

การพัฒนากระบวนการแปรสภาพขานอ้อยด้วยวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีเพื่อการสกัดเซลลูโลส

DEVELOPMENT OF SUGARCANE BAGASSE PRETREATMENT PROCESSES USING COMBINATION OF PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS FOR CELLULOSE EXTRACTION

อดุลย์สมาน สุขแก้ว¹ ศศมล ผาสุก^{1,2} และ ปันณรภัธ ถกมลภักดี^{1,2*}

Adulsman Sukkaew¹, Sasamol Phasuk^{1,2} and Pannraphat Takolpuckdee^{1,2*}

¹ หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

² หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมเพื่อการพัฒนา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

¹ Doctor of Philosophy Program in Science Education, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani Province

² Doctor of Philosophy Program in Science and Innovation for Development, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani Province

*Corresponding Author E-mail: pannraphat@vru.ac.th

Received September 10, 2024; Revised October 7, 2024; Accepted October 20, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดเซลลูโลสจากกระบวนการแปรสภาพขานอ้อยด้วยวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีโดยศึกษาอุณหภูมิ เวลา และปริมาณลิควิดเซลลูโลสที่ใช้ในกระบวนการแปรสภาพขานอ้อยเป็นเซลลูโลส การศึกษาด้วยการแปรสภาพโดยใช้ น้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1 ปริมาตรโดยปริมาตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1 น้ำหนักโดยปริมาตร ณ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พบว่าการแปรสภาพที่อุณหภูมิสูงและใช้ระยะเวลาเวลานานช่วยเพิ่มปริมาณเซลลูโลสได้ โดยเฉพาะการแปรสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.1 น้ำหนักต่อปริมาตรที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที สามารถเพิ่มปริมาณเซลลูโลสได้สูงสุดถึง ร้อยละ 83.77 และลดปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการแปรสภาพดังกล่าวแสดงถึงความสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ ส่งผลให้โครงสร้างของขานอ้อยเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนและสามารถทำสกัดเซลลูโลสบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น เมื่อนำตัวอย่างขานอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการแปรสภาพที่คัดเลือกได้นำมาสองลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของขานอ้อยที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพที่คัดเลือกได้ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะโครงสร้างของขานอ้อยก่อนมีโครงสร้างของขานอ้อยที่ยังไม่ได้แปรสภาพมีลักษณะไม่มีการแตกหัก และเป็นแผ่นซ้อนทับกันหลายชั้น เมื่อผ่านการแปรสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าโครงสร้างเกิดการฉีกขาดและการแตกหักได้อย่างชัดเจน มีช่องว่างระหว่างชั้นของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เซลลูโลสที่ได้มีความเหมาะสมและบริสุทธิ์สามารถนำไปใช้งานต่อไป

คำสำคัญ: กระบวนการแปรสภาพ ขานอ้อย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน

Abstract

This research aimed to extract cellulose from bagasse pretreatment processes using physical and chemical methods by studying the effects of temperature, time, and lignocellulose content used in the process of converting bagasse into cellulose. The study of the processing was used distillation water, 0.1% V/V hydrochloric acid and 0.1 % W/V sodium hydroxide as catalytic pretreatment at ambient temperature and 120°C found that processing study at high temperature and long time increased the amount of cellulose, especially the processing with 0.1%W/V sodium hydroxide at 120°C for 15 minutes, which could increase the highest cellulose content 83.77% and reduce the amount of lignin and hemicellulose effectively. The results of the processing indicated the ability to remove hemicellulose and lignin, resulting in the structure of bagasse clearly changing and being able to extract purer cellulose. When the selected samples of unprocessed and processed bagasse were examined, the structure of the selected processed bagasse was analyzed using scanning electron microscopy. It was found that the structure of bagasse before the structure of unprocessed bagasse was not broken and was in multiple layers. When processed with sodium hydroxide, it was found that the structure was clearly torn and broken. There was an increase in the gap between the fiber layers, which showed that the removal of hemicellulose and lignin was effective, resulting in the cellulose obtained being suitable and pure, which could be further used.

Keywords: Pretreatment, Sugarcane Bagasse, Cellulose, Hemicellulose, Lignin

1. บทนำ

ในเขตพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ เป็นพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกและเกษตรกรรมเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะการปลูกอ้อยและยางพารา ในแต่ละปีจะให้ผลผลิตทางการเกษตรในปริมาณมากและสร้างรายได้ในการเลี้ยงชีพในวิถีประจำวันได้ แต่ในช่วงเวลา 1-2 ปีที่ผ่านมาจะพบปัญหาราคายางพาราตกต่ำส่งผลให้เกษตรกรขาดทุนและมีความลำบากในการดำเนินชีวิตประจำวัน แต่ในขณะเดียวกันด้วยนโยบายของรัฐบาลให้มีการส่งเสริมการเพาะปลูกพืชแบบผสมผสานเพื่อให้เกษตรกรในพื้นที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ เช่น มันสำปะหลัง ถั่วลิสง ทุเรียน และอ้อย ซึ่งพืชแต่ละชนิดล้วนให้เกิดมูลค่าแก่เกษตรกร แต่มีพืชบางชนิดที่เพาะปลูกได้ตลอดทั้งปี และอ้อยเป็นหนึ่งในวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลสประมาณ ร้อยละ 45-55 เฮมิเซลลูโลส ประมาณ ร้อยละ 20-25 และ ลิกนิน ร้อยละ 18-24 [1-3, 19] สามารถนำมาจำหน่ายในช่วงเดือนถือศีลอดหรือเดือนรอมฎอน ซึ่งประชาชนในพื้นที่นิยมบริโภคน้ำตาลที่คั้นจากอ้อยเป็นส่วนใหญ่ส่งผลให้มีปริมาณขานอ้อยเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์

