การผลิตไบโอเอทานอลจากเปลือกกล้วยน้ำว้าโดยใช้ยีสต์ผง

Production Of Bio-Ethanol from Banana Peels by Using Baker' S Yeast

อดิศร ไชยบาง, [1] ปาจรีย์ เที่ยงแท้ [1] และ รัชพล พะวงศ์รัตน์ [2]*

Adisorn Chaibang, [1] Pajaree Thiangthae [1] and Ratchapol Pawongrat [2*]

Received 11 April 2024, Revised 1 June 2024, Accepted 7 June 2024

ABSTRACT

The objective of this research is to explore the utilization of banana peels for ethanol production. The pretreatment conditions explored were with 0, 2.5 or 5% sulfuric acid at room temperature (RT) or autoclaved at 121°C (AU). Pretreating with 2.5% H_2SO_4 AU increased the cellulose content and reduced the hemicellulose content by 52.13 ± 8.95% and 30.67 ± 2.67% respectively ($p<0.05$). In contrast, the reducing sugar content of the 2.5% H_2SO_4 AU pretreated sample was lower than that of the distilled-water-pretreated-with-autoclave sample (Water AU) and was not significantly different from that of the non-pretreated sample at $p<0.05$ (84.60 ± 11.82 mg/g, 296.13 ± 22.25 mg/g and 117.38 ± 4.21 mg/g, respectively). Further analysis of the hydrolysis conditions showed that the non-pretreated banana peel sample hydrolyzed with 10% w/v H_2SO_4 at 50°C for 24h yielded the highest amount of reducing sugar (92.49 ± 3.45 mg/g) compared to other samples at $p<0.05$. The best fermentation condition for the hydrolyzed non-pretreated sample using baker's yeast was found to be at 18 hours fermentation time, 35°C, and shaking speed at 150 rpm. The content of ethanol (P), the ethanol yield ($Y_{P/S}$) and the fermentation efficiency (E_Y) were measured at 7.26 mg/g, 0.09 mg/mg and 17.05 ± 0.09% respectively ($p<0.05$). This study shows that banana peels have potential to produce ethanol, but the yield may be too low. Further research is needed to increase the yield of this process.

Keywords: Banana peel, Pretreatment, Hydrolysis, Fermentation, Bioethanol, Baker's yeast

[1] สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

BioScience Program, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

[2*] สาขาวิทยาศาสตร์ชีวผลิตภัณฑ์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Bioproduct Science Program, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* Corresponding author: E-mail address: ratchapol.p@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากเปลือกกล้วยน้ำว้าที่เหลือทิ้งมาใช้เพื่อผลิตเอทานอลโดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ ได้แก่ ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0, 2.5 หรือ 5% ที่อุณหภูมิห้อง (RT) หรือที่อุณหภูมิ 121 °C โดยใช้ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (AU) พบว่าการปรับสภาพด้วย 2.5% H2SO4 AU ทำให้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นและเฮมิเซลลูโลสลดลงมากที่สุด คือ 52.13 ± 8.95% และ 30.67 ± 2.67% ตามลำดับ ($p<0.05$) แต่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) และการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Water AU) คือ 84.60 ± 11.82, 117.38 ± 4.21 และ 296.13 ± 22.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ($p<0.05$) ส่วนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วยน้ำว้า ด้วยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 5 หรือ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) ที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ คือ 92.49 ± 3.45 มิลลิกรัมต่อกรัม และผลการศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ไม่ปรับสภาพและไฮโดรไลซ์ด้วย กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 10 น้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ baker's yeast ที่อุณหภูมิ 35°C ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที พบว่าเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหมักคือ 18 ชั่วโมง โดยให้ปริมาณเอทานอล (P), ผลผลิตเอทานอล ($Y_{P/S}$) และประสิทธิภาพการหมัก (E_Y) เท่ากับ 7.26 มิลลิกรัมต่อกรัม, 0.09 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม และ 17.05 ± 0.09% ซึ่งจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เปลือกกล้วยน้ำว้ามีศักยภาพในการผลิตเอทานอล แต่ประสิทธิภาพผลผลิตอาจจะยังไม่สูงมาก ทั้งนี้หากมีการศึกษาและปรับปรุงอาจจะช่วยเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้นได้ต่อไป

คำสำคัญ: เปลือกกล้วยน้ำว้า การปรับสภาพ ไฮโดรไลซิส การหมัก ไบโอเอทานอล ยีสต์ผง

บทนำ

พลังงานเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของโลก เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานทุกภาคส่วนทั้งในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและการคมนาคมขนส่ง โดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีความต้องการใช้เป็นปริมาณมากจึงทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศไทยในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากภาวะทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการหาพลังงานทดแทนจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างมาก เอทานอลก็เป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยมสูง ซึ่งกระบวนการผลิตเอทานอลเกิดได้จากการหมักสามารถใช้ผักและผลไม้ เช่น มันสำปะหลัง หรือเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบได้ เอทานอลสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเบนซินหรือดีเซลประโยชน์ของการใช้ เอทานอลจะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศและช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตร (โอภาส และกนกพร, 2559)

กล้วย (Banana) เป็นพืชผลไม้ที่สำคัญและมีการบริโภคกันอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นของตระกูล Musaceae และปลูกได้ดีในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน (Albarelli *et al.,* 2011) ซึ่งในประเทศไทยปลูกกล้วยเป็นจำนวนมากมีการส่งออกกล้วยเป็นอันดับ 2 ของอาเซียน และอันที่ 18 ของโลก และมีหลายสายพันธุ์ พบว่ากล้วยน้ำว้าจะเป็นสายพันธุ์หนึ่งที่นิยมปลูกกันมาก มีพื้นที่ในการเพาะปลูกมากกว่า 328,000 ไร่ และให้ผลผลิตสูงถึง 184,000 ตัน เนื่องจากกล้วยน้ำว้าปลูกง่ายและเจริญได้ดีทุกฤดูกาล นอกจากนี้กล้วยน้ำว้ายังสามารถนำมาแปรรูปเพื่อสร้างรายได้อีกมากมาย เช่นการแปรรูปในรูปของผลิตภัณฑ์อาหาร และการแปรรูปในเชิงเกษตรกรรม จากผลที่เกิดจากการแปรรูปและการนำไปใช้ประโยชน์ของ

