figure 3 Infrared spectrum of CMC-hydrogel

การศึกษาโครงสร้างผลึกของไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟอนิก, กรดซิตริก และกรดทาร์ทาริก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดัง Figure 4(a) พบว่าสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทั้งสามชนิดแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 22.5° สอดคล้องกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของ CMC-hydrogel (Yang *et al.*, 2011) นอกจากนี้ยังพบว่าสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไฮโดรเจลเมื่อใช้กรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวางมีลักษณะฐานกว้าง (ที่มุมเลี้ยวเบน $16\text{--}22^\circ$) มากกว่าการใช้กรดอีกสองชนิด ซึ่งบ่งบอกได้ถึงปริมาณส่วนอสัณฐานที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของส่วนอสัณฐานเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ซึ่งจะขัดขวางการเกิดผลึกของวัสดุไฮโดรเจล (Yang *et al.*, 2011) จากผลการทดลองสามารถบ่งบอกได้ว่ากรดทาร์ทาริกสามารถเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้ดีกว่ากรดซิตริกและกรดซัลฟอนิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

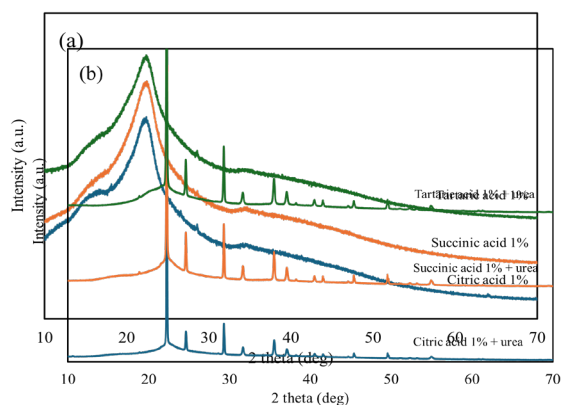


Figure 4 XRD patterns of (a) hydrogel obtained from acid crosslinking (b) hydrogel after adding urea

สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรเจลที่บรรจุปุ๋ยยูเรีย แสดงดัง Figure 4(b) จากสเปกตรัมพบว่าตัวอย่างทั้งสามชนิดแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุม 22.3 24.5 29.3 และ 35.5 องศา ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึกยูเรีย (Qi et al., 2022) นอกจากนี้ยังปรากฏสเปกตรัมการเลี้ยวเบนที่บริเวณมุม 16-22 องศา โดยมีลักษณะเป็นฐานกว้างซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของวัสดุ CMC-hydrogel จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าวัสดุไฮโดรเจลที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับยูเรียได้

สัณฐานวิทยาของวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้ 1 %w/w กรดซิตริกเชื่อมขวาง ปรากฏรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิวของไฮโดรเจล และบริเวณพื้นผิวมีลักษณะเปื่อยยุ่ย แสดงดัง Figure 5(a) และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิตริกที่ใช้เชื่อมขวาง (3-5 %w/w) พบว่ารูพรุนที่พื้นผิวของไฮโดรเจลมีขนาดเล็กลง ตามลำดับ และพื้นผิวมีความเรียบขึ้น แสดงดัง Figure 5(b) และ 5(c) อาจเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิตริกที่ใช้เชื่อมขวาง จะช่วยส่งเสริมให้สามารถเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้มากขึ้น เป็นผลให้โครงสร้างไฮโดรเจลมีความแข็งแรงและมีรูพรุนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของไฮโดรเจลเมื่อใช้กรดเชื่อมขวางต่างชนิดกัน (ที่ความเข้มข้น 1 %w/w) พบว่าการใช้กรดซิตริกทำให้พื้นผิวมีลักษณะเปื่อยยุ่ยและเกิดรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมากดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อใช้กรดซัคซินิกในการเชื่อมขวาง พบว่าบริเวณพื้นผิวรูพรุนขนาดเล็กลง แสดงดัง Figure 5(d) และเมื่อใช้กรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวาง พบว่าพื้นผิวของไฮโดรเจลมีลักษณะเรียบ ไม่เปื่อยยุ่ยและมีรูพรุนขนาดใหญ่แสดงดัง Figure 5(e) โดยการที่พื้นผิวของไฮโดรเจลมีลักษณะเรียบและไม่เปื่อยยุ่ยอาจเนื่องมาจากกรดทาร์ทาริกสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้ดีกว่ากรดทั้งสองชนิด