ขานอ้อยจัดเป็นเศษเหลือของลำต้นอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยที่หิบน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกจากท่อนอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหีบอ้อย ขานอ้อยมีคุณสมบัติดี ไฟง่าย ประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน [4] การประยุกต์ใช้ขานอ้อยสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย อาทิ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง การผลิตถ่านแท่ง การผลิตอิฐบล็อก และการผลิตคอนกรีต เป็นต้น ในขั้นตอนการสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อยจึงมีความจำเป็นต้องมีการแยกเซลลูโลสออกจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของขานอ้อย ในกระบวนการสกัดที่ใช้กันทั่วไปส่วนใหญ่นิยมใช้กระบวนการสกัดด้วยวิธีทางเคมีซึ่งต้องใช้สารเคมีที่มีความเข้มข้นสูงและอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การประยุกต์ใช้กระบวนการทางกายภาพร่วมกับกระบวนการทางเคมีจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดเซลลูโลส และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในการพัฒนากระบวนการแปรรูปเพื่อการสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อยมีความสำคัญมากต่อการเพิ่มมูลค่าให้กับขานอ้อยและช่วยลดปริมาณของเสีย สามารถลดการพึ่งพาวัตถุดิบจากป่าไม้ ส่งผลต่อการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและการทำงานสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เซลลูโลสที่ได้จากขานอ้อยสามารถนำไปใช้ในเพื่อการพัฒนา

ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น วัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ และแผ่นกรอง ซึ่งสามารถพัฒนาให้เกิดเป็นนวัตกรรมใหม่ๆ ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการแพทย์และเครื่องสำอาง หรือ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง [5–7]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจประเด็นการพัฒนากระบวนการสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อยซึ่งมีความสำคัญต่อการจัดการระบบแวดล้อมและทางด้านเศรษฐศาสตร์ และเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ และการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแปรสภาพขานอ้อยเป็นเซลลูโลส
- 2) เพื่อศึกษาปริมาณผลิตภัณฑ์เซลลูโลสจากกระบวนการแปรสภาพขานอ้อย
- 3) เพื่อส่องลักษณะโครงสร้างของขานอ้อยที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพที่คัดเลือกได้ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างขานอ้อย

เก็บขานอ้อย จากอำเภอเมืองยะลา จังหวัดยะลา นำมาตัดขนาด 2–3 เซนติเมตร แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 100 ไมครอน เพื่อให้มีขนาดเท่าๆ กัน จากนั้นแล้วผนึกถุงพลาสติกสุญญากาศ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความชื้นมาตรฐานเปียก ความชื้นมาตรฐานแห้ง ตามสมการที่ (1) และสมการที่ (2) [8–10]

$$\frac{\text{ความชื้นมาตรฐานเปียก } M_w}{w} = (w-d) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (ร้อยละ)
 w คือ มวลของวัสดุเปียก (กรัม)
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

$$\frac{\text{ความชื้นมาตรฐานแห้ง } M_d}{d} = (W-d) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ร้อยละ)
 w คือ มวลของวัสดุเปียก (กรัม)
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

3.2 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแปรสภาพขานอ้อยเป็นเซลลูโลส

นำขานอ้อย 20 กรัม เติมน้ำกลั่น เท่ากับ 300 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 และ 15 นาที กรองโดยการแยกกากออกแล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [11] นำขานอ้อยที่ได้หลังการอบแห้งมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามสมการที่ (1) และ สมการที่ (2) ส่วนการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแปรสภาพขานอ้อยเป็นเซลลูโลสจากไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1 และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการแปรสภาพด้วยน้ำกลั่น [5, 12–14]

3.3 การศึกษาปริมาณลิกโนเซลลูโลสจากกระบวนการแปรรูปฟางข้าว

ในการวิเคราะห์ปริมาณลิกโนเซลลูโลส โดยนำตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการแปรรูป มาหาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธี Detergent method โดยการวิเคราะห์ Neutral detergent fiber (NDF) การวิเคราะห์ Acid detergent fiber (ADF) และ การวิเคราะห์ Acid detergent lignin (ADL) [3] แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณจากสูตรตามวิธีของ Van Soest เพื่อหาปริมาณเซลลูโลส (สมการที่ 3) เฮมิเซลลูโลส (สมการที่ 4) ลิกนิน (สมการที่ 5) และผลผลิตที่ได้ (สมการที่ 6) [15–17]

หาปริมาณเซลลูโลสจากสูตร

$$\text{Cellulose (ร้อยละ)} = \frac{(\text{ADF (ร้อยละ)} - \text{น้ำหนักเยื่อใยหลังการย่อยและอบแห้ง}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \quad (3)$$

หาปริมาณเฮมิเซลลูโลสจากสูตร

$$\text{Hemicellulose (ร้อยละ)} = \text{NDF (ร้อยละ)} - \text{ADF (ร้อยละ)} \quad (4)$$

