สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ และการย่อยเปลือกสับปะรด และชานอ้อยด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับกายภาพ

Optimization of Pretreatment and Hydrolysis Process of Pineapple Peels and Sugarcane Bagasse using Physiochemical Method

ปิยาภรณ์ วังศิริกุล[1*], ไซมะห์ มะสะ[2], และพาตีเมาะ สามะ[3]

Piyaporn Wangsirikul[1*], Saimah Masa[2], and Fatimah Sama[3]

(Received: 26 February 2024; Revised: 18 April 2024; Accepted 30 May 2024)

บทคัดย่อ

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกสับปะรดและชานอ้อย โดยก่อนปรับสภาพเปลือกสับปะรดมีปริมาณเซลลูโลส 71.50 % ลิกนิน 5.00 % โฮโลเซลลูโลส 56.75 % และชานอ้อยมีปริมาณเซลลูโลส 79.50 % ลิกนิน 13.00 % โฮโลเซลลูโลส 82.75% มีการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอลิกและแอมโมเนียมซัลเฟต ปรากฏว่าการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 91.50 % ลิกนิน 4.00 % โฮโลเซลลูโลส 95.25 % ซึ่งได้ปริมาณเซลลูโลสหลังปรับสภาพสูงที่สุด ส่วนชานอ้อยการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 85.00 % ลิกนิน 10.00 % และ โฮโลเซลลูโลส 88.75 % เมื่อวัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพมาย่อยให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีทางเคมีร่วมกับกายภาพ ปรากฏว่าเปลือกสับปะรดใช้กรดซัลฟิวริก 1 % ร่วมกับการใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำโดยใช้เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด (26,273.35 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ส่วนชานอ้อยที่ใช้กรดซัลฟิวริก 1 % ร่วมกับโซนิเคทโดยใช้เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด (1,957.80 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

คำสำคัญ: การปรับสภาพ เปลือกสับปะรด ชานอ้อย การย่อย

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

[1] Faculty of Science and Technology Princess of Naradhiwas University

[2] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

[2] Faculty of Science and Technology Princess of Naradhiwas University

[3] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

[3] Faculty of Science and Technology Princess of Naradhiwas University

*Corresponding Author, E-mail: piyaporn.v@pnu.ac.th

Abstract

The suitable conditions for the pretreatment of pineapple peels and sugarcane bagasse, prior to treatment, pineapple peels had quantities of cellulose 71.50 %, lignin 5.00 %, hemicellulose 56.75 %, while sugarcane peels had quantities of cellulose 79.50 %, lignin 13.00 %, hemicellulose 82.75 %. Pretreatment was done using sodium hydroxide, hydrochloric acid, and ammonium sulfate. The results showed that pretreatment of pineapple peel with 2 % sodium hydroxide will result in 91.50 % cellulose, 4.00 % lignin, 95.25 % holocellulose which is the highest amount of cellulose after pretreatment. Sugarcane bagasse pretreated with 2 % hydrochloric acid will have a cellulose of content 85.00 %, lignin 10.00% and holocellulose 88.75 %. The raw materials are pretreated and digested to reduce using chemical and physical methods. The results showed that the pineapple peel using 1 % sulfuric acid combined with an autoclave for 40 minutes had the highest reduction amount (26,273.35 mg/ml). The sugarcane bagasse was hydrolyzed with 1 % sulfuric acid and sonicated for 40 minutes, the highest amount of reducing sugar was obtained (1,957.80 mg/ml).

Keywords: pretreatment, pineapple peel, sugarcane bagasse, hydrolysis

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งจะมีผลผลิตทางการเกษตรที่ได้มีการนำไปแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบทางการเกษตร เนื่องจากการนำวัตถุดิบไปแปรรูปจะมีส่วนที่เหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถนำไปผลิตเอทานอลเป็นพลังงานทดแทน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่า ช่วยลดปริมาณของเหลือทิ้งทางการเกษตร พลังงานบริสุทธิ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญ สามารถใช้ผสมหรือทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมหรือเบนซินได้ ซึ่งสามารถผลิตได้จากชีวมวลด้วยกระบวนการทางชีวภาพ วัตถุดิบที่มีต้นทุนในการผลิตเอทานอลเชิงพาณิชย์ คือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรซึ่งเป็นวัตถุดิบประเภทเซลลูโลสและคาร์โบไฮเดรต ซึ่งขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการผลิตเอทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีกระบวนการที่สำคัญ 2 ประการ คือ กระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักในพืชให้เป็นน้ำตาล (Saccharification) และการนำน้ำตาลที่ได้เป็นแหล่งอาหารในกระบวนการหมักรวมกับจุลินทรีย์ (Fermentation) ในการผลิตเอทานอลหรือกรดแลคติก แต่กระบวนการที่สำคัญคือการปรับสภาพวัตถุดิบมี 4 วิธี ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ, การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมีและการปรับสภาพทางชีวภาพ การปรับสภาพเพื่อลดปริมาณลิกนินที่เป็นตัวขัดขวางในการไฮโดรไลซิสและลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส วัตถุดิบที่สำคัญเป็นพืชที่มี