สอดคล้องกับผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด และผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

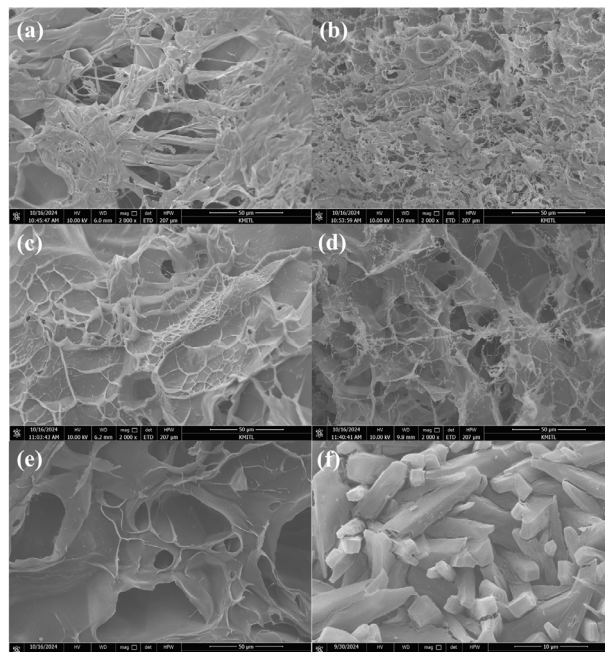


Figure 5 SEM images of hydrogel obtained from (a) citric 1 %w/w (b) citric 3 %w/w (c) citric 5 %w/w (d) succinic 1 %w/w (e) tartaric 1 %w/w and (f) citric 3 %w/w with urea

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า pKa ของกรดแต่ละชนิด พบว่าค่า pKa ของกรดทาร์ทาริก (2.98) มีค่าน้อยกว่ากรดซิตริก (3.14) และกรดซัคซินิก (4.19) ซึ่งการที่ค่า pKa มีค่าน้อยจะบ่งบอกได้ว่ากรดชนิดนั้นมีความสามารถในการแตกตัวสูง นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ดี สำหรับการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุไฮโดรเจลที่บรรจุยูเรีย พบว่ามีผลึกยูเรีย กระจายปกคลุมทั่วพื้นผิวของวัสดุไฮโดรเจล แสดงดัง Figure 5(f) ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีผลึกยูเรียเกาะติดอยู่กับวัสดุ CMC-hydrogel

3.3 การบวมตัวของ CMC-hydrogel

ผลการทดสอบบวมตัวของวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวางแสดงดัง Figure 6 พบว่าไฮโดรเจลที่ถูกเชื่อมขวางด้วย 1 %w/w กรดซิตริก มีค่าร้อยละการบวมสูงกว่าการใช้กรดซิตริก 3 %w/w และ 5 %w/w ในการเชื่อมขวางตลอดช่วงเวลาทดสอบ 180 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณกรดซิตริกที่ใช้เชื่อมขวางจะส่งผลให้ร้อยละการบวมของไฮโดรเจลมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณกรดซิตริกจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพ

ในการบวมน้ำลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลฐานวิทยาศาสตร์จากเทคนิค SEM ที่พบว่าพื้นผิวของวัสดุไฮโดรเจลมีรูพรุนน้อยลงและมีลักษณะเรียบขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกรดที่ใช้เชื่อมขวาง ส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวในการดูดซับโมเลกุลน้ำลดลง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ความสามารถในการบวมน้ำลดลง โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการใช้ กรดซักซินิก และกรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ดังปรากฏใน Figure 7 และ 8 ตามลำดับ