หาปริมาณลิกนินจากสูตร

$$\text{Lignin (ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักเยื่อใยหลังการอบ} - \text{น้ำหนักเยื่อใยหลังการเผา}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \quad (5)$$

ร้อยละผลผลิตที่ได้

$$= (\text{ตัวอย่างฟางข้าวหลังอบ} / \text{ตัวอย่างฟางข้าวก่อนอบ}) \times 100 \quad (6)$$

3.5 ลักษณะโครงสร้างของฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการแปรรูปที่คัดเลือกได้ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เตรียมตัวอย่างก่อนการแปรรูปและหลังการแปรรูปที่คัดเลือกได้นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น 5800 โดยทำการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอนให้มีความเร็วสูงเพื่อยิงไปยังตัวอย่าง ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ใช้กำลังขยายของภาพที่แสดงบนหน้าจอ SEM 300 เท่า และความกว้างของภาพในแนวนอนที่แสดงบนหน้าจอ SEM 455.1 ไมโครเมตร

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลของการสกัดเซลลูโลสจากฟางข้าวด้วยวิธีการแปรรูปทางเคมีด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์

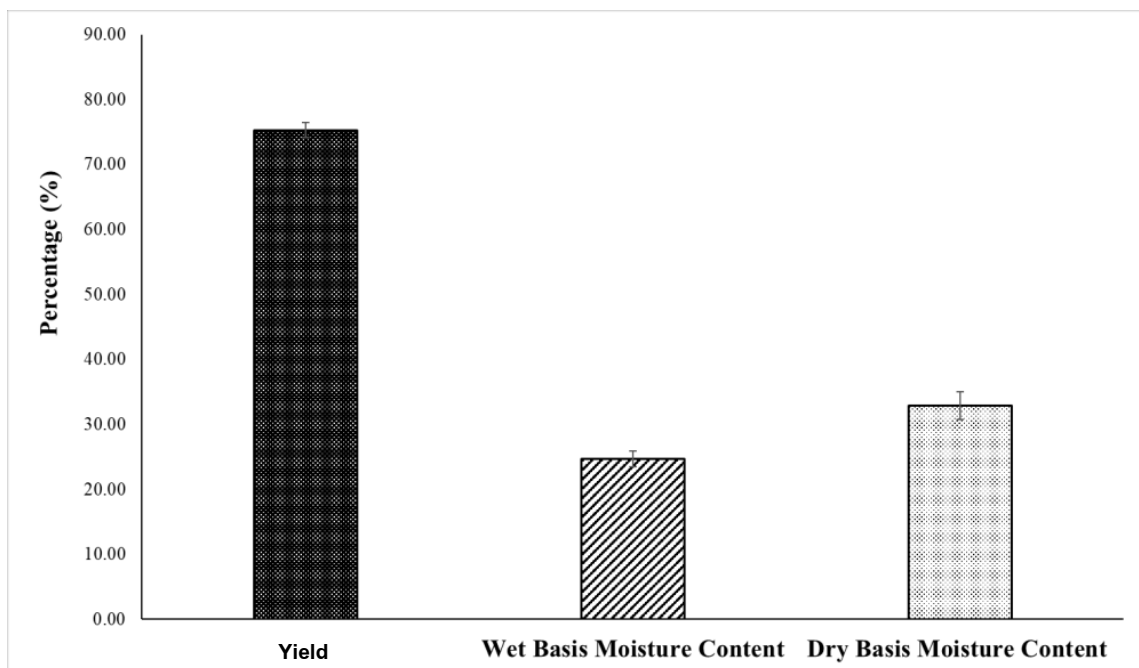
การสกัดเซลลูโลสจากฟางข้าวด้วยวิธีการแปรรูปทางเคมีด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตเซลลูโลสบริสุทธิ์ ซึ่งในกระบวนการนี้เริ่มจากการแปรรูปฟางข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการในกลุ่มลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ทำให้ได้เซลลูโลสบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 (ก) ลักษณะขานอ้อยที่ไม่ถูกแปรรูป

(ข) ลักษณะขานอ้อยที่ถูกแปรรูปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0.1 น้ำหนักต่อปริมาตร

โดยเริ่มต้นของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อยและการวิเคราะห์ความชื้นของตัวอย่างหลังการอบแห้ง พบว่ากระบวนการอบแห้งสามารถลดน้ำหนักของตัวอย่างได้ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำหนักเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนการอบแห้งอยู่ที่ 10.42 ± 0.20 กรัม และหลัง การอบแห้งลดลงมาอยู่ที่ 7.85 ± 0.14 กรัม จะเห็นได้ว่าตัวอย่างขานอ้อยที่ได้หลังการอบแห้งที่ได้นี้ยังคง ผลผลิตที่ได้เท่ากับร้อยละ 75.29 ± 1.21 เมื่อศึกษาถึงปริมาณความชื้นฐานเปียกและฐานแห้งที่วัดได้ พบว่าปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกเท่ากับร้อยละ 24.72 ± 1.21 และปริมาณความชื้น มาตรฐานแห้งเท่ากับร้อยละ 32.84 ± 2.15 ดังแสดงในภาพที่ 2