กล้วยน้ำว้า พบว่าส่วนเปลือกของกล้วยเป็นวัสดุเหลือทิ้งซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยพบว่าเปลือกกล้วยคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 30-40% ของน้ำหนักรวมของผลไม้ (Odedina *et al.,* 2017) นอกจากนี้ยังเป็นชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) ซึ่งมีปริมาณเซลลูโลสสูงและมีลิกนินต่ำ (John *et al.,* 2019) จากงานวิจัยของ Jahid *et al.* (2018) และ เหรียญทอง และ จิราภรณ์ (2554) พบว่าเปลือกกล้วยมีปริมาณเซลลูโลส 34.8% เฮมิเซลลูโลส 9.4% และลิกนิน 4.5% จึงมีหลายงานวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานชีวภาพ เช่น การผลิตไบโอบิวทานอลจากเปลือกกล้วย (Mishra *et al*., 2020) การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกกล้วย (โชติพงศ์และคณะ, 2552) โดยการผลิตเอทานอลต้องผ่านขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการปรับสภาพ (Pretreatment) เพื่อปรับให้โครงสร้างของชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสให้มีความเหมาะสมในการย่อยสลาย ขั้นตอนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือการย่อยสลาย เพื่อย่อยสลายโครงสร้างชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือน้ำตาลรีดิวซ์เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมัก และขั้นตอนการหมัก (Fermentation) เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือน้ำตาลรีดิวซ์ให้เป็นเอทานอลโดยเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสม จากงานวิจัยของ Guo *et al.* (2018) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกกล้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดเอทานอล คือ สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% ภายใต้แรงดันสูง เป็นเวลา 15 นาที ทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Itelima *et al.* (2013) พบว่าเปลือกกล้วยและเปลือกสับปะรดมีศักยภาพในการใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตเอทานอล นอกจากนี้ งานวิจัยของ Hamzah *et al.* (2019) พบว่าการปรับสภาพด้วยสารเคมีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายและการไฮโดรไลซิส และยังพบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลที่ผลิตจากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่ใช้ องค์ประกอบของพื้นผิว อุณหภูมิ เวลา ความเข้มข้นของกรด และ ค่า pH เป็นต้น

จากข้อมูลและการศึกษาของนักวิจัยในข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเปลือกกล้วยน้ำว้าที่เหลือทิ้งมาใช้เพื่อผลิตเอทานอลโดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและทำศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเพื่อเพิ่มศักยภาพในการหมักเอทานอล เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมเปลือกกล้วยน้ำว้า

การเตรียมเปลือกกล้วยน้ำว้า ดัดแปลงจากวิธีการของ สุขจีและคณะ (2563) และ Hamzah *et al.* (2019) โดยนำเปลือกกล้วยน้ำว้ามาตากแดดประมาณ 3-4 วัน อบด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมาบดด้วยเครื่องปั่น (ขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร) เก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน วิเคราะห์หาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และวิเคราะห์โครงสร้างพันธะเคมี โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกกล้วย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกกล้วย ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Hamzah *et al.* (2019) โดยทำการปรับสภาพเปลือกกล้วยโดยใช้น้ำกลั่น และสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% และ 5% (น้ำหนักต่อปริมาตร) นำเปลือกกล้วย 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นและสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% และ 5% (น้ำหนักต่อปริมาตร)

จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ผสมให้เข้ากัน ทำการปรับสภาพที่สภาวะที่แตกต่างกัน ได้แก่ ที่อุณหภูมิห้อง (RT) เป็นเวลา 30 นาที และในหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (AU) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เป็นกลาง (pH7) โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จากนั้นทำการกรองเพื่อแยกตัวอย่าง ส่วนที่เป็นของเหลว (Liquid) นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และส่วนที่เป็นของแข็ง (Solid) ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างของแข็ง วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว และวิเคราะห์โครงสร้างพันธะเคมี

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วย ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Hamzah *et al.* (2019) นำตัวอย่างเปลือกกล้วยที่ส่วนของแข็ง (solid) ที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) และปรับสภาพ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 5% และ 10% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (5:1) (ปริมาตร/น้ำหนัก) ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 50 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปย่อยด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (shaker incubator) ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองเพื่อแยกตัวอย่าง นำส่วนที่เป็นของเหลว ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เป็นกลาง (pH7) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

4. การศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกกล้วย

การศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกกล้วย ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Hamzah *et al.* (2019) โดยใช้เชื้อยีสต์ผง (baker's yeast) (ยี่ห้อ SAF-INSTANT, ประเทศฝรั่งเศส) 1% (น้ำหนักต่อปริมาตรน้ำตาลรีดิวซ์) ทำการเตรียมตัวอย่างน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากขั้นตอนการไฮโดรไลซิส ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปบ่มด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (shaker incubator) ที่สภาวะอุณหภูมิ 35 °C ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 1, 2, 3, 6, 12, 18, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้น

