



# การปรับสภาพเบื้องต้นแบบต่อเนื่องของฟางข้าว และกากมันสำปะหลังด้วยน้ำภาวะใต้วิกฤต

## Continuous Pretreatment of Rice Straw and Cassava Waste by Subcritical Water

ปุณณวิทย์ หาญไพบูลย์<sup>1\*</sup>, สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์<sup>1,2</sup> และ เรืองวิทย์ สว่างแก้ว<sup>3</sup>  
Poonnawit Hanphaiboon<sup>1\*</sup>, Somkiat Ngamprasertsith<sup>1,2</sup> and Ruengwit Sawangkeaw<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

<sup>2</sup>ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

<sup>3</sup>สถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

<sup>1</sup>Department of Chemical Technology, Faculty of Science,  
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>2</sup>Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology,  
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>3</sup>The Institute of Biotechnology and Genetic Engineering,  
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

\*Corresponding author: amoakeve@gmail.com

Telephone Number: 090 556 8171

### บทคัดย่อ

ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสเป็นแหล่งของวัตถุดิบที่น่าสนใจสำหรับการผลิตเอทานอล เนื่องจากหาง่ายและเกิดทดแทนใหม่ได้ แต่ปัจจัยทางด้านองค์ประกอบและลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและเคมีเป็นตัวขัดขวางการเปลี่ยนเป็นน้ำตาลของเซลลูโลสในชีวมวล ดังนั้นชีวมวลจึงต้องผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์ งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของชีวมวลด้วยน้ำภาวะใต้วิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ชีวมวลหลักที่ใช้ในงานวิจัยคือฟางข้าว เพื่อให้สารป้อนสามารถไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ได้อย่างต่อเนื่องจึงต้องเติมกากมันสำปะหลังลงไปในการป้อนด้วย ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิการปรับสภาพเบื้องต้น (120 และ 140 องศาเซลเซียส) และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ของปั๊ม (5 และ 10 เฮิร์ต) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหลของสารป้อน ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพทั้งหมดจะนำไปเปลี่ยนเป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ผลการปรับสภาพเบื้องต้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องพิจารณาจากปัจจัยที่ศึกษาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้น สัดส่วนของเซลลูโลสในชีวมวลภายหลังการปรับสภาพเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและแป้งระหว่างการปรับสภาพเบื้องต้น ตัวบ่งชี้ปริมาณเล็กน้อยที่พบในของเหลวภายหลังการปรับสภาพไม่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์และการหมักเอทานอล ร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อนำชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงมาเปลี่ยนเป็นน้ำตาล การย่อยชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ของปั๊ม 10 เฮิร์ต ค่าร้อยละผลได้ของกลูโคส

ทั้งหมดสูงกว่าการย่อยฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและการย่อยชีวมวลผสมระหว่างฟางข้าวและกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพประมาณ 2.5 และ 1.5 เท่า ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส เอทานอล การปรับสภาพเบื้องต้น น้ำภาวะไดวิกฤต เซลลูโลส

## ABSTRACT

Lignocellulosic biomasses are interesting feedstocks for ethanol production due to their abundance and renewability. But their physico-chemical structural and compositional factors hinder the saccharification of cellulose in the lignocellulosic biomasses. Thus, the biomasses must be pretreated to enhance the enzymatic saccharification of cellulose. This research studied the pretreatment of lignocellulosic biomasses by subcritical water in a continuous plug-flow reactor. Feed in this work was rice straw mixed with cassava waste to make the slurry be continuously fed into the continuous reactor. In continuous pretreatment step, the effects of pretreatment temperatures (120 and 140 °C) and motor utility frequencies (5 and 10 Hz), relating to feed rate, were experimentally investigated. After the pretreatment, the entire pretreated sample was subjected to enzymatic saccharification by cellulase. Within the parameters considered, the results from continuous pretreatment revealed that the temperature was the most important factor on pretreatment efficiency. Cellulose content in the solid fraction increased because of the solubilization of hemicellulose and starch during pretreatment process. The small amounts of inhibitors found in liquid fraction have no effect on enzymatic saccharification and ethanol fermentation. The overall glucose yield was increased when saccharified biomass pretreated at high temperature. When pretreatment temperature was 140 °C and motor utility frequency was 10 Hz, the overall glucose yield was increased approximately 2.5-fold and 1.5-fold over untreated rice straw and untreated slurry, respectively.