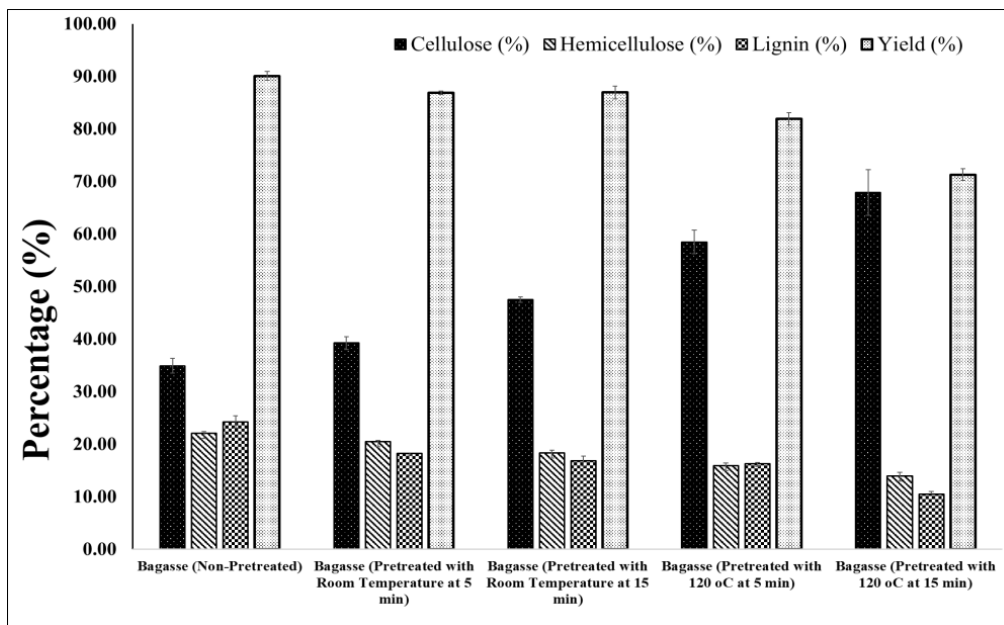


ภาพที่ 2 ผลผลิตที่ได้ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก และปริมาณความชื้นมาตรฐานฐานแห้งของขานอ้อย

4.2 ผลการแปรรูปขานอ้อยโดยใช้น้ำ

เมื่อนำขานอ้อยมาแปรรูปด้วยน้ำที่สภาวะแตกต่างกันแล้วนำมาวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และผลผลิตที่ได้ โดยมีขานอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการแปรรูปเป็นตัวแทนควบคุมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดเซลลูโลสที่มีอยู่ในขานอ้อย พบว่า ขานอ้อยที่ไม่ผ่านการแปรรูปมีปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และผลผลิตที่ได้ เท่ากับร้อยละ 34.95 ± 2.14 , 22.13 ± 3.16 , 24.25 ± 4.63 และ 90.11 ± 1.68 ตามลำดับ หลังจากการแปรรูปที่

อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที พบปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 39.29±2.65 ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน เท่ากับร้อยละ 20.54±1.99 และ 18.30±2.36 ตามลำดับ และมีผลผลิตที่ได้โดยรวมลดลงไม่สูงเท่ากับร้อยละ 86.93±1.22 เมื่อเพิ่มเวลาการแปรสภาพที่อุณหภูมิห้องให้นานขึ้นเป็น 15 นาที ส่งผลปริมาณเซลลูโลส เพิ่มขึ้นร้อยละ 47.54±3.66 ส่วน เฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลงเท่ากับร้อยละ 18.36±1.55 และ 16.84±2.75 ตามลำดับ แต่ผลผลิตที่ได้ เท่ากับร้อยละ 86.98±1.25 เมื่อทำการแปรสภาพที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที พบว่า ปริมาณเซลลูโลสที่สูงขึ้น เท่ากับ ร้อยละ 58.53±3.25 ส่วนเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง เท่ากับร้อยละ 15.96±2.36 และ 16.27±2.7 ตามลำดับ และมีผลผลิต ที่ได้เท่ากับร้อยละ 81.99±3.66 เมื่อแปรสภาพที่ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ทำให้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุด เมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆจากข้างต้น เท่ากับร้อยละ 67.92±3.66 70 ขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง เท่ากับ ร้อยละ 14.12±1.66 และ 10.54±2.56 ตามลำดับ และมีผลผลิตลดลงมาอยู่ที่ร้อยละ 71.32±2.65 ดังแสดงในภาพที่ 3 การแปรสภาพ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มปริมาณเซลลูโลสโดยไม่ทำให้ผล ผลิตลดลงมากเกินไป