5. การวิเคราะห์

ตัวอย่างเปลือกกล้วยไม่ปรับสภาพและปรับสภาพมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีการของ ปิยะนุช (2557) ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของเปลือกกล้วย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Jahid *et al.* (2018) ศึกษาโครงสร้างเคมีโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Memon *et al.* (2008) แสกนในช่วงความยาวคลื่น 400-4000 ซม$^{-1}$ และ resolution ที่ 4 เซนติเมตร วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic Acid Method (DNS) ดัดแปลงจาก Miller (1959) วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีการของ ปิยะนุช (2557) วิเคราะห์หาปริมาณเอทานอลด้วยวิธี Potassium dichromate ดัดแปลงจาก Bennett (1971) และนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ผลผลิตเอทานอล ($Y_{P/S}$) เป็นค่าผลผลิตเอทานอลที่เกิดขึ้นแสดงเป็นมิลลิกรัมเอทานอลต่อมิลลิกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ (มิลลิกรัม) อัตราการผลิตเอทานอล (Q_P) เป็นค่าของเอทานอลที่ผลิตที่เกิดขึ้น (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง) และค่าร้อยละของประสิทธิภาพการหมัก (E_Y) เป็นค่าร้อยละของผลผลิตเอทานอลเทียบกับค่าที่ได้ทางทฤษฎี

$$Q_P = \frac{P}{t}$$

$$E_Y = \frac{Y_{P/S}}{0.51} \times 100$$

S คือ ปริมาณน้ำตาลที่ถูกใช้ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

P คือ ความเข้มข้นของเอทานอลที่เกิดขึ้นจริง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาของการผลิตเอทานอลที่ให้ความเข้มข้นสูงสุด

0.51 คือ ค่าคงที่ของผลผลิตเอทานอลทางทฤษฎีโดยเทียบกับน้ำตาลกลูโคส 1 กรัม

6. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ขั้นตอนในการวิจัย ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้สถิติทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$) โดยทั้งหมดของการทดลองใช้โปรแกรม SPSS Statistics 26

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกกล้วยน้ำว้า

จากผลการศึกษาการปรับสภาพเปลือกกล้วยน้ำว้า (Table 1) พบว่าการปรับสภาพมีผลต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้า โดยการปรับสภาพด้วยกรดมีผลทำให้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นและปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงมากกว่าการใช้น้ำกลั่น โดยมีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น 52.13±8.95% เมื่อเทียบกับไม่ปรับสภาพแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และปริมาณเฮมิเซลลูโลสเหลืออยู่ 21.44±7.75% เมื่อเทียบกับไม่ปรับสภาพ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (AU) จะให้ผลดีกว่าการปรับสภาพที่อุณหภูมิห้อง (RT) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jahid *et al.* (2018) พบว่าหลังการปรับสภาพเปลือกกล้วยมีปริมาณเซลลูโลส 34.8 % เฮมิเซลลูโลส 9.4% และลิกนิน 4.5% ส่วนการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างปรับสภาพพบว่าการปรับสภาพมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่าง โดยน้ำหนักที่เหลือหลังจากการปรับสภาพด้วยกรดจะให้การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากกว่าการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น เนื่องจากสารละลายกรดมีความสามารถในการกัดกร่อน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยเซลลูโลสและทำลายพื้นที่ผิว (สุภาวดี, 2557) โดยน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% ภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (2.5% H_2SO_4 AU) เท่ากับ 12.57±0.16 กรัมคิดเป็น 62.83±0.79% ในส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ พบว่าการปรับสภาพไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกกล้วยน้ำว้า โดยสังเกตจากปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่อยู่ในของเหลว (liquid) พบว่า มีน้ำตาลรีดิวซ์ในส่วนของเหลวมีปริมาณน้อยกว่าในส่วนของแข็ง (solid) โดยในส่วนของแข็งมีน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด เท่ากับ 296.13±22.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ในส่วนของเหลวมีน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 0.86±0.03 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลรีดิวซ์ยังคงอยู่ในส่วนของแข็ง และการปรับสภาพไม่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในตัวอย่างเปลือกกล้วย เนื่องจากสภาวะที่ใช้ส่งผลต่อโครงสร้างของพื้นผิวมากกว่า นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่ใช้ยังไม่รุนแรงเกินไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุขจี และคณะ (2563) ที่พบว่าการปรับสภาพด้วยกรดและหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 0.08 และ 0.11 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดังนั้นส่วนของแข็ง (solid) จึงเหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาในขั้นตอนถัดไป

จาก Figure 1 เป็นการศึกษาผลของการปรับสภาพต่อลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของเปลือกกล้วยน้ำว้า จะเห็นได้ว่า พื้นที่ผิวของตัวอย่างเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) (Figure 1 (A)) จะมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบและมีความหนาแน่นพื้นที่ผิวไม่มีรอยแตก ซึ่งแตกต่างจาก Figure 1 (B-G) เป็นตัวอย่างที่ปรับสภาพโดยวิธีการที่แตกต่างกัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิว โดยพื้นผิวมีรอยแตกและปรากฏลักษณะรูพรุนบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ปรับสภาพด้วยกรดที่ความเข้มข้นที่ต่างกันที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (RT) และในหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (AU) (Figure 1 (D-G)) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนพื้นที่ผิวที่ชัดเจนที่สุด คือพื้นที่ผิวบางลงและเกิดเป็นรอยแตกมากขึ้นส่งผลให้เกิดลักษณะที่เป็นรูพรุนมีความขรุขระไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oyekanmi *et al.* (2019) พบว่าการปรับสภาพด้วยกรดมีผลต่อพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากส่งผลให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมี เช่น เฮมิเซลลูโลสหรือลิกนิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมี (Figure 2) โดยพบว่าการปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างทางเคมี โดยการศึกษาทำการสังเกตลักษณะของพีคที่ปรากฏจำแนกได้ 3 ช่วงหลักๆตามหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน พีคของเซลลูโลสอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 2,930 cm^{-1} แสดงการสั่นของ Hydroxyl group พีคของเฮมิเซลลูโลส อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1,608 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ C=O ในเฮมิเซลลูโลส และพีคของลิกนิน อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1,032 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ C-O-C ใน Aryl-alkyl ether ของลิกนิน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดพีคของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ส่วนพีคของเฮมิเซลลูโลสลดลงเล็กน้อยและพีคของลิกนินลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลใน Table 1 เนื่องจากการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดทำให้ผนังเซลที่ถูกหุ้มหายไปซึ่งมีลิกนินเป็นองค์ประกอบทำให้เห็นได้ว่าการปรับสภาพสามารถลดปริมาณลิกนินลงได้ (สุภาวดี, 2557; Oyekanmi *et al.*, 2019)

ดังนั้นจากผลการศึกษาผลของการปรับสภาพที่มีต่อเปลือกกล้วยน้ำว้า ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพตัวอย่าง 3 วิธีการ คือ สภาวะไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) สภาวะที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Water AU) และสภาวะปรับสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% ภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (2.5 % H_2SO_4 AU) ตามลำดับ เพื่อใช้ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสต่อไป

Table 1 Chemical composition of banana peels. Changes in remaining weight and reducing sugar content of non-pretreated and pretreated of banana peels.