**Keywords:** lignocellulosic biomasses, ethanol, pretreatment, subcritical water, cellulose

## 1. บทนำ

กิจกรรมส่วนใหญ่ทั้งในภาคอุตสาหกรรม ภาคครัวเรือน หรือแม้แต่ภาคเกษตรกรรม ล้วนต้องใช้พลังงานแทบทั้งสิ้น ดังนั้นจึงปฏิเสธไม่ได้ว่าพลังงานได้กลายมาเป็นปัจจัยที่ 5 ในโลกยุคปัจจุบัน แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบันคือ แหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งได้มาจากปิโตรเลียมที่กำลังมีปริมาณลดลงและอาจหมดไปในอนาคต ประกอบกับการบริโภคพลังงานในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกมีปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้เกี่ยวข้องทางด้านพลังงานทั่วโลกจึงมีความพยายามในการค้นคว้าและวิจัยเพื่อหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ที่มีปริมาณเพียงพอและสามารถใช้ทดแทนแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ขณะเดียวกันก็ต้องเป็นพลังงานที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วย [1]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีวัตถุดิบทางการเกษตรและวัตถุดิบที่เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร

ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวหรือแปรรูปเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวภาพหรือพลังงานชีวภาพ (Bio-fuel or bio-energy) ซึ่งเป็นพลังงานจากชีวมวล จึงนับเป็นหนึ่งในเป้าหมายหลักของยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด เพื่อเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศไทยในระยะยาว [2]

เอทานอล (Ethanol) เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากการแปรรูปชีวมวลรูปแบบหนึ่งซึ่งสามารถนำไปใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลได้โดยตรง ในปัจจุบันเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกชนิดหนึ่งที่มีความสนใจและได้ถูกนำมาใช้ทดแทนน้ำมันแก๊ซโซลีนหรือน้ำมันเบนซินอย่างแพร่หลาย การผลิตเอทานอลชีวภาพในปัจจุบันใช้การหมักน้ำตาลกลูโคสด้วยยีสต์ในภาวะที่เหมาะสม วัตถุดิบที่ใช้เป็นชีวมวลตั้งต้นในการผลิตเอทานอลในเชิงอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบที่ให้น้ำตาลหรือแป้งสูง เช่น ข้าวโพด อ้อยและมันสำปะหลัง เป็นต้น หรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแป้งและน้ำตาล เช่น กากน้ำตาล [3] อย่างไรก็ตามวัตถุดิบดังกล่าวเป็นแหล่งอาหารของ

มนุษย์ จึงไม่เป็นการพัฒนาพลังงานอย่างยั่งยืนในระยะยาว เนื่องจากถ้ามีการนำพืชอาหารเหล่านี้ไปผลิตเป็นพลังงานมากขึ้นอาจเกิดความขาดแคลนทำให้เกิดการแข่งขันด้านราคาของวัตถุดิบ ส่งผลต่อเสถียรภาพของราคาพลังงาน ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการนำวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย และซังข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกษตรกรส่วนมากมักกำจัดทิ้งโดยการเผาทำลาย มาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเอทานอล [4] วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 องค์ประกอบได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอล วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสต้องผ่านการย่อย (Saccharification) ด้วยเอนไซม์หรือกรด เพื่อแปรรูปเซลลูโลสให้เป็นกลูโคส แต่ องค์ประกอบและโครงสร้างทั้งทางกายภาพและเคมีของ วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสเป็นตัวขัดขวางการย่อย เซลลูโลส ทำให้ปริมาณกลูโคสที่ได้ไม่เหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นก่อนกระบวนการย่อย วัตถุดิบต้องผ่านกระบวนการที่สำคัญอีก กระบวนการหนึ่งคือ การปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) [5, 6] วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพเบื้องต้นคือ ทำให้เซลลูโลสสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ดีขึ้นและเพิ่มอัตราเร็วของการย่อย โดยการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทั้งทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวที่เอนไซม์เข้าถึงได้ การกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส และการลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส เป็นต้น [7, 8] งานวิจัยจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยน้ำภาวะได้วิกฤตเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของการแปรรูป วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสไปเป็นเอทานอลเป็นอย่างมาก งานวิจัยของ Wan และคณะ [9] ศึกษาผลการเปรียบเทียบสัณฐานภาพของการปรับสภาพเบื้องต้นของฟาง จากต้น ถั่วเหลือง (Soybean straw) ระหว่าง 2