องค์ประกอบของเซลลูโลสปริมาณมาก วัสดุเซลลูโลสที่เหลือใช้ทางการเกษตรมีหลายอย่าง เช่น เปลือกสับปะรด และชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งทางการเกษตรที่น่าสนใจเพิ่มมูลค่า เปลือกสับปะรดจะเกิดจากการเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมสับปะรดประมาณ 29 - 40 % ของน้ำหนักสับปะรดทั้งหมด มีปริมาณเซลลูโลสมาก และมีเฮมิเซลลูโลส น้ำตาล คาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ (Choonut et al., 2014) ส่วนเหลือทิ้งที่น่าสนใจเปลือกสับปะรดมี ปริมาณเซลลูโลส 21.16 % (Boonwong et al., 2014) ส่วนชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลดิบ โดยการนำอ้อยมาคั้นน้ำออก ส่วนที่เป็นน้ำนำไปผลิตน้ำตาลดิบ ส่วนที่เหลือคือชานอ้อย มาจากโรงงานน้ำตาล โดยจะมีอยู่ประมาณ 46 โรง (นาวัร ยูโซ๊ะและสาพีเย๊าะ กูนิง, 2544) จะมีปริมาณเซลลูโลส 65.42 % (วิทยา ปั้นสุวรรณ และคณะ, 2544) การนำอ้อยมาหีบหรือใช้ความดันไฮโดรลิก จะประกอบด้วยน้ำ 36 % และ 64 % เป็นส่วนที่เหลือทิ้งมีส่วนของเส้นใย (Wang et al., 2022) ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของพืช ได้แก่ ลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส สิ่งที่น่าสนใจคือ องค์ประกอบที่เป็นเซลลูโลสของพืชซึ่งมีปริมาณมาก สามารถนำส่วนเหลือทิ้งผ่านกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบเพื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลส และผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และสามารถนำไปต่อยอดในการผลิตเอทานอล

งานวิจัยนี้สนใจการนำส่วนที่เหลือทิ้งจากเปลือกสับปะรดและชานอ้อย มาเพิ่มมูลค่าด้วยกระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสได้เป็นน้ำตาลโดยศึกษากระบวนการปรับสภาพและย่อยทางเคมีร่วมกับกายภาพ ซึ่งการปรับสภาพใช้สารละลายทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก แอมโมเนียมซัลเฟต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการย่อยทางเคมีร่วมกับกายภาพ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยส่วนเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งสองชนิด และสามารถนำไปต่อยอดในการผลิตเอทานอลโดยอาหารให้แก่เชื้อจุลินทรีย์ และสามารถนำไปเป็นแหล่งอาหารในผลิตพลาสติกชีวภาพให้แก่เชื้อจุลินทรีย์

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก แอมโมเนียมซัลเฟต และโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยทางเคมีร่วมกับกายภาพ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % , กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % กับอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath), กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % กับหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) และกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % กับเครื่องโซนิเคท (sonicator)

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 เปลือกสับปะรด (พันธุ์ปัตตาเวีย)

นำเปลือกสับปะรด มาหั่นเป็นชิ้นเล็ก (ขนาด 0.5 เซนติเมตร) จากนั้นนำมา อบที่อุณหภูมิ 60

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เก็บในถุงซิปล๊อก ใส่ในโถดูดความชื้น

1.2 ชานอ้อย (พันธุ์สุพรรณ)

นำชานอ้อย หั่นเป็นท่อน นำไปผึ่งแดดให้แห้ง (ขนาด 0.5 เซนติเมตร) อบตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บในถุงซิปล๊อก ใส่ในโถดูดความชื้น

2. การปรับสภาพเปลือกสับปะรดและชานอ้อย

นำเปลือกสับปะรดและชานอ้อยที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 0.5 เซนติเมตร แช่ในสารละลาย 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) ความเข้มข้น 2 % โดยใช้เปลือกสับปะรด 10 กรัม ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร และใช้เครื่องเขย่าอัตโนมัติตั้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำเปลือกสับปะรดไปต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 240 นาที หลังจากนั้นนำเปลือกสับปะรดที่ต้มมากรองด้วยผ้าขาวบางและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ตะกอนสับปะรดที่ได้จากขั้นตอนนี้ เรียกว่า “เปลือกสับปะรดหลังปรับสภาพ” ส่วนของชานอ้อย นำมาล้างด้วยอะซีโตน 0.5 % ที่เย็น กรองเอาแต่ตะกอนกากอ้อย เรียกว่า ชานอ้อยหลังปรับภาพ เปลือกสับปะรดและชานอ้อยก่อนกับหลังปรับสภาพ ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ได้แก่ เซลลูโลส ลิกนิน และโฮโลเซลลูโลส

3. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเปลือกสับปะรดและชานอ้อย

3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโฮโลเซลลูโลสโดยวิธี acid chlorite ด้วยวิธีของ Browing (1963) มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 160 มิลลิลิตร และ กรดอะซิติก (CH_3COOH) 0.5 มิลลิลิตร และ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 1.5 ± 0.1 กรัม ตามลำดับลงในขวดรูปชมพู่ และนำขวดรูปชมพู่ ไปตั้งใน อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 70 - 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเขย่าขวดอย่างสม่ำเสมอ หลังจากครบ 1 ชั่วโมง เติมกรดอะซิติก 0.5 มิลลิลิตร ตามด้วย โซเดียมคลอไรด์ 1.5 กรัม ลงในสารละลายที่ยังร้อนอยู่แล้วเขย่าขวด หลังจากครบ 2 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง ให้เติมกรดอะซิติกและโซเดียมคลอไรด์ เมื่อครบชั่วโมงนำขวดรูปชมพู่ มาวางในอ่างน้ำแข็งจนกระทั่งสารละลายในขวดมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แล้วนำสารละลายมากรอง ล้างตะกอนด้วยน้ำเย็น หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากอบแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก และเก็บตัวอย่างไว้วิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสต่อไป พร้อมคำนวณหาปริมาณโฮโลเซลลูโลส จากสมการ

$$\% \text{ โฮโลเซลลูโลส} = [A/w] \times 100$$

A คือ น้ำหนักแห้งของโฮโลเซลลูโลสหลังการอบ (กรัม)

w คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กรัม)

3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสโดยวิธี TAPPI T203 om-88 (1992) มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ชั่งตัวอย่างจากการวิเคราะห์โฮโลเซลลูโลส 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร เติม

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 % ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ลงไป ปรับอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ 2.5 ± 0.2 องศาเซลเซียส พร้อมคนสารละลายจนกระทั่งเยื่อกระจายอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยให้ปริมาตรรวมของสารละลายเท่ากับ 100 มิลลิลิตร คนสารละลายต่อเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วคนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที กรองสารละลายแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและตามด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น 10 % นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พร้อมคำนวณหา % เซลลูโลส จากสมการ

$$\% \text{ เซลลูโลส} = [A/w] \times 100$$

A คือ น้ำหนักแห้งของเซลลูโลสหลังการอบ (กรัม)

w คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กรัม)

3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณลิกนินวิเคราะห์ตาม TAPPI T222 om-88 (1988) ขั้นตอนการทดลองดังนี้

ชั่งตัวอย่างจากการวิเคราะห์เซลลูโลสประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร วางบีกเกอร์ลงในอ่างที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส แล้วค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 72 % ที่แช่เย็นอุณหภูมิ 10-15 องศาเซลเซียส ลงไปปริมาตร 15 มิลลิลิตร พร้อมคนอย่างสม่ำเสมอ ทุก ๆ 15 นาที เพื่อให้ผสมกันดีขึ้นปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา แล้วนำออกจากอ่างน้ำแข็งมาตั้งทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมคนสารละลายอย่างสม่ำเสมอ เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเทสารละลายในบีกเกอร์ลงไปในขวดก้นกลม พร้อมทั้งเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงระดับ 135 มิลลิลิตร ทำการรีฟลักซ์ (Reflux) สารละลาย 4 ชั่วโมง จากนั้นเทสารละลายทั้งหมดใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปกรองแล้วล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำออกมาทำให้เย็นลงในโถดูดความชื้น หลังจากนั้นจึงชั่งน้ำหนัก พร้อมคำนวณหา % ลิกนิน จากสมการ

$$\% \text{ ลิกนิน} = [A/w] \times 100$$

A คือ น้ำหนักแห้งของลิกนินหลังการอบ (กรัม)

w คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กรัม)

4. การย่อยเปลือกสับปะรดและชานอ้อย

4.1 การย่อยเปลือกสับปะรดและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 %

นำเปลือกสับปะรดและชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพที่ดีที่สุด ปริมาณ 1 กรัม ในกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 30 และ 40 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีไดไนโตรซาลิไซลิก (dinitrosalicylic acid, DNS) (Miller, 1959) และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐาน

4.2 การย่อยเปลือกสับปะรดและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % กับอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

นำเปลือกสับปะรดและชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพที่ดีที่สุด ปริมาณ 1 กรัม ในกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 % ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 30 และ 40 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีไดไนโตรซาลิไซลิก (dinitrosalicylic acid, DNS) (Miller, 1959) และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐาน

4.3 การย่อยเปลือกสับปะรดและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1% กับหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave)

นำเปลือกสับปะรดและชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพที่ดีที่สุด ปริมาณ 1 กรัม ในกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 % ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร กับหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 30 และ 40 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีไดไนโตรซาลิไซลิก (dinitrosalicylic acid, DNS) (Miller, 1959) และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐาน

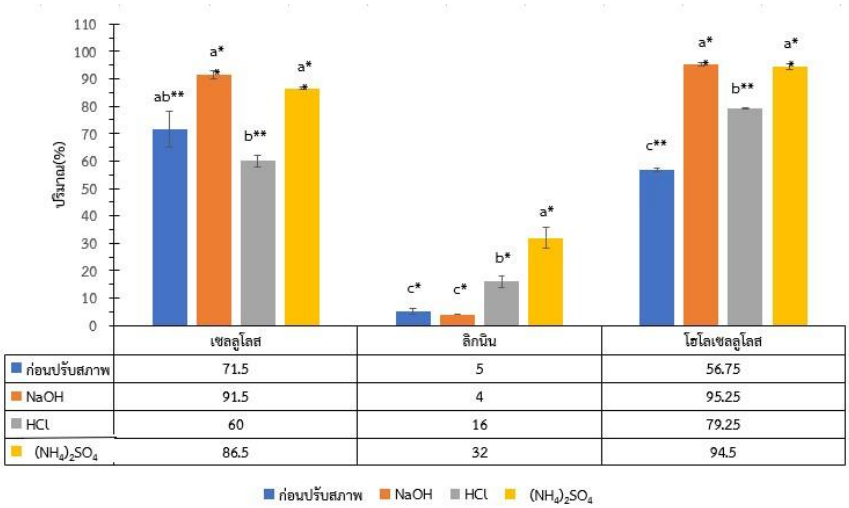
4.4 การย่อยเปลือกสับปะรดและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1% เครื่อง Ultrasonic bath

นำเปลือกสับปะรดและชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพที่ดีที่สุดจากการทดลองข้างต้น มา 1 กรัม ในกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 % ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร กับเครื่อง Ultrasonic bath ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 30 และ 40 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เอาส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีไดไนโตรซาลิไซลิก (dinitrosalicylic acid, DNS) (Miller, 1959) และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐาน

ผลการวิจัย

ผลการทดลองการปรับสภาพ

การใช้วิธีปรับสภาพเปลือกสับปะรดและชานอ้อยโดยใช้วิธีทางเคมี ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) ความเข้มข้น 2 % ซึ่งจากการทดลองการปรับสภาพเปลือกสับปะรด จะได้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากก่อนการปรับสภาพ ซึ่งก่อนปรับสภาพประกอบด้วยเซลลูโลส 71.50 % ลิกนิน 5.00 % และโฮโลเซลลูโลส 56.75 % เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 91.50 % ลิกนิน 4.00 % และโฮโลเซลลูโลส 95.25 % ส่วนสารละลายไฮโดรคลอริกและสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตได้ปริมาณลิกนิกเพิ่มมากขึ้นกว่าก่อนปรับสภาพ ดังภาพที่ 1



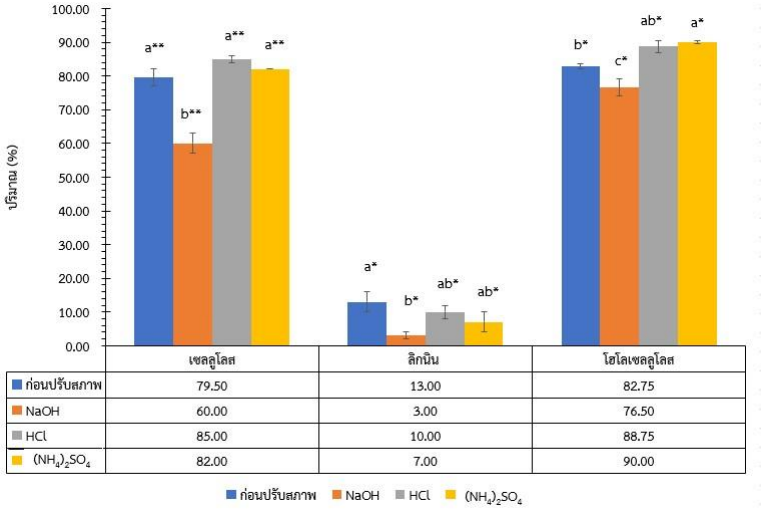
	เซลลูโลส	ลิกนิน	โฮโลเซลลูโลส
ก่อนปรับสภาพ	71.5	5	56.75
NaOH	91.5	4	95.25
HCl	60	16	79.25
$(NH_4)_2SO_4$	86.5	32	94.5

** = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) * = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในปริมาณเดียวกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT ($P \leq 0.01$) ,($P \leq 0.05$) เซลลูโลสมีค่า C.V.(%) 6.38 ลิกนินมีค่า C.V.(%) 22.77 และโฮโลเซลลูโลส ค่า C.V.(%) 1.28

ภาพที่ 1 การเปรียบเทียบปริมาณเซลลูโลส ลิกนิน และโฮโลเซลลูโลสก่อนและหลังการปรับสภาพในเปลือกสับปะรด

การทดลองการปรับสภาพชานอ้อยพบว่าจะได้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากก่อนการปรับสภาพ ซึ่งก่อนปรับสภาพเซลลูโลส 79.50 % ลิกนิน 13.00 % และโฮโลเซลลูโลส 82.75 % เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 85.00 % ลิกนิน 10.00 % และโฮโลเซลลูโลส 88.75 % ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตได้ปริมาณลิกนิกลดลงแต่ส่งผลให้ปริมาณเซลลูโลสลดลงและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยกว่าก่อนปรับสภาพ ดังภาพที่ 2