Treatments	Chemical composition (%)			Remaining weight		Reducing sugar content (mg/g)	
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	g	%	Solid	Liquid
Non-pretreated	15.50±3.62^{d}	72.67±6.08^{a}	6.40±3.21^{ab}	20.00±0.00^{a}	100.00±0.00^{a}	117.38±4.21^{cd}	0.04±0.00^{e}
Water RT	24.37±6.92^{cd}	43.22±10.00^{c}	11.17±5.59^{a}	16.67±1.99^{b}	83.35±9.96^{b}	131.48±35.48^{c}	0.60±0.04^{b}
Water AU	33.80±1.61^{bc}	55.33±0.88^{b}	9.90±6.05^{ab}	16.46±0.38^{b}	82.29±1.92^{b}	296.13±22.25^{a}	0.86±0.03^{a}
2.5% H_2SO_4 RT	20.33±4.20^{d}	21.44±7.75^{e}	9.83±1.71^{ab}	14.90±0.06^{c}	74.50±0.29^{c}	184.78±26.27^{b}	0.09±0.00^{d}
2.5% H_2SO_4 AU	52.13±8.95^{a}	30.67±2.67^{de}	7.63±2.41^{ab}	12.57±0.16^{e}	62.83±0.79^{e}	84.60±11.82^{d}	0.44±0.03^{c}
5% H_2SO_4 RT	37.83±8.77^{b}	32.89±3.56^{bc}	2.93±1.66^{b}	15.60±0.28^{bc}	78.00±1.40^{bc}	101.08±8.89^{cd}	0.11±0.01^{d}
5% H_2SO_4 AU	49.87±1.80^{a}	32.00±5.46^{de}	9.83±5.35^{ab}	13.35±0.54^{e}	66.75±2.70^{e}	16.10±4.69^{e}	0.13±0.02^{d}

Note: a, b, c,… in each column are statistical values at the 95% confidence levels ($p<0.05$), The value of mg/g refers to milligram per gram of initial sample weight.

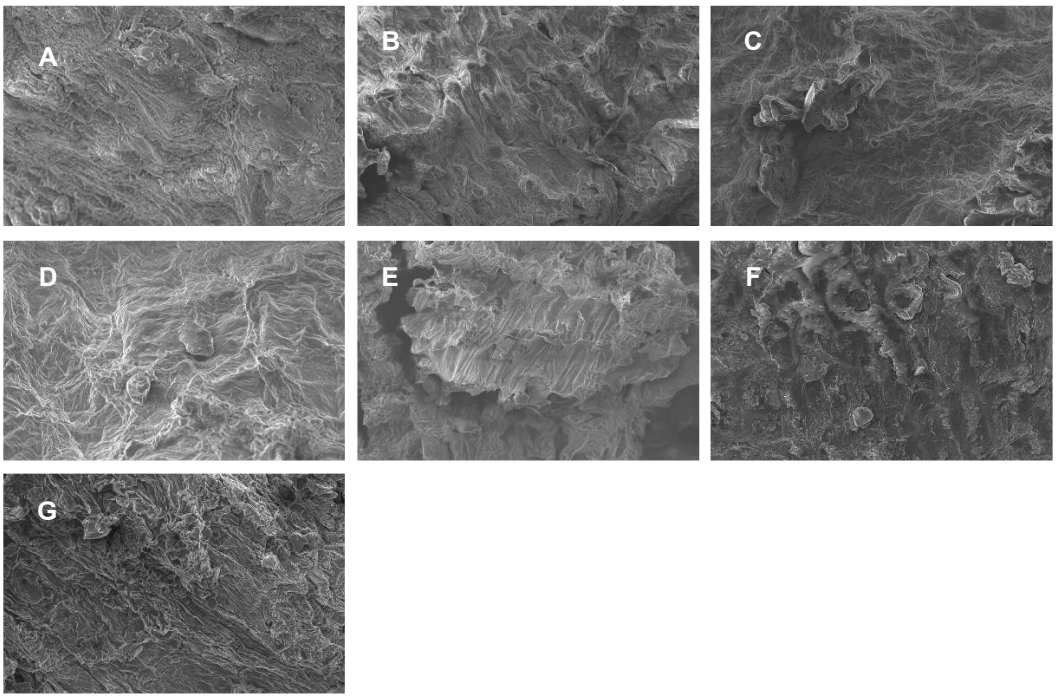

Figure 1 Characteristics of the surface area structure of banana peels (A) Non-pretreated, (B) Water RT, (C) Water AU, (D) 2.5% H_2SO_4 RT, (E) 2.5% H_2SO_4 AU, (F) 5% H_2SO_4 RT, (G) 5% H_2SO_4 AU at 500x magnification