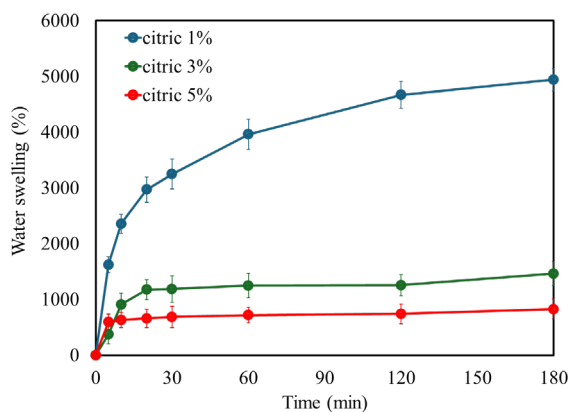


Figure 6 Water swelling of CMC-hydrogel with citric acid crosslinking

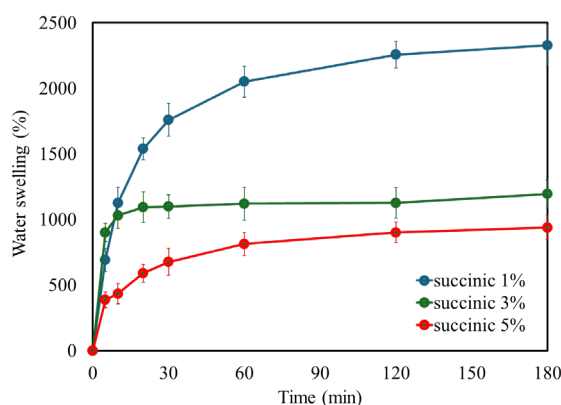


Figure 7 Water swelling of CMC-hydrogel with succinic acid crosslinking

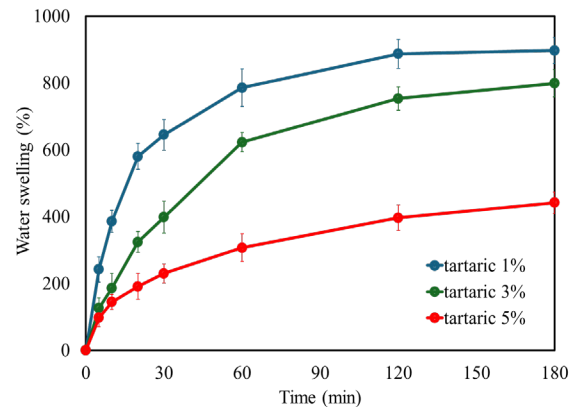


Figure 8 Water swelling of CMC-hydrogel with tartaric acid crosslinking

เมื่อพิจารณาผลการบวมน้ำของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากการใช้กรดต่างชนิดกัน พบว่าการใช้กรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวาง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบวมน้ำของวัสดุไฮโดรเจลลดลงทุกความเข้มข้นของกรดที่ใช้เตรียม (1-5 %w/w) อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของกรดทาร์ทาริกสามารถเชื่อมขวางโมเลกุลของ CMC ได้ดีกว่ากรดซิตริกและกรดซักซินิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก ซึ่งตรวจพบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 1722 cm^{-1} ได้ชัดเจนกว่าตัวอย่างไฮโดรเจลที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรดอีกสองชนิด และสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดทาร์ทาริกเชื่อมขวาง โดยพบปริมาณส่วนต่อส่วนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้ดี นอกจากนี้ผลการศึกษาพื้นผิววัสดุด้วยเทคนิค SEM บ่งบอกได้ว่าไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดทาร์ทาริกเชื่อมขวางมีลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ไฮโดรเจลชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการบวมน้ำลดลง