ภาพที่ 3 การแปรสภาพขานอ้อยโดยใช้น้ำ

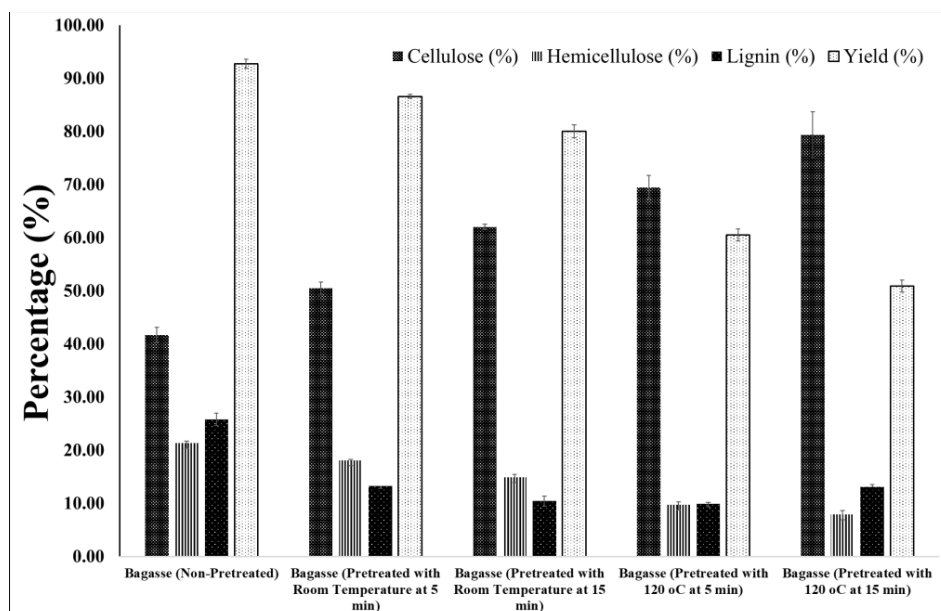
4.3 ผลการแปรสภาพขานอ้อยโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1

การสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อยภายใต้สภาวะต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยการไม่ปรับสภาพ การแปรสภาพที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที และ 15 นาที และการแปรสภาพที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีและ 15 นาที โดยมี การวิเคราะห์ ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และผลผลิตที่ได้ในแต่ละสภาวะ พบว่า ในสภาวะที่ไม่ได้ แปรสภาพ ขานอ้อย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีปริมาณอยู่ที่ร้อยละ 41.76±2.66 21.40±1.25 และ 25.81±3.21 และมีผลผลิต ในสภาวะนี้สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 92.80±2.55 กระบวนการมากนัก เมื่อทำการแปรสภาพที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เป็นร้อยละ 50.50±1.62 เฮมิเซลลูโลสลดลงเหลือเท่ากับร้อยละ 18.11±3.67 และลิกนิน ลดลง เหลือ เท่ากับร้อยละ 13.27 และมีผลผลิตที่ได้ เท่ากับร้อยละ 86.63±3.33 การปรับสภาพที่อุณหภูมิห้องเพียง 5 นาที เมื่อ เพิ่มระยะเวลาการแปรสภาพที่ อุณหภูมิห้องเป็น 15 นาที ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 67.02±1.25 ขณะที่ เฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นร้อยละ 14.99±1.45 และ 10.48±0.78 ตามลำดับ ผลผลิตที่ได้เท่ากับ ร้อยละ 80.09±1.65 เมื่อมีการแปรสภาพที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ส่งผลให้ปริมาณ เซลลูโลสเพิ่มขึ้น อย่างเห็นได้ชัดเจนน้อยละ 69.53±1.25 เฮมิเซลลูโลสลดลงเหลือร้อยละ 9.80±2.65 และ ลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 9.93±3.65

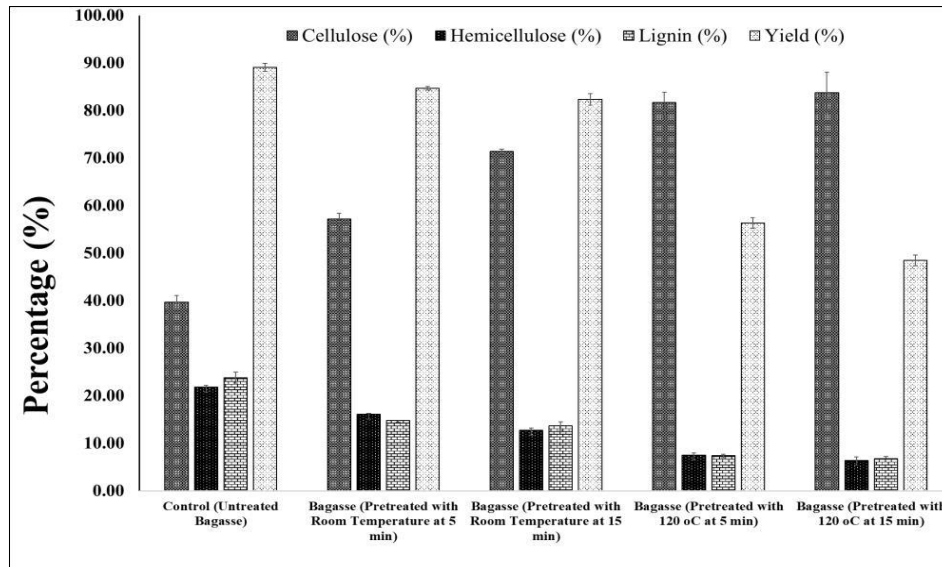
ผลผลิตที่ได้คงเหลือเท่ากับร้อยละ 60.56 ± 2.22 นอกจากนี้การแปรรูปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที ทำให้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 79.42 ± 2.36 เฮมิเซลลูโลสลดลงเหลือร้อยละ 7.92 ± 2.65 และลิกนินเท่ากับร้อยละ 13.09 ± 1.02 ผลผลิตที่ได้เท่ากับร้อยละ 50.91 ± 2.98 ดังแสดงในภาพที่ 4