	เซลลูโลส	ลิกนิน	โฮโลเซลลูโลส
ก่อนปรับสภาพ	79.50	13.00	82.75
NaOH	60.00	3.00	76.50
HCl	85.00	10.00	88.75
$(NH_4)_2SO_4$	82.00	7.00	90.00

** = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) * = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

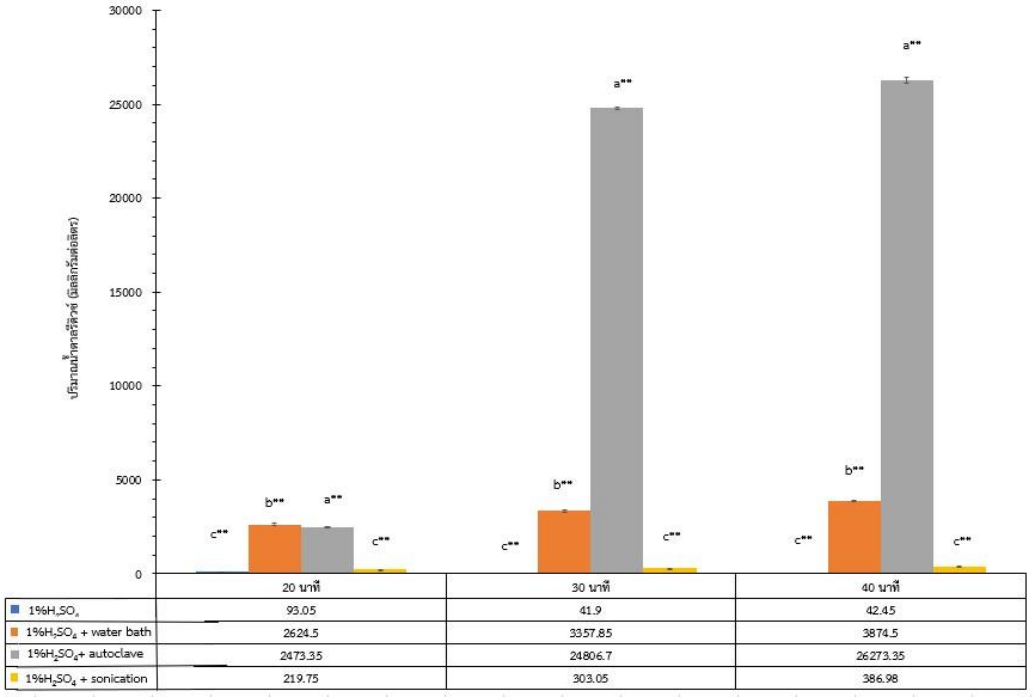
ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในปริมาณเดียวกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT ($P \leq 0.01$), ($P \leq 0.05$) เซลลูโลสมีค่า C.V.(%) 3.72 ลิกนินมีค่า C.V.(%) 41.11 และโฮโลเซลลูโลส ค่า C.V.(%) 2.66

ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบปริมาณเซลลูโลส ลิกนิน และโฮโลเซลลูโลสก่อนและหลังการปรับสภาพในชานอ้อย

ผลการย่อยโดยวิธีทางเคมีร่วมกับกายภาพ

การเปรียบเทียบการย่อยโดยใช้วิธีทางเคมีร่วมกับกายภาพ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับการใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับการใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) และ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับการใช้โซนิเคท (sonicate) โดยใช้เวลาแตกต่าง คือ 20 30 และ 40 นาที

ผลการทดลองการย่อยเปลือกสับปะรดโดยใช้วิธีทางเคมีร่วมกับกายภาพ จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเคมีร่วมกับวิธีทางกายภาพจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าการใช้วิธีทางเคมีอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองการใช้ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับการใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด เท่ากับ 26,273.35 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาใช้ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับการใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) เวลา 40 นาที ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 3,874.50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และการใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1% กับการใช้โซนิเคท (sonicate) เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 386.98 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังภาพที่ 3



	20 นาที	30 นาที	40 นาที
1%H_2SO_4	93.05	41.9	42.45
1%H_2SO_4 + water bath	2624.5	3357.85	3874.5
1%H_2SO_4+ autoclave	2473.35	24806.7	26273.35
1%H_2SO_4 + sonication	219.75	303.05	386.98