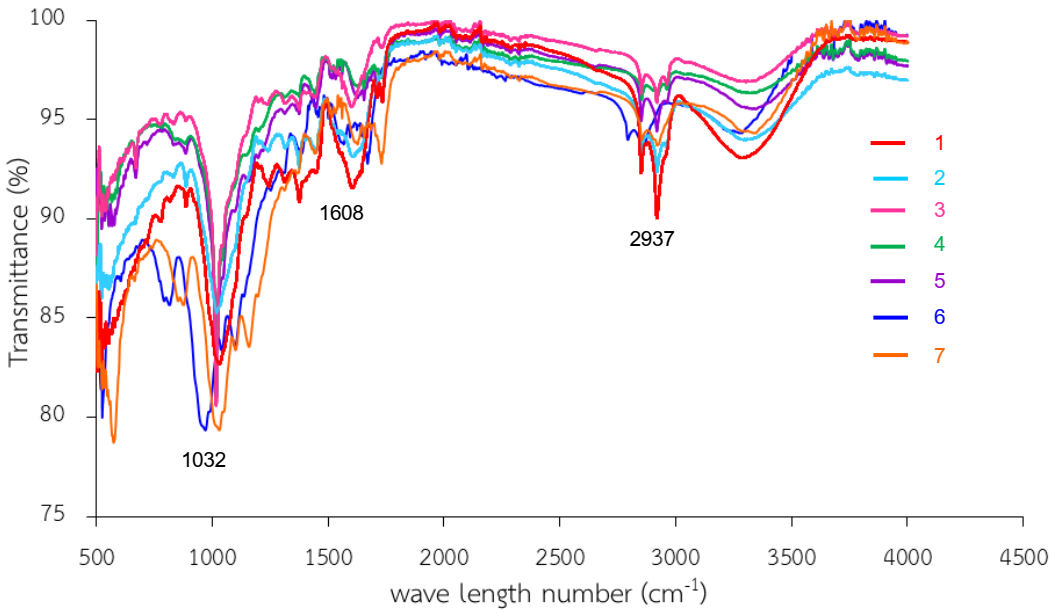

Figure 2 FT-IR Spectrum of banana peel (1) Non-pretreated, (2) Water RT, (3) Water AU, (4) 2.5% H_2SO_4 RT, (5) 2.5% H_2SO_4 AU, (6) 5% H_2SO_4 RT, (7) 5% H_2SO_4 AU

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วยน้ำว้า

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วยน้ำว้า โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นที่ต่างกัน จาก Figure 3 พบว่าการไฮโดรไลซิสด้วยกรดมีผลต่อการปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ความเข้มข้นของกรดก็มีผลด้วยเช่นกัน โดยการไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด เท่ากับ 92.49±3.45 มิลลิกรัมต่อกรัม (1.16±0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร) รองลงมาคือ การไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 5% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 35.45±1.33 มิลลิกรัมต่อกรัม (0.44±0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร) และน้อยที่สุดคือการไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 5 ของตัวอย่างที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% ภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (2.5% H_2SO_4 AU) ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 1.58±0.10 มิลลิกรัมต่อกรัม (0.39±0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการย่อยด้วยกรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ในขั้นตอนการหมักแต่ถ้าหากใช้กรดความเข้มข้นที่สูงไปก็จะส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arumugam and Manikandan (2011), Gupta *et al.* (2023) และ Guo *et al.* (2018) ที่พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไบโอเอทานอลได้ ซึ่งได้น้ำตาลรีดิวซ์ 20% และได้ผลผลิตเอทานอล 13.84% แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดสูงไปจึงทำให้ย่อยน้ำตาลรีดิวซ์ออกไปจนเหลือน้อย นอกจากนี้ยังอาจจะทำให้เกิดการย่อยแบบต่อเนื่อง (Over hydrolysis) เกิดเป็นสารพิษตกค้างในตัวอย่าง เช่น hydroxyl methyl furfural (HMF) หรือ furfural เป็นต้น ซึ่งอาจจะส่งผลต่อขั้นตอนการหมักด้วยเชื้อจุลลินทรีย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ เบญจวรรณและกฤษณเวช, (2557) ที่พบว่าการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ความเข้มข้นสูง (มากกว่า 10%) ที่อุณหภูมิสูง จะส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดมากขึ้นในขณะที่ปริมาณเฟอร์ฟูรัล เริ่มต้นมีปริมาณต่ำและจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นของกรดมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากผลลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิวของตัวอย่างเปลือกกล้วยที่การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% ภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (2.5% H_2SO_4 AU) พบว่าตัวอย่างเปลือกกล้วยน้ำว้าที่การปรับสภาพ จะเกิดการย่อยสลายได้ง่ายกว่า ถ้าหากมีการใช้กรดหรือตัวทำละลายที่ความเข้มข้นสูงอาจจะมีผลทำให้ย่อยแบบต่อเนื่องทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง อาจจะต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยเปลือกกล้วยน้ำว้าที่การปรับสภาพด้วยกรด รวมทั้งการวิเคราะห์ชนิดของน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยต่อไป

ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วย คือ การไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated)