3.4 การชะลอการปลดปล่อยยูเรีย

การทดสอบปลดปล่อยยูเรียของวัสดุไฮโดรเจลชนิดต่าง ๆ ทำได้โดยการแช่เม็ดยูเรียไฮโดรเจลในน้ำกลั่น จากนั้นตรวจวัดปริมาณยูเรียที่ถูกปลดปล่อยออกมาในระยะเวลาที่กำหนดจนครบ 480 นาที จากการทดลองพบว่าเม็ดยูเรียเปล่าสามารถละลายในน้ำได้อย่างรวดเร็ว และพบว่าเม็ดยูเรียละลายหมดที่เวลาทดสอบ 10 นาที (Figure 9) ในขณะที่ยูเรียไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริกสามารถช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดยูเรีย นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าการใช้ปริมาณกรดซิตริกในการเชื่อมขวางน้อยลง (จาก 5 %w/w ถึง 1 %w/w) จะช่วย

ให้การชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยได้ดีขึ้น ดังแสดงใน Figure 9 อาจเนื่องมาจากผลสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วย 1 %w/w กรดซิตริกที่พื้นผิวมีสภาพเปื่อยยุ่ยและมีรูพรุนจำนวนมาก และมีการเชื่อมขวางของเส้นใยที่พื้นผิว ส่งผลให้เป็นการเพิ่มระยะทางในการที่โมเลกุลน้ำจะนำพาโมเลกุลยูเรียออกจากโครงสร้างไฮโดรเจล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยได้ดีขึ้น

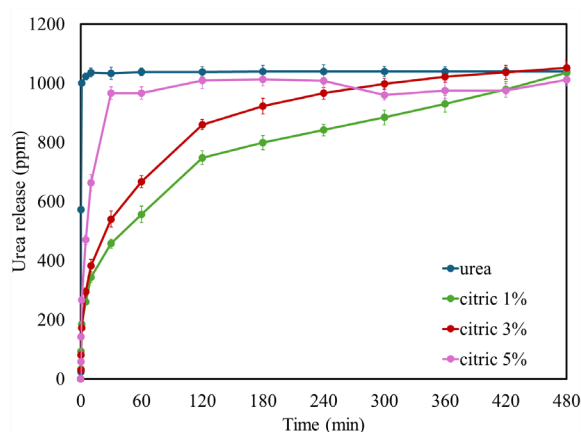


Figure 9 Urea release vs time of CMC-hydrogel with citric acid crosslinking

ผลการปลดปล่อยยูเรียของวัสดุ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิก และกรดทาร์ทาริก แสดงดัง Figure 10 และ 11 ตามลำดับ โดยพบว่าผลการปลดปล่อยยูเรียสอดคล้องกับการผลการปลดปล่อยยูเรียของวัสดุ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริก ซึ่งไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรด 1 %w/w สามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าการใช้กรดเข้มข้น 3 และ 5 %w/w ในการเชื่อมขวางโครงสร้าง และเมื่อเปรียบเทียบผลการปลดปล่อยยูเรียของกรดแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 1 %w/w พบว่าวัสดุ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิก สามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าการใช้กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาในช่วงเวลาทดสอบ 0-180 นาที ดังแสดงใน Figure 12 เมื่อพิจารณาจากสัณฐานวิทยาของวัสดุไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริกและกรดซัคซินิกมีรูพรุนที่บริเวณพื้นผิวจำนวนมาก และมีการเชื่อมขวางของเส้นใยที่พื้นผิวในโครงสร้างไฮโดรเจล มากกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก แสดงใน Figure 5(a), 5(d) และ 5(e) จึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถนำพาโมเลกุลยูเรีย

ออกจากไฮโดรเจลทั้งสองชนิดนี้ได้ช้ากว่าวัสดุไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก อย่างไรก็ตามระหว่างการทดสอบการปลดปล่อยยูเรีย พบว่าวัสดุไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริกเมื่อสัมผัสน้ำเป็นระยะเวลานานจะเกิดการละลายเนื่องมาจากการเชื่อมขวางโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงเพียงพอ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ โมเลกุลยูเรียถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุไฮโดรเจลนี้มีความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้น้อยกว่าไฮโดรเจลเชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิก เมื่อเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยยูเรียกับงานวิจัยอื่นๆ (Table 2) พบว่าวัสดุ CMC-hydrogel ที่เตรียมขึ้นมีประสิทธิภาพในการช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น อย่างไรก็ตามวัสดุ CMC-hydrogel ในงานวิจัยนี้มีข้อดี คือสามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ ช่วยกักเก็บความชื้นในดิน และสามารถเตรียมได้จากการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Table 2 Comparison of urea release rate in water

Control-release materials	Urea release rate (mg/hr)
Polystyrene/Polycaprolactone (Netty <i>et al.</i> , 2016)	41.6
Poly(lactic acid) (Kaavessina <i>et al.</i> , 2021)	17.8
Polypropylene succinate (Ye <i>et al.</i> , 2020)	66.6
CMC-hydrogel (this work)	62.5