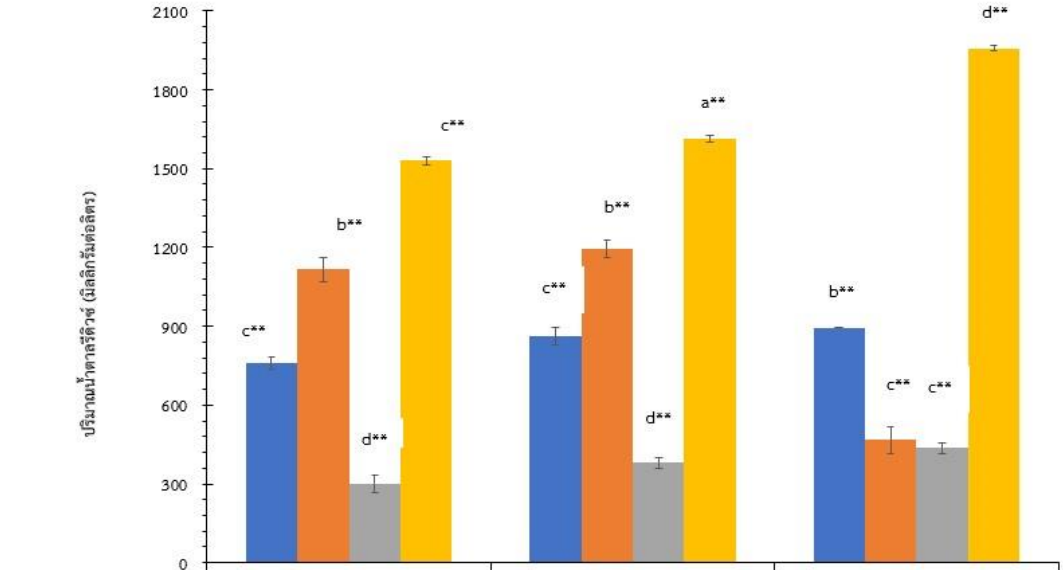
** = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในเวลาเดียวกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT ($P \leq 0.01$) 4 วิธีการ เวลา 20 นาที ค่า C.V.(%) 0.78 4 วิธีการ เวลา 30 นาที มีค่า C.V.(%) 0.94 และ 4 วิธีการ เวลา 40 นาที ค่า C.V.(%) 1.61

ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบการย่อยเปลือกสับปะรดโดยใช้วิธีทางเคมีร่วมกับวิธีทางกายภาพ

ผลการทดลองการย่อยชานอ้อยโดยใช้วิธีทางเคมีร่วมกับกายภาพ จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการใช้เคมีร่วมกับวิธีทางกายภาพจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าการใช้วิธีทางเคมีอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองการใช้ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับการใช้โซนิเคท (sonicate) เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 1,957.80 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาใช้ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

893.40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร การใช้กรดซัลฟิวริกกับการใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ใช้เวลา 20-30 นาที ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ช่วง 1,115.60-1,193.35 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เวลา 40 นาที จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงและการทดลองสุดท้ายการใช้ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1% กับการใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 435.60 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



	20 นาที	30 นาที	40 นาที
1 1%H_2SO_4	760.05	860.05	893.4
1%H_2SO_4 + water bath	1115.6	1193.35	466.4
1%H_2SO_4+ autoclave	302.25	380.05	435.6
1%H_2SO_4 + sonication	1530.05	1613.4	1957.8

** = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในเวลาเดียวกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT ($P \leq 0.01$) 4 วิธีการ เวลา 20 นาที ค่า C.V.(%) 4.74 4 วิธีการ เวลา 30 นาที มีค่า C.V.(%) 3.73 และ 4 วิธีการ เวลา 40 นาที ค่า C.V.(%) 4.15

ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบการย่อยชานอ้อยโดยวิธีทางเคมีร่วมกับวิธีทางกายภาพ

อภิปรายผล

การปรับสภาพของเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสและลดปริมาณลิกนินซึ่งมีการปรับสภาพได้หลายวิธี ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ เป็นต้น จากการทดลองเป็นการปรับสภาพทางเคมีร่วมกับการใช้ความร้อน ซึ่งการปรับสภาพทางเคมีส่วนใหญ่ใช้สารเคมี ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดอะซิติก (CH_3COOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) สารละลายแอมโมเนีย ($NH_3.H_2O$) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งการใช้เทคนิคการปรับสภาพชีวมวลเป็นการใช้วิธีทางกายภาพโดยใช้แรงทางกลเป็นการทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลงซึ่งการบดมีผลลดความเป็นผลึกและเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับโครงสร้างชีวมวลได้ (รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซิสของชีวมวลและเพิ่มผลผลิตของน้ำตาลในการย่อยเซลลูโลสของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ซึ่งในการทดลองใช้วิธีการทางเคมี