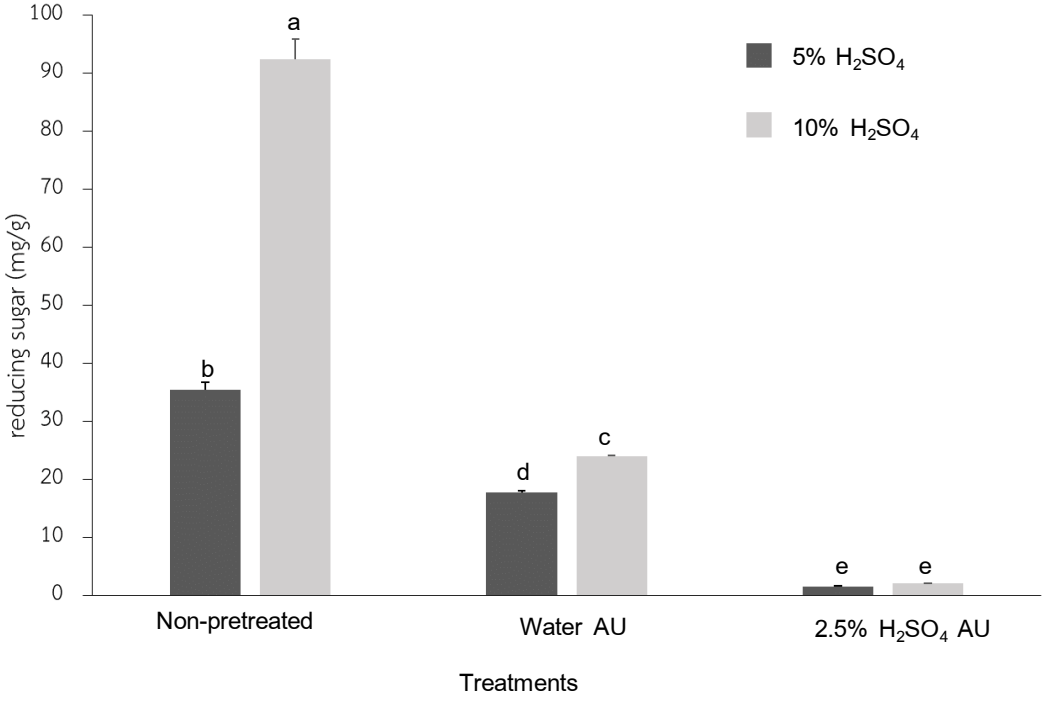

Figure 3 Content of reducing sugar after acid hydrolysis by different concentration at 50 °C, 120 rpm for 24 hours.

Note: a, b, c,…are statistical values at the 95% confidence levels ($p<0.05$), The value of mg/g refers to milligram per gram of initial sample weight.

3. การศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกกล้วยน้ำว้า

จากการศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกกล้วยน้ำว้า โดยใช้ตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) ที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10% (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยเชื้อจุลินทรีย์จากยีสต์ผง (baker's yeast) ที่สภาวะ 35 °C ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จาก Figure 4 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 1-3 ชั่วโมงแรก และค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องหลังชั่วโมงที่ 6 ส่วนปริมาณผลผลิตเอทานอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าในชั่วโมงที่ 18 ได้ปริมาณเอทานอลสูงสุด และเริ่มคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 24 จาก Table 2 แสดงให้เห็นว่า ชั่วโมงที่ 18 ได้ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 7.26±0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยคิดเป็นผลผลิตเอทานอล ($Y_{P/S}$) มากสุดอยู่ที่ชั่วโมงที่ 18 ได้ผลผลิตเอทานอลเท่ากับ 0.09±0.00 มิลลิกรัม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) อัตราการผลิต (Q_P) มากที่สุดอยู่ที่ชั่วโมงที่ 18 ได้อัตราการผลิตเท่ากับ 0.40±0.00 มิลลิกรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ส่วนประสิทธิภาพในการหมัก (E_Y) มากที่สุดอยู่ที่ชั่วโมงที่ 18 ได้เท่ากับ 17.05±0.09% แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบตามทฤษฎีแล้วประสิทธิภาพในการหมัก (E_Y) มีประสิทธิภาพต่ำกว่า ทั้งนี้อาจจะเพราะว่าใช้เชื้อยีสต์ผง (baker's yeast) จะให้ประสิทธิภาพผลผลิตเอทานอลต่ำเนื่องจากเซลล์ยีสต์ผ่านขั้นตอนการทำแห้งเพื่อลดปริมาณน้ำและเพื่อยืดอายุในการเก็บรักษา จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาวะของเซลล์ หรืออาจจำเป็นต้องเลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสารอาหารที่เหมาะสมเพื่อให้มีความสามารถ

ใกล้เคียงกับการใช้เซลล์ยีสต์สด ในวิธีการผลิตเอทานอลอาจจะต้องเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ ซึ่งการผลิตเอทานอลตามทฤษฎีคือ น้ำตาลกลูโคส 1 กรัม สามารถผลิตเอทานอลได้ 0.51 กรัม หรือประสิทธิภาพการหมัก (E_Y) มีค่า 90-95% (Sobocan and Glavic, 2000) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพที่ถูกเลือกในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตน้ำตาลตาลรีดิวซ์ พบว่ามีเฮมิเซลลูโลสค่อนข้างสูงซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลกลุ่ม pentose (C5) จึงอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับเชื้อยีสต์ผง (baker's yeast) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ชอบน้ำตาลกลุ่ม hexose (C6) มากกว่า อีกทั้งในการผลิตเอทานอลในขั้นตอนการหมักการเขย่าอาจจะเป็นการเพิ่มปริมาณอากาศเข้าไปในระบบ ซึ่งอาจจะส่งผลให้สภาวะในการผลิตเอทานอลของเซลล์ยีสต์ไม่เหมาะสมด้วยเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khan *et al.* (2015) พบว่าเปลือกกล้วยและเปลือกหัวไชเท้าที่หมักโดยใช้ *Saccharomyces cerevisiae* ได้เอทานอล 1.37% และ 1.23% ตามลำดับ ขณะที่งานวิจัยของ Hamzah *et al.* (2019) พบว่าการหมักเปลือกกล้วยที่สภาวะเป็นกรด (pH 6) ได้เอทานอลสูงกว่าสภาวะที่เป็นด่าง (pH 12) ได้เอทานอล 20.94% และ งานวิจัยของ Palacios *et al.* (2017) พบว่าการใช้เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนและการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์หมักร่วมกับ *Kluyveromyces marxianus* ที่ 24 ชั่วโมง ได้ผลเอทานอล 129% ของการผลิตเอทานอลตามทฤษฎี จากการศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกกล้วยน้ำว้า พบว่าการผลิตเอทานอลที่ชั่วโมงที่ 18 มีศักยภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