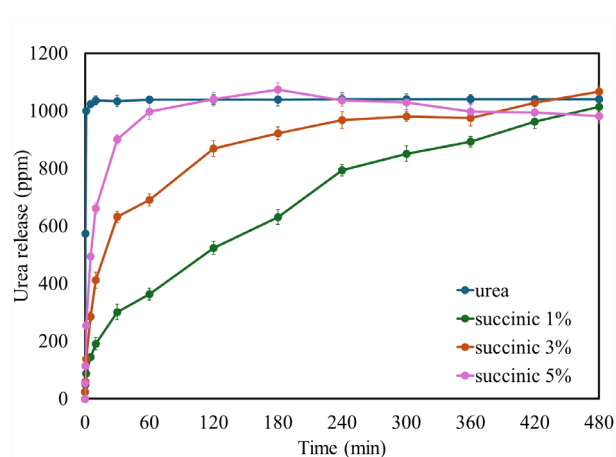


Figure 10 Urea release vs time of CMC-hydrogel with succinic acid crosslinking

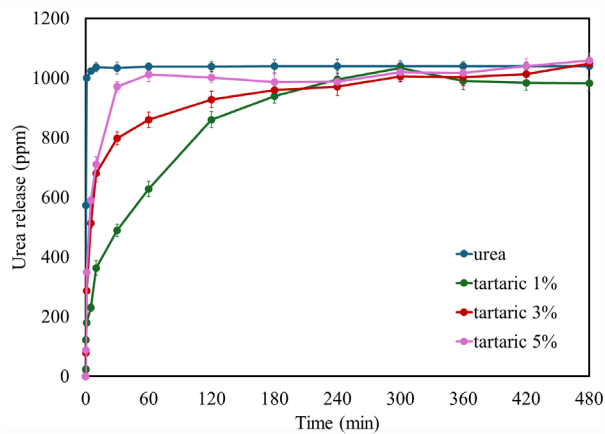


Figure 11 Urea release vs time of CMC-hydrogel with tartaric acid crosslinking

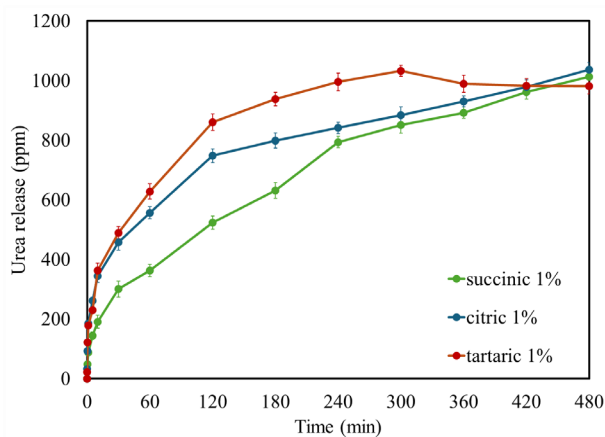


Figure 12 Urea release vs time of CMC-hydrogel with 1 %w/w acid crosslinking

3.5 การกักเก็บความชื้นในดิน

หลังจากที่วัสดุไฮโดรเจลปลดปล่อยยูเรียสู่ดินหมดแล้ว วัสดุไฮโดรเจลที่เหลืออยู่ในดินยังคงมีประโยชน์ในการช่วยกักเก็บความชื้นในดินได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้จำลองการทดสอบการกักเก็บความชื้นในดินเป็นระยะเวลา 7 วัน จากผลการทดลองพบว่าวัสดุไฮโดรเจลทั้งสามชนิดสามารถช่วยกักเก็บความชื้นในดินได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมวัสดุไฮโดรเจล (Figure 13) นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซัคซินิกเชื่อมขวาง แสดงผลการกักเก็บความชื้นในดินได้ดีที่สุดตลอดช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบ เนื่องมาจากไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิกมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับโมเลกุลน้ำมาก ประกอบกับมีโครงสร้างที่เชื่อมขวางแข็งแรง จึงส่งผลให้สามารถดูดซับน้ำได้ดีตลอดช่วงเวลาที่ทดสอบ

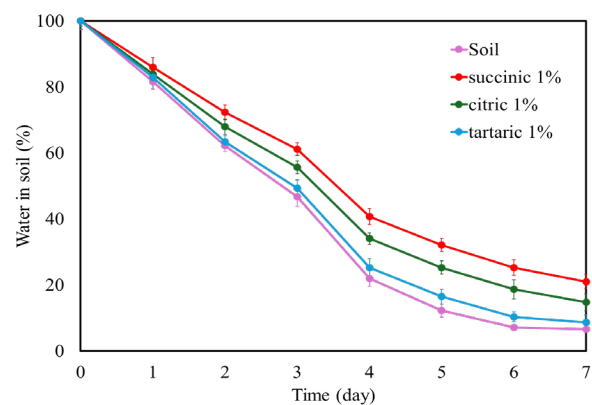


Figure 13 Water in soil vs time of hydrogels

3.6 เสถียรภาพทางความร้อนของปุ๋ยยูเรียไฮโดรเจล

เสถียรภาพทางความร้อนของปุ๋ยยูเรียไฮโดรเจลถูกศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดัง Figure 14 จากการทดลองพบว่าการลดลงของน้ำหนักตัวอย่างในช่วงต้น (50-150°C) เกิดจากการระเหยของโมเลกุลน้ำและยูเรียที่ถูกกักเก็บภายในวัสดุไฮโดรเจล โดยพบว่าวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซัคซินิกเชื่อมขวาง มีการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด ซึ่งบ่งบอกได้ว่าวัสดุไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถกักเก็บความชื้นและยูเรียได้ดีกว่าไฮโดรเจลชนิดอื่น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับความสามารถในการกักเก็บความชื้นในดินและผลการชะลอการปลดปล่อยยูเรีย ในขณะที่การลดลงของน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 200-550°C เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างหลักของเซลลูโลส (Mohamood *et al.*, 2021) ซึ่งสังเกตได้ว่าไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซัคซินิกและกรดซิตริกเชื่อมขวางมีพฤติกรรมการสลายตัวคล้ายคลึงกัน ในขณะที่ไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดทาร์ทาริกเชื่อมขวางเกิดการสลายตัวของโครงสร้างไฮโดรเจลง่ายกว่า ซึ่งบ่งบอกได้ว่าไฮโดรเจลชนิดนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุไฮโดรเจลอีกสองชนิด

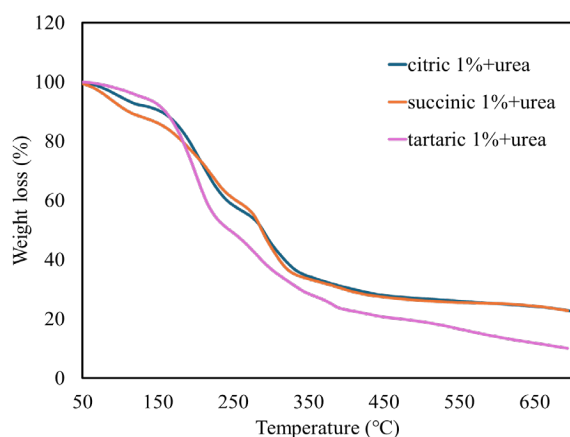


Figure 14 Thermogram of hydrogels with urea

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองสามารถสังเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลจากวัตถุดิบราคาถูกได้ คิดเป็นผลผลิตร้อยละ 11.42 จากผลจากการดักกลั่นรังสีอินฟราเรด สามารถยืนยันได้เบื้องต้นว่าสามารถใช้กรดซิตริก กรดซักซินิก และกรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวางโครงสร้างคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลสได้ ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และผลสัณฐานวิทยาบ่งบอกได้ว่ามีผลึกยูเรียผสมอยู่ในวัสดุ CMC-hydrogel และพบว่าการใช้ปริมาณกรดเชื่อมขวาง 1 %w/w ส่งผลให้พื้นผิววัสดุมีรูพรุนและมีการเชื่อมขวางของเส้นใยที่พื้นผิวในโครงสร้างไฮโดรเจล ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบวมน้ำและช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ โดยที่ใช้กรดซักซินิก 1 %w/w ในการเชื่อมขวางจะให้ผลชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีที่สุด นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังช่วยกักเก็บความชื้นในดินได้ดีอีกด้วย ดังนั้นไฮโดรเจลที่ได้การใช้กรดซักซินิก 1 %w/w ในการเชื่อมขวางจึงมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากทุนสนับสนุนงบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรมประเภท Fundamental fund ประจำปีงบประมาณ 2566 และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดอนนา สำหรับความช่วยเหลือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

นิษฐา กุฑมธรรมคุณ และสายันต์ แสงสุวรรณ. (2560). ปัญหาคุณภาพการปลดปล่อยยูเรียเพื่อประยุกต์ใช้ในทางเกษตรกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 19(3), 32–44.

- Abdel-Halim, E. S. (2013). Chemical modification of cellulose extracted from sugarcane bagasse: Preparation of hydroxyethyl cellulose. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(4), 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.006>
- Ali, S. M. G., Rashid, S., Mohamed, M. N., Wan, Z. N. Y., Amin, A., & Hamad, A. (2022). Sulfur enriched slow-release coated urea produced from inverse vulcanized copolymer. *Science of the Total Environment*, 846, 157417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157417>
- Antony, R., Varghese, A., Raqeeb, A., & Roy, S. (2024). Synthesis of hydrogel from sugarcane bagasse extracted cellulose. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(2), 2902–2909. <https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0224.0559>
- Ban, M. T., Mahadin, N., & Karim, K. J. A. (2022). Synthesis of hydrogel from sugarcane bagasse extracted cellulose for swelling properties study. *Materials Today: Proceedings*, 50(6), 2567–2575. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.342>
- Bilal, Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Kakar, S. J., Shah, G. A., Sajjad, M., Zia, M., Ullah, M., & Rao, M. I. (2020). Biodegradable polymer coated granular urea slows down N release kinetics and improves spinach productivity. *Polymers*, 12(11), 2623. <https://doi.org/10.3390/polym12112623>
- Cheng, D., Liu, Y., Yang, G., & Zhang, A. (2018). Water- and fertilizer-integrated hydrogel derived from the polymerization of acrylic acid and urea as a slow-release N fertilizer and water retention in agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(23), 5762–5769. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00872>
- Hnoosong, W., Rungcharoenthong, P., & Sangjan, S. (2021). Preparation and properties of urea slow-release fertilizer hydrogel by sodium alginate-gelatin biopolymer. *Key Engineering Materials*, 889, 98–103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.889.98>
- Kaavessina, M., Distantina, S., & Shohih, E. N. (2021). A slow-release fertilizer of urea prepared via melt blending with degradable poly(lactic acid): Formula-