4.4 ผลการแปรรูปฟางอ้อยโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1

การสกัดเซลลูโลสจากฟางอ้อยในสภาวะต่าง ๆ โดยประกอบด้วยการไม่ปรับสภาพ การแปรรูปที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที และ 15 นาที และการแปรรูปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที และ 15 นาที ผลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และผลผลิตที่ได้ โดยสภาวะที่ไม่แปรรูปพบว่า เซลลูโลสมีปริมาณอยู่ที่ร้อยละ 39.68 ± 2.36 เฮมิเซลลูโลสที่ร้อยละ 21.83 ± 3.88 ลิกนินร้อยละ 23.81 ± 1.65 และผลผลิตที่ได้ร้อยละ 89.12 ± 1.98 เมื่อนำฟางอ้อยมาแปรรูปที่อุณหภูมิห้อง ที่ 5 นาที ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1 พบว่าปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.19 ± 2.75 เฮมิเซลลูโลสลดลงเหลือร้อยละ 16.15 ± 4.21 ลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 14.83 ± 2.18 และผลผลิตที่ได้เท่ากับร้อยละ 84.69 ± 3.98 ซึ่งการแปรรูปที่อุณหภูมิห้องเพียง 5 นาที ส่งผลให้ได้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นได้ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกกำจัดออกไปบางส่วน ผลผลิตที่ลดลง เมื่อเพิ่มเวลาในการแปรรูปเป็น 15 นาที ที่ อุณหภูมิห้อง พบปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 71.38 ± 2.98 เฮมิเซลลูโลสลดลงเหลือร้อยละ 12.73 ± 3.75 ลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 13.65 ± 1.09 และผลผลิตที่ได้เท่ากับร้อยละ 82.34 ± 2.98 เมื่อเพิ่มระยะเวลา การแปรรูปเป็น 15 นาที ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างมาก ขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการแปรรูปโดยเพิ่ม อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส ที่ 5 นาที พบว่า ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นมากถึงร้อยละ 81.67 ± 2.08 เฮมิเซลลูโลสลดลงเหลือร้อยละ 7.54 ± 1.65 ลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 7.45 ± 3.65 แต่ผลผลิตที่ได้เหลือร้อยละ 56.36 ± 1.64 เมื่อเพิ่มเวลาในการแปรรูปที่ 15 นาที พบปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 83.77 ± 2.65 เฮมิเซลลูโลส ลดลงเหลือร้อยละ 6.44 ± 2.52 ลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 6.73 ± 2.65 และผลผลิตที่ได้ร้อยละ 48.48 ± 1.58 ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 4 การแปรรูปฟางอ้อยโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1



ภาพที่ 5 การแปรรูปฟางข้าวด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 0.1

การสกัดเซลลูโลสโดยวิธีแปรรูปทางเคมีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากฟางข้าว ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ระบุว่า การใช้กรดหรือเบสในการแปรรูปฟางข้าวช่วยในการสกัดเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแปรรูปมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการใช้ความร้อนสูงหรือนานเกินไปอาจทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสถูกทำลายและส่งผลให้ผลผลิตลดลง ซึ่งเป็นข้อมูลที่ตรงกับงานวิจัยของ Sun et al. (2020) [18-19] ที่พบว่าการใช้กรดซัลฟริกที่เข้มข้นเกินไปสามารถทำลายโครงสร้างเซลลูโลสได้ ในส่วนของการแปรรูปฟางข้าวด้วยอุณหภูมิสูง ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งให้ปริมาณเซลลูโลสที่สูงและผลผลิตที่ยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การใช้เวลานานขึ้นถึง 15 นาทีทำให้ได้ปริมาณเซลลูโลสที่สูงที่สุด แต่ต้องแลกกับการลดลงอย่างมากของผลผลิต ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2019) [19] ที่รายงานว่าอุณหภูมิสูงเกินไปสามารถเพิ่มการสลายตัวของโครงสร้างเซลลูโลส ทำให้สูญเสียวัสดุที่สำคัญในกระบวนการผลิต