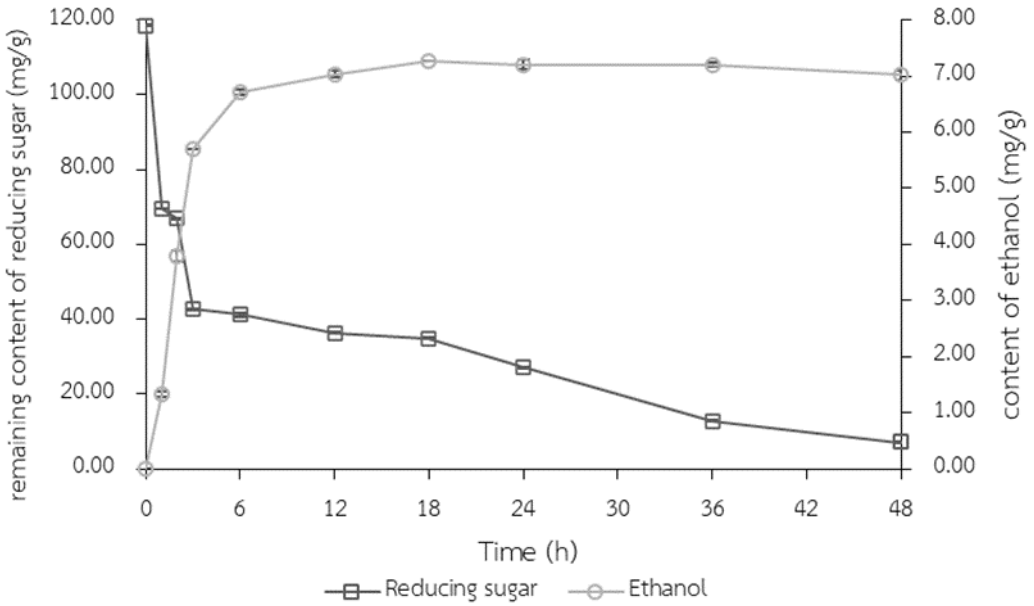

Figure 4 The remaining content of reducing sugar and content of ethanol of baker's yeast fermentation at 35 °C, 150 rpm for 48 hours, using non-pretreated banana peel hydrolyzed with 10% H_2SO_4 as the substrate.

Table 2 Remaining reducing sugar, used reducing sugar, ethanol content and performance parameters of baker's yeast fermentation at 35 °C, 150 rpm for 48 hours, using non-pretreated banana peel hydrolyzed with 10% H_2SO_4 as the substrate.

Time (h)	Remaining reducing sugar (mg/g)	Used reducing sugar (mg/g), (S)	Ethanol Content (mg/g), (P)	Ethanol yield (mg), ($Y_{p/s}$)	Production rate (mg/g/h), (Q_p)	Fermentation efficiency (%), (E_y)
0	118.48±0.17^{a}	0.00±0.00^{j}	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{g}	0.00±0.00^{h}
1	69.94±0.00^{b}	48.84±0.17^{i}	1.34±0.47^{f}	0.03±0.00^{f}	0.08±0.01^{f}	5.38±0.20^{g}
2	66.85±0.31^{c}	51.62±0.40^{h}	3.80±0.98^{e}	0.07±0.01^{cd}	0.21±0.01^{e}	14.42±0.26^{d}
3	42.62±0.16^{d}	75.86±0.30^{g}	5.71±0.00^{d}	0.08±0.01^{bc}	0.32±0.00^{d}	14.75±0.06^{c}
6	41.14±0.53^{e}	77.34±0.58^{f}	6.72±0.46^{c}	0.09±0.00^{a}	0.37±0.00^{c}	17.03±0.23^{a}
12	36.42±0.28^{f}	82.06±0.35^{e}	7.04±0.64^{b}	0.09±0.01^{a}	0.39±0.00^{ab}	16.81±0.19^{a}
18	34.95±0.30^{g}	83.53±0.43^{d}	7.26±0.00^{a}	0.09±0.00^{a}	0.40±0.00^{a}	17.05±0.09^{a}
24	27.10±0.16^{h}	91.38±0.18^{c}	7.21±0.09^{a}	0.08±0.00^{b}	0.39±0.01^{ab}	15.47±0.19^{b}
36	12.80±0.15^{i}	105.67±0.27^{b}	7.21±0.05^{a}	0.07±0.00^{d}	0.40±0.00^{a}	13.37±0.06^{e}
48	7.05±0.15^{j}	111.42±0.27^{a}	7.02±0.09^{b}	0.06±0.00^{e}	0.39±0.00^{ab}	12.35±0.13^{f}

Note: a, b, c,… in each column are statistical values at the 95% confidence levels ($p<0.05$), The value of mg/g refers to milligram per gram of initial sample weight.

สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกกล้วย พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2.5% ภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (2.5% H_2SO_4 AU) มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี ทำให้เซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้นกว่าไม่ปรับสภาพ คือ 52.13±8.95% แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และมีผลทำให้เฮมิเซลลูโลสลดลงมากกว่าไม่ปรับสภาพ คือ 30.67±2.67% แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างพื้นผิวการและเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมี แต่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) และปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Water AU) เท่ากับ 84.60±11.82, 117.38±4.21 และ 296.13±22.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพตัวอย่าง 3 วิธีการ คือ สภาวะไม่ปรับสภาพ (Non-pretreated) สภาวะที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Water AU) และสภาวะปรับสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% ภายใต้สภาวะการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (2.5% H_2SO_4 AU) ตามลำดับ เพื่อใช้ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วย พบว่าการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 10 ในตัวอย่างไม่ปรับสภาพ ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ คือ 92.49±3.45 มิลลิกรัมต่อกรัม แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากการศึกษาการผลิตเอทานอลพบว่าชั่วโมงที่ 18 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยให้ ปริมาณเอทานอล (P), ผลผลิตเอทานอล ($Y_{P/S}$) และประสิทธิภาพการหมัก (E_Y) เท่ากับ 7.26±0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม, 0.09±0.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม และ 17.05±0.09% ซึ่งจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เปลือกกล้วยน้ำว้ามีศักยภาพในการผลิตเอทานอล แต่ประสิทธิภาพผลผลิตอาจจะยังไม่สูงมาก ทั้งนี้หากมีการศึกษาเพิ่มเติมและปรับปรุงขั้นตอนให้เหมาะสมอาจจะช่วยเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้นได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ และฝ่ายกิจการนิสิต คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความสนับสนุนทุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