โดยใช้สารเคมีที่เป็นกรด ด่างและสารละลายอินทรีย์ ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต จะมีวิธีการหลายวิธีจากผลการทดลองปรับสภาพเปลือกสับปะรด สารละลายที่มีความเป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สลายพันธะไกลโคซิดิกของลิกโนเซลลูโลสโดยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การใช้ด่างในการปรับสภาพจะสามารถแยกลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจากลิกโนเซลลูโลสมีผลต่อการไฮโดรไลซิส (Xu et al., 2023) จึงส่งผลให้การปรับสภาพของเปลือกสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 91.50 %, ลิกนิน 4.00 % และโฮโลเซลลูโลส 95.25 % การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง แต่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน สภาวะที่ไม่รุนแรงจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของลิกนิน ส่งผลให้มีความสามารถในการละลายลิกนินสูง โดยเฉพาะสำหรับชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินต่ำ เช่น ไม้เนื้ออ่อนและหญ้า เนื่องจากสภาวะที่ไม่รุนแรง การย่อยสลายของน้ำตาลเป็นเฟอร์ฟูรัล, 5-hydroxyl methyl furfural และกรดอินทรีย์จึงมีจำกัด (Harmsen, 2010) นอกจากนี้การใช้ด่างเจือจางในวัตถุดิบที่เป็นเซลลูโลสจะทำให้เกิดการบวมภายในซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาทำให้วัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้นได้ ช่วยลดความเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส (สาลินี ศรีวงษ์ชัย, 2560; รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558) และการปรับสภาพด้วยชานอ้อยด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 85.00 %, ลิกนิน 10.00 % และโฮโลเซลลูโลส 88.75 % แสดงว่าการปรับสภาพชีวมวลด้วยวิธีกรดส่งผลให้สามารถเข้าถึงเอนไซม์ที่มีต่อเซลลูโลสได้ดีขึ้น การปรับสภาพด้วยกรดเจือจางจะทำให้มีการใช้กรดน้อยลง แต่พลังงานที่จำเป็นสำหรับกระบวนการโดยรวมจะสูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในทางกลับกัน การใช้กรดเข้มข้นจะช่วยลดการใช้พลังงานเนื่องจากอุณหภูมิของปฏิกิริยาลดลง แต่ความเป็นกรดที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการผลิตสารยับยั้งการหมัก (เฟอร์ฟูรัล, 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล) (Mankar et al., 2021)

การไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลสใช้เวลาที่อุณหภูมิเฉพาะเพื่อให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากสายโซ่เซลลูโลส ส่วนมากใช้กรดซึ่งอาจเป็นกรดเจือจางหรือเข้มข้น (มิณฑิตา พิเชฐพงศ์วิมุติ, 2561) เปลือกสับปะรดและชานอ้อยที่ผ่านขั้นตอนการปรับสภาพ เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิส โดยใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับเคมีผลปรากฏว่าการย่อยเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพวิธีที่ดีที่สุดคือ การใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % ร่วมกับหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) ใช้เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุดเท่ากับ 26,273.33 มิลลิกรัมต่อลิตร สอดคล้องจากงานวิจัยของ Pal et al. (2017) การนำรำข้าวสาลีผ่านขั้นตอนการไฮโดรไลซิสโดยใช้สภาวะอุณหภูมิห้อง ให้ความร้อน (60 นาทีและ 120 นาที) และหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (30 นาที) โดยร่วมกับกรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองวิธีการใช้กรดซัลฟิวริกร่วมกับความร้อนจะได้ผลที่ดีที่สุด แต่ถ้าเปรียบเทียบการใช้วิธีหม้อนึ่งความดันไอน้ำกับกรดซัลฟิวริกจะมีค่าดีที่สุด ช่วยให้ปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นจาก 3.10-3.86 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรต่อนาที ใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำที่เวลา 30 นาที ที่ 121 องศาเซลเซียส ใช้กรดซัลฟิวริก 1% และสอดคล้องงานวิจัยของ Debiagi et al. (2020) การใช้รำข้าวสาลีใช้วิธีการไฮโดรไลซิสใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำร่วมกับน้ำ กรด

ซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลปรากฏว่าวิธีการใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำได้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 617.90 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรและมีปริมาณกลูโคส 347.30 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ส่วนผลการทดลองของการย่อยชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพวิธีการที่ดีที่สุด คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับการโซนิเคท (sonicate) ใช้เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด เท่ากับ 1,957.78 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้อัลตราโซนิคในการช่วยย่อยส่งผลทำให้คลื่นอัลตราโซนิกเกิดฟองอากาศขนาดเล็กในตัวทำละลาย เมื่อฟองอากาศแตกใกล้ๆ กับผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์แตกและปลดปล่อยสิ่งที่อยู่ภายในเซลล์ (สังเวย เสวกวิหารี, 2562) ส่งผลให้กรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการย่อยมากขึ้นจึงทำให้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการใช้กรดซัลฟิวริกเพียงอย่างเดียว การใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำและอัลตราโซนิกร่วมกับกรดและเบสซึ่งเป็นวิธีทางกายภาพร่วมกับเคมีมีประสิทธิภาพมากกว่า สภาวะที่มีการใช้ร่วมกันจะมีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลสูง (Debiagi et al., 2020) สอดคล้องงานวิจัยของ Debiagi et al. (2020) การใช้รำข้าวสาลีใช้วิธีการไฮโดรไลซิสใช้อัลตราโซนิกร่วมกับน้ำ กรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ผลปรากฏว่าวิธีการใช้อัลตราโซนิกปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 328.9 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรและมีปริมาณกลูโคส 279.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