- tion and release mechanisms. *Polymers*, 13(11), 1856. <https://doi.org/10.3390/polym13111856>
- Mohamood, N. F. 'A.-Z. T., Halim, A. H. A., & Zainuddin, N. (2021). Carboxymethyl cellulose hydrogel from biomass waste of oil palm empty fruit bunch using calcium chloride as crosslinking agent. *Polymers*, 13(23), 4056. <https://doi.org/10.3390/polym13234056>
- Netty, Salman, Saidu, Dwisari, Febriyenti, Idris, & Akmal, M. (2016). Coating of urea granules for slow release fertilizer using bioblend. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 7(5), 1691–1699.
- Olad, A., Zebhi, H., Salari, D., Mirmohseni, A., & Tabar, A. R. (2018). Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil. *Materials Science and Engineering: C*, 90, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.083>
- Paris Junior, J. A., Rocchi, A. J. S., Biagioni, B. T., Cavicchioli, M., Machado, R. T. A., Pavan, F. R., Corbi, P. P., Lustri, W. R., Pereira, D. H., & Massabni, A. C. (2021). Chemical, spectroscopic characterization, molecular modeling and antibacterial activity assays of a silver (I) complex with succinic acid. *Eclética Química*, 46(2), 26–35. <https://doi.org/10.26850/1678-4618eq.v46.2.2021.p26-35>
- Potts, T. T. (1963). A rapid determination of urea in fertilizers. *Journal of the Association of Official Agricultural Chemists*, 46(3), 303–306.
- Qi, X., Guo, Y., Chen, Q., Zhao, X., & Ao, X. (2022). Preparation and performance of a kitchen waste oil-modified polyvinyl alcohol-grafted urea slow-release fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(2), 51484. <https://doi.org/10.1002/app.51484>
- Rozali, M. L. H., Ahmad, N. H., & Isa, M. I. N. (2015). Effect of adipic acid composition on structural and conductivity solid biopolymer electrolytes based on carboxy methylcellulose studies. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 9(2), 39–45.
- Scheufele, F. B., Ribeiro, C., Módenes, A. N., Espinoza-Quiñones, F. R., Bergamasco, R., & Pereira, N. C. (2015). Assessment of drying temperature of sugarcane bagasse on sorption of reactive blue 5G dye. *Fibers and Polymers*, 16, 1646–1656. <https://doi.org/10.1007/s12221-015-5087-2>
- Swify, S., Mažeika, R., Baltrusaitis, J., Drapanauskaitė, D., & Barčauskaitė, K. (2024). Review: Modified urea fertilizers and their effects on improving nitrogen use efficiency (NUE). *Sustainability*, 16(1), 188. <https://doi.org/10.3390/su16010188>
- Teixeira, S. R., Arenales, A., Souza, A. E., Magalhães, R. S., Peña, A. F. V., Aquino, D., & Freire, R. (2015). Sugarcane bagasse: Applications for energy production and ceramic materials. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(3), 229–238. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2015.229>
- Wibowo, H., Congsomjit, D., Ketwong, T., Rattanapol, T., Museesut, W., Phunsanga, S., & Areeprasert, C. (2024). Application of sugarcane bagasse fly ash for syrup decolorization through activated carbon production and the circular utilization of its waste. *Biomass and Bioenergy*, 182, 107066. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107066>
- Wulandari, W. T., Rochliadi, A., & Arcana, I. M. (2016). Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 107, 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/107/1/012045>
- Yang, S., Fu, S., Liu, H., Zhou, Y., & Li, X. (2011). Hydrogel beads based on carboxymethyl cellulose for removal heavy metal ions. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(2), 1204–1210. <https://doi.org/10.1002/app.32822>
- Ye, H.-M., Li, H.-F., Wang, C.-S., Yang, J., Huang, G., Meng, X., & Zhou, Q. (2020). Degradable polyester/urea inclusion complex applied as a facile and environment-friendly strategy for slow-release fertilizer: Performance and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122704. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122704>