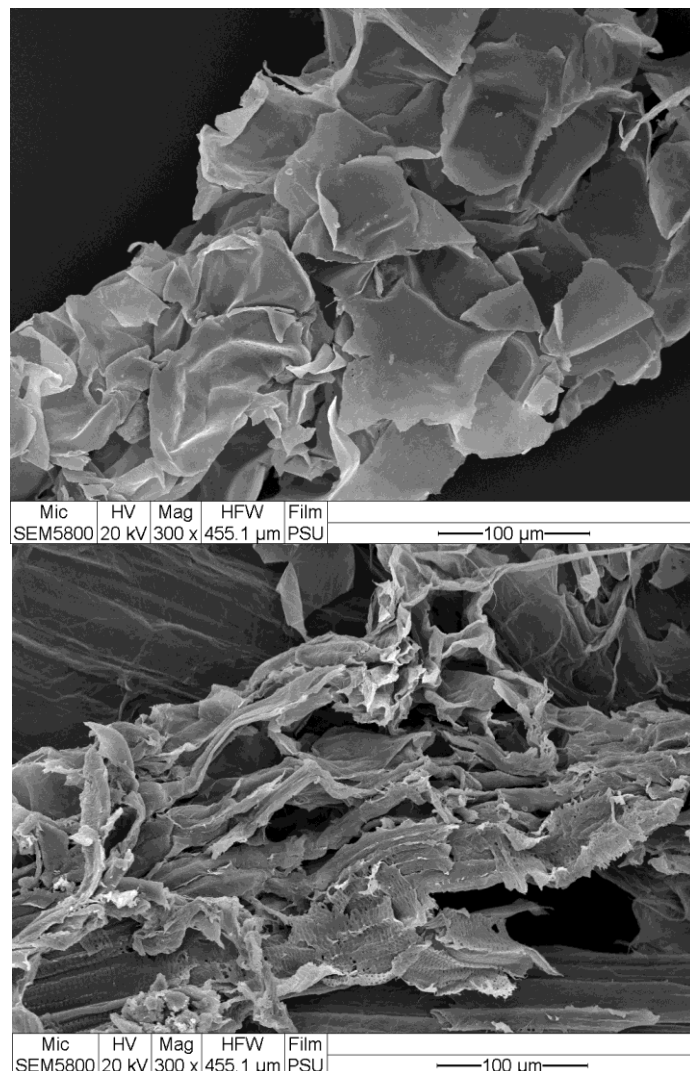
4.5 ลักษณะโครงสร้างของฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการแปรรูปที่คัดเลือกได้ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำตัวอย่างฟางข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านการแปรรูปนำมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของฟางข้าว ที่ผ่านการแปรรูปทางเคมีด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากภาพที่ 6 (ก) แสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างของฟางข้าวที่มีลักษณะเป็นแผ่นๆ ที่ซ้อนกัน ในหลายๆชั้น ดูเหมือนโครงสร้างที่มีความคงตัว ไม่มีการแตกหรือฉีกขาด ลักษณะโครงสร้างในภาพนี้ บ่งบอกถึงสภาพที่คงตัวของวัสดุ ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่ยังผ่านถูก การแปรรูป ส่วนในภาพที่ 6 (ข) จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างที่มีการแตกหักและฉีกขาดอย่าง ชัดเจน โครงสร้างดูไม่สม่ำเสมอ มีการเปิดช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุมากขึ้น ซึ่งลักษณะโครงสร้างใน ภาพนี้ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการแปรรูปอย่างรุนแรง ซึ่งสามารถทำให้ลิกนินและเฮมิ เซลลูโลสถูกกำจัดออกไป และทำให้เซลลูโลสถูกแยกออกมาได้ดีขึ้น

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลง ทางกายภาพของฟางข้าว ที่ผ่านการแปรรูปและไม่ผ่านการแปรรูป โดยภาพที่ 6 (A) โครงสร้างของฟางข้าวยังคงมีลักษณะที่เรียบและมีการซ้อนทับกันของชั้นต่างๆ แสดงถึงโครงสร้างที่ ยังคงคงตัวอยู่ ซึ่งบ่งบอกว่าอาจยังไม่ผ่านการแปรรูป หรือผ่านการแปรรูปที่ไม่รุนแรง และภาพที่ 6 (B) โครงสร้างมีการแตกหักและฉีกขาดอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ถึงการแปรรูปที่รุนแรง

จากการ เบส และการแปรรูปขานอ้อยที่อุณหภูมิสูง การเปลี่ยนแปลงนี้บ่งบอกว่าลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีการเปลี่ยนแปลงไปจากสภาพเดิม



(ก)

(ข)

ภาพที่ 6 (ก) ลักษณะโครงสร้างของขานอ้อยก่อน

(ข) ลักษณะโครงสร้างของขานอ้อยหลังแปรรูปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1
น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

5. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนากระบวนการแปรรูปขานอ้อยด้วยวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีเพื่อการสกัดเซลลูโลสพบว่าการแปรรูปขานอ้อยโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เป็นสภาวะที่ให้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุดที่ ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 83.77 ± 2.65 เฮมิเซลลูโลส ลดลงเหลือร้อยละ 6.44 ± 2.52 ลิกนินลดลงเหลือร้อยละ 6.73 ± 2.65 และผลผลิตที่ได้ร้อยละ 48.48 ± 1.58 เมื่อตัวอย่างขานอ้อยที่ผ่านการแปรรูปคัดเลือกได้ไปส่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่ามีลักษณะโครงสร้างมีการแตกหักและฉีกขาดอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ถึงการแปรรูปที่รุนแรง

6. ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาวิธีการแปรรูปกากอ้อยในรูปแบบอื่น เช่นการให้ความร้อนสูง การใช้เอนไซม์ย่อยสลายเฉพาะเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน
- 2) อาจมีการพัฒนาเครื่องสกัดเซลลูโลสให้บริสุทธิ์เฉพาะ
- 3) อาจใช้พืชชนิดอื่นที่มีศักยภาพนามาทดแทนกากอ้อยเพื่อเป็นแนวทางวิจัยและพัฒนาต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Li, J. Ye, Z. Jia, H. Yu, L. Li, H. Wang, E. Jiang, Y. Sun, and X. Xu, "The full utilization of bagasse via deep eutectic solvent pretreatment for low-condensed lignin and cellulose smart indicator film", *Chemical Engineering Journal*, 492, (2024). pp. 151-162.
- [2] G. Torres da Silva, L.M. Chiarello, E.M. Lima, and L.P. Ramos, "Sono-assisted alkaline pretreatment of sugarcane bagasse for cellulosic ethanol production", *Catalysis Today*, 269, (2016). pp. 21-28.
- [3] L.H.d.S. Martins, S.C. Rabelo, and A.C.d. Costa, "Effects of the pretreatment method on high solids enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of the cellulosic fraction of sugarcane bagasse", *Bioresource Technology*, 191, (2015). pp. 312-321.
- [4] P. Tao, Y. Zhang, Z. Wu, X. Liao, and S. Nie, "Enzymatic pretreatment for cellulose nanofibrils isolation from bagasse pulp: Transition of cellulose crystal structure", *Carbohydrate Polymers*, 214, (2019). pp. 1-7.
- [5] อดุลย์สมาน สุขแก้ว ปรีดา จันทวงศ์ และปานทิพย์ บุญส่ง (2558) "ผลของอุณหภูมิและเวลาสำหรับการอบแห้งผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) ด้วยเครื่องอบลมร้อน." การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 4 เรื่อง "การวิจัยและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาท้องถิ่นสู่ประชาคมอาเซียน. มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ จังหวัดนราธิวาส, pp. 125-135.
- [6] C.E. de Araújo Padilha, C. da Costa Nogueira, M.A. Oliveira Filho, D.F. de Santana Souza, J.A. de Oliveira, and E.S. dos Santos, "Valorization of cashew apple bagasse using acetic acid pretreatment: Production of cellulosic ethanol and lignin for their use as sunscreen ingredients", *Process Biochemistry*, 91, (2020). pp. 23-33.
- [7] X. Zhao, J. Wen, H. Chen, and D. Liu, "The fate of lignin during atmospheric acetic acid pretreatment of sugarcane bagasse and the impacts on cellulose enzymatic hydrolyzability for bioethanol production", *Renewable Energy*, 128, (2018). pp. 200-209.
- [8] C. Sriwong, and P. Sukyai, "Simulated elephant colon for cellulose extraction from sugarcane bagasse: An effective pretreatment to reduce chemical use", *Science of The Total Environment*, 835, (2022). pp. 155-164.
- [9] J. Zeng, Z. Tong, L. Wang, J.Y. Zhu, and L. Ingram, "Isolation and structural characterization of sugarcane bagasse lignin after dilute phosphoric acid plus steam explosion pretreatment and its effect on cellulose hydrolysis", *Bioresource Technology*, 154 (2014). pp. 274-281.
- [10] Z. Qiu, X. Han, A. Fu, Y. Jiang, W. Zhang, C. Jin, D. Li, J. Xia, J. He, Y. Deng, N. Xu, X. Liu, A. He, H. Gu, and J. Xu, "Enhanced cellulosic d-lactic acid production from sugarcane bagasse by pre-fermentation of water-soluble carbohydrates before acid pretreatment", *Bioresource Technology*, 368, (2023). pp. 128-140.
- [11] Y. Fu, H. Gao, H. Yu, Q. Yang, H. Peng, P. Liu, Y. Li, Z. Hu, R. Zhang, J. Li, Z. Qi, L. Wang, L. Peng, and Y. Wang, "Specific lignin and cellulose depolymerization of sugarcane bagasse for maximum bioethanol

- production under optimal chemical fertilizer pretreatment with hemicellulose retention and liquid recycling", *Renewable Energy*, 200, (2022). pp. 1371-1381.
- [12] S. Nie, C. Zhang, Q. Zhang, K. Zhang, Y. Zhang, P. Tao, and S. Wang, "Enzymatic and cold alkaline pretreatments of sugarcane bagasse pulp to produce cellulose nanofibrils using a mechanical method", *Industrial Crops and Products*, 124, (2018). pp. 435-441.
- [13] Y. Liu, X. Zheng, S. Tao, L. Hu, X. Zhang, and X. Lin, "Process optimization for deep eutectic solvent pretreatment and enzymatic hydrolysis of sugar cane bagasse for cellulosic ethanol fermentation", *Renewable Energy*, 177, (2021). pp. 259-267.
- [14] G. Shen, X. Yuan, S. Chen, S. Liu, M. Jin, "High titer cellulosic ethanol production from sugarcane bagasse via DLCA pretreatment and process development without washing/detoxifying pretreated biomass", *Renewable Energy*, 186, (2022). pp 904-913.
- [15] K. Saelee, N. Yingkamhaeng, T. Nimchua, and P. Sukyai, "An environmentally friendly xylanase-assisted pretreatment for cellulose nanofibrils isolation from sugarcane bagasse by high-pressure homogenization", *Industrial Crops and Products*, 82, (2016). pp 149-160.
- [16] T.Q. Lan, S.R. Wang, H. Li, Y.Y. Qin, and G.J. Yue, "Effect of lignin isolated from p-toluenesulfonic acid pretreatment liquid of sugarcane bagasse on enzymatic hydrolysis of cellulose and cellulase adsorption", *Industrial Crops and Products*, 155, (2020). pp. 112-121.
- [17] R. Ling, W. Wei, and Y. Jin, "Pretreatment of sugarcane bagasse with acid catalyzed ethylene glycol–water to improve the cellulose enzymatic conversion", *Bioresource Technology*, 361 (2022). pp. 127-133.
- [18] Y., Sun, and J.C., Cheng, "Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production". *Bioresource Technology*, 96 (14), (2005). pp. 1599-1606.
- [19] อดุลย์สมาน สุขแก้ว และมุขามัดคอยรี หะยีบากา (2564) "กระบวนการแปรรูปกากอ้อยที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางกายภาพร่วมกับเคมีเพื่อเป็นสับเสทในการผลิตเอทานอล". วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน, pp. 97-103.