โชติพงศ์ จูจันทร์, อติชาติ อ่ำมาก, และ โชค สุขโชติ. (2552). *การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกกล้วย*. [ปริญญานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร]. NU Intellectual Repository. http://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/handle/123456789/2759

เบญจวรรณ ถวิลรักษ์, และ กฤษณเวช ทรงธนศักดิ์. (2557). การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากชานอ้อยโดยมีปริมาณเฟอร์ฟูรัลต่ำ จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 (สาขาวิทยาศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม)* (น. 427-433). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยะนุช เปียคง. (2557). *การศึกษาการผลิตไซโลสจากทะลายปาล์มเปล่า*. [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]. สำนักทรัพยากรการเรียนรู้คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร. https://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2010/9865

สุขจี จิตชื่น, ภาณุพงษ์ จันทวงศ์, ธนวรรณ สุขเกษม, และ กานต์ แย้มพงษ์. (2563). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอเอทานอลจากเปลือกกล้วยน้ำว้า. *Journal of Science and Technology Phetchabun Rajabhat University, 1*(1), 43-49.

เหรียญทอง สิงห์จานุสงค์, และ จิราภรณ์ สอดจิตร์. (2554). การผลิตเซลลูโลสจากเปลือกกล้วย. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, *42*(3), 741-744.

สุภาวดี ผลประเสริฐ. (2557). การปรับสภาพวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 22*(5), 15-25.

โอภาส ชูนุตร, และ กนกพร สังขรักษ์. (2559). การผลิตเอทานอลและการนำของเสียจากอุตสาหกรรมเอทานอล ไปใช้ประโยชน์. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 19*(2), 1-8.

Albarelli, J. Q., Rabelo, R. B., Santos, D. T., Beppu, M. M., & Meireles, M. A. A. (2011). Effects of supercritical carbon dioxide on waste banana peels for heavy metal removal. *The Journal of Supercritical Fluids, 58*(3), 343-351. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.07.014

Bennett, C. (1971). Spectrophotometric acid dichromate method for the determination of ethyl alcohol. *American journal of medical technology, 37*(6), 217-220.

Gupta, G., Baranwal, M., Saxena, S., & Reddy, M. S. (2023). Utilization of banana waste as a resource material for biofuels and other value-added products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(14), 12717-12736. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02306-6

Guo, J., Li, Z., Su, L., Tsang, Y. F., An, A. K., & Yu, C. F. (2018). Optimization of acid pretreatment and enzymatic hydrolysis on the production of ethanol fuel from waste banana peels. *Energy & environment*, *29*(8), 1354-1364. https://doi.org/10.1177/0958305X18777232

Hamzah, M. A., Alias, A. B., & Ahmad, N. E. (2019). Production of biofuel (bio-ethanol) from fruitwaste: Banana peels. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 5897-5901. https://doi.org/10.35940/ijeat.A3024.109119

Itelima, J., Onwuliri, F., Onwuliri, E., Onyimba, I., & Oforji, S. (2013). Bio-ethanol production from banana, plantain and pineapple peels by simultaneous saccharification and fermentation process. International Journal of *Environmental Science and Development, 4*(2), 213-216. https://doi.org/10.7763/IJESD.2013.V4.337

John, I., Yaragarla, P., & Appusamy, A. (2020). Production of Bioethanol from Banana Peel Using Isolated Cellulase. In J. P. Davim (Ed.), *Global Challenges in Energy and Environment* (pp. 9-18). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9213-9_2

Jahid, M., Gupta, A., & Sharma, D. K. (2018). Production of bioethanol from fruit wastes (banana, papaya, pineapple and mango peels) under milder conditions. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, *8*(3), 1-11. https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000327

Khan, A. M., Khaliq, S., & Sadiq, R. (2015). Investigation of waste banana peels and radish leaves for their biofuels potential. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, *29*(2), 239-245. https://doi.org/10.4314/bcse.v29i2.7

Mishra, R. R., Samantaray, B., Behera, B. C., Pradhan, B. R., & Mohapatra, S. (2020). Process optimization for conversion of waste banana peels to biobutanol by a yeast co-culture fermentation system. *Renewable Energy*, *162*, 478-488. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.045

Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical chemistry*, *31*(3), 426-428. https://doi.org/10.1021/ac60147a030

Oyekanmi, A. A., Ahmad, A., Hossain, K., & Rafatullah, M. (2019). Adsorption of Rhodamine B dye from aqueous solution onto acid treated banana peel: Response surface methodology, kinetics and isotherm studies. *PLOS ONE*, *14*(5), e0216878. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216878

Odedina, M. J., Charnnok, B., Saritpongteeraka, K., & Chaiprapat, S. (2017). Effects of size and thermophilic pre-hydrolysis of banana peel during anaerobic digestion, and biomethanation potential of key tropical fruit wastes. *Waste Management*, *68*, 128-138. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.003

Palacios, S., Ruiz, H. A., Ramos-Gonzalez, R., Martínez, J., Segura, E., Aguilar, M., Aguilera, A., Michelena, G., Aguilar, C., & Ilyina, A. (2017). Comparison of physicochemical pretreatments of banana peels for bioethanol production. *Food science and biotechnology*, *26*(4), 993-1001. https://doi.org/10.1007/s10068-017-0128-9

Sobocan, G., & Glavic, P. (2000). Optimization of ethanol fermentation process design. *Applied thermal engineering*, *20*(6), 529-543. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00042-3