สรุป

จากผลการทดลองการปรับสภาพโดยวิธีทางเคมีโดยใช้สารละลายที่แตกต่าง ผลปรากฏว่าการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 91.50 %, ลิกนิน 4.00 % และโฮโลเซลลูโลส 95.25 % ดีที่สุด ส่วนชานอ้อยใช้วิธีการปรับสภาพที่ดีที่สุดคือ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 % จะได้ปริมาณเซลลูโลส 85.00 % ลิกนิน 10.00 % และโฮโลเซลลูโลส 88.75 % และเมื่อนำวัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสโดยใช้วิธีทางเคมีร่วมกับวิธีทางกายภาพ ผลปรากฏว่าการย่อยเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพวิธีการย่อยที่ดีที่สุด คือ การใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) ใช้เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด เท่ากับ 26,273.35 มิลลิกรัมต่อลิตร และวิธีการย่อยชานอ้อยได้ดีที่สุดคือ การใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 1 % กับโซนิเคท (sonicate) ใช้เวลา 40 นาที จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุดเท่ากับ 1,957.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งวิธีการไฮโดรไลซิสการใช้กรดเพียงอย่างเดียวกับการใช้กรดร่วมกับกายภาพแสดงว่าการใช้กรดร่วมกับกายภาพจะได้ปริมาณน้ำตาลมากกว่าการใช้กรดเพียงอย่างเดียว สามารถนำไปต่อยอดในการเป็นอาหารเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตเอทานอล และสามารถนำไปเป็นแหล่งอาหารในผลิตพลาสติกชีวภาพให้แก่เชื้อจุลินทรีย์

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมชนิดของน้ำตาลที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้เทคนิค HPLC

2. ศึกษาเพิ่มเติมการใช้เทคนิคการย่อยที่แตกต่างกันมีผลต่อการผลิตน้ำตาลมากหรือน้อยกว่าการใช้เอนไซม์ในการย่อยวัตถุดิบ

3. ศึกษาพื้นผิวของวัตถุดิบก่อนและหลังการปรับสภาพเพื่อให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับสภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ที่สนับสนุนในการทำวิจัย และสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

รายการอ้างอิง

มิณฑิตา พิเชฐพงศ์วิมุติ. (2561). *การแยกเซลลูโลสและกลูโคสจากสารละลายไฮโดรไลเซทของหญ้าเนเปียร์ด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน*. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

สาลินี ศรีวงษ์ชัย. (2560). *การผลิตไบโอดีเซลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการเทคโนโลยีชีวภาพ.* มหาวิทยาลัยบูรพา.

สังเวย เสวกวิหารี. (2562). *การผลิตเอทานอลจากเปลือกแตงโมโดยกระบวนการหมัก*. สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

นาวัร ยูโซ๊ะและสาพีเย๊าะ กูนิง. (2544). *ประสิทธิภาพของสารดูดวับความชื้นจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร*. ยะลา : มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.

รัชพล พะวงศ์รัตน์. (2558). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. *Science and Technology*. 2(1). 142-157.

วิทยา ปั้นสุวรรณ, ศิริพร เสนียุทธ, เสาวภาคย์ สาริมาน และกุลธิดา อินทรัต**.** (2544). *การผลิตเยื่อที่มีแอลฟาเซลลูโลสสูงและไซโลสจากชานอ้อยโดยวิธีระเบิดด้วยไอน้ำ*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Boonwong, T., Karnnasuta, S., & Srinorakutara, T. (2014). Agricultural wastes potential (pineapple crown, durian peel and sugarcane leaves) on reducing sugar production by using sulfuric acid pretreatment following enzymatic hydrolysis. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, *19*(3), 361–370.

Browing, B. L. (1963). Chlorite Holocellulose. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. New York,Interscience Publishers.

Choonut, A., Saejong, M., & Sangkharak, K. (2014). The Production of Ethanol and Hydrogen from Pineapple Peel by Saccharomyces Cerevisiae and Enterobacter Aerogenes. Energy Procedia, 52, 242 – 249.

Debiagi, F., Madeira, T. B., Nixdorf, S. L., & Mali, S. (2020). Pretreatment Efficiency Using Autoclave High-Pressure Steam and Ultrasonication in Sugar Production from Liquid H ydrolysates and Access to the Residual Solid Fractions of Wheat Bran and Oat Hulls. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *190*(1), 166–181.

Harmsen, P. F. H. (Paulien). (2010). *Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass*. Wageningen UR, Food & Biobased Research.

Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334, 125235.

Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugars. *Analytical Chemistry*, *31*(3), 426–428.

Pal, S., Handa, J., & Jain, U. K. (2017). Chemical Hydrolysis Optimization for Release of Sugars from Wheat Bran. In *IJISET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* (Vol. 4).

TAPPI T203 om-88. (1992). Alpha, bata, and grama cellulose in pulp.

TAPPI T222 om-88. (1988). Acid-insoluble lignin in wood and pulp.

Wang, D., Tian, J., Guan, J., Ding, Y., Wang, M.L., Tonnis, B.D., Liu, J., & Huang, Q. (2022). Valorization of sugarcane bagasse for sugar extraction and residue as an adsorbent for pollutant removal. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,* 10.

Xu, P., Shu, L., Li, Y., Zhou, S., Zhang, G., Wu, Y., & Yang, Z. (2023). Pretreatment and composting technology of agricultural organic waste for sustainable agricultural development. *Heliyon*, 9(5), e16311.