กระบวนการ ได้แก่ การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยน้ำภาวะ ได้วิกฤตกับกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งได้ข้อสรุปว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยน้ำภาวะได้วิกฤตมีประสิทธิภาพสูงกว่า กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพของกระบวนการซึ่งทราบ ได้จากผลได้ของกลูโคสและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกหลายงานวิจัยที่ศึกษา กระบวนการให้มีความเหมาะสมกับการผลิตในระดับ อุตสาหกรรมยิ่งขึ้น เช่น การเพิ่มขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ และการพัฒนาเป็นกระบวนการแบบกึ่งต่อเนื่องและ แบบต่อเนื่อง [10]

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้น แบบต่อเนื่องของฟางข้าวผสมกากมันสำปะหลังด้วยน้ำ ภาวะได้วิกฤตซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมีในกระบวนการ เพื่อศึกษาวิธีดำเนินการและหาภาวะที่เหมาะสม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิการปรับสภาพ เบื้องต้น และอัตราการป้อนซึ่งกำหนดโดยความถี่ของ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนสู่มอเตอร์ของปั๊ม

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 การเตรียมชีวมวลตั้งต้น

ฟางข้าวที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากจังหวัดปทุมธานี นำมาบดโดยเครื่องบดอย่างหยาบเพื่อให้ได้ฟางข้าวที่มี ขนาดประมาณ 1–3 เซนติเมตร ส่วนกากมันสำปะหลัง ได้มาจากบริษัท เอี่ยม บัวพา จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานผลิตแป้ง มันสำปะหลังในจังหวัดสระแก้ว ใช้วิธีวิเคราะห์ปริมาณ ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และองค์ประกอบอื่น ๆ ตามมาตรฐาน TAPPI สำหรับฟางข้าว และวิธีที่ประยุกต์ มาจากวิธีของ Van Soest [11] สำหรับกากมันสำปะหลัง เนื่องจากในกากมันสำปะหลังมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก อาจทำให้ผลจากการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน TAPPI มีความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้มีการวิเคราะห์ความชื้นและ ปริมาณเถ้าในตัวอย่างชีวมวลด้วยวิธีน้ำหนักสูญเสียน้ำ

## 2.2 การหาวิธีเตรียมฟางข้าวที่เหมาะสม

ทดสอบการไหลของโคลนฟางข้าวจากวิธีในการเตรียมสารป้อนที่แตกต่างกัน 4 วิธี ดังนี้

- คัดฟางข้าวในน้ำที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- คัดฟางข้าวในน้ำที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นให้ความร้อนต่อไปอีก 30 นาที พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง
- คัดฟางข้าวในน้ำที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วเติมแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นให้ความร้อนต่อไปอีก 30 นาที พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง
- คัดฟางข้าวในน้ำที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วเติมกากมันสำปะหลัง จากนั้นให้ความร้อนต่อไปอีก 30 นาที พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง

วิธีการเตรียมที่เหมาะสมพิจารณาจากเงื่อนไข 4 ประการดังนี้คือ ความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันของสารป้อน ความสามารถในการไหลอย่างต่อเนื่องของสารป้อนในเครื่องปฏิกรณ์ ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ และค่าใช้จ่ายของกระบวนการ

## 2.3 การปรับสภาพเบื้องต้น

การปรับสภาพเบื้องต้นของฟางข้าวดำเนินการทดลองโดยใช้กระบวนการแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tube shape hydrothermal reactor) ซึ่งท่อ 1 ชุด ยาว 1 เมตร ทำจาก เหล็กสแตนเลส 304 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 38.1 มิลลิเมตร สามารถทนแรงดันสูงสุดได้ 40 บาร์ที่อุณหภูมิห้อง จำนวนของท่อทั้งหมดเป็น 16 ท่อ แบ่งเป็นส่วนให้ความร้อน 14 ท่อ แต่ละท่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบไฟฟ้าขนาด 300 วัตต์ จำนวน 3 ชุด ส่วนอีกสองท่อสุดท้ายก่อนออกจากเครื่องคือส่วนให้ความเย็นเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double

pipe heat exchanger) โดยใช้น้ำเย็นจากเครื่องทำความเย็น (Chiller) เป็นสารหล่อเย็น ในการทดลองป้อนชีวมวลที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีที่เหมาะสมสู่เครื่องปฏิกรณ์ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนมอเตอร์ของปั๊มที่สนใจทำการศึกษา ได้แก่ 5 และ 10 เฮิร์ต ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหลของชีวมวลแห้งโดยเฉลี่ยประมาณ 1.5 และ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ อุณหภูมิการปรับสภาพอ่านจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ Pt100 จำนวนทั้งหมด 16 ตัว ติดตั้งบริเวณทางออกของทุกท่อ สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ Pt100 จะถูกบันทึกในระบบดิจิทัลและใช้ประมวลผลเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ให้ความร้อนทั้ง 16 ชุดแบบอิสระ ควบคุมความดันของระบบให้มีมากกว่าความดันอิ่มตัวของน้ำในภาวะที่ทำการศึกษาจากการปรับวาล์วควบคุมความดันชนิด High-pressure sleeve trim valve ซึ่งใช้สำหรับตะกอนโคลนที่มีความหนืดและการขัดสีสูง ภายหลังการปรับสภาพเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปกรองแยกด้วยระบบสุญญากาศ

## 2.4 การเปลี่ยนเซลล์โลสให้เป็นกลูโคส

ชั่งน้ำหนักของแข็งที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นจำนวน 1.2 กรัมแห้ง คิดจากร้อยละของความชื้นของของแข็งเปียก ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นละลายซีตริกบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิลิตร และเอนไซม์เซลลูเลส 1 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปใส่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ

## 2.5 การวิเคราะห์

นำของเหลวที่กรองแยกได้ภายหลังการปรับสภาพเบื้องต้นและการเปลี่ยนเซลล์โลสให้เป็นน้ำตาลมากรองผ่านตัวกรองขนาด 0.4 ไมโครเมตรด้วยเข็มฉีดยาใส่ขวดแก้วเล็ก (Vial) และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำตาลและตัวยับยั้งด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลว

สมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatograph: HPLC) ใช้คอลัมน์รุ่น Aminex HPX-87H จากบริษัท Bio-Rad ขนาด 7.8 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน NREL [11] สำหรับชนิดตัวพาที่ใช้คือกรดซัลฟิวริก 0.005 โมลต่อลิตร ตัวตรวจจับสัญญาณเป็น Refractive Index Detector และ UV Detector สำหรับการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำตาลและตัวยับยั้ง ตามลำดับ

ของแข็งที่ได้ภายหลังการปรับสภาพนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยใช้วิธีที่ประยุกต์มาจากวิธีของ Van Soest อีกส่วนหนึ่งจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไปของชีวมวลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

## 2.6 การคำนวณ

ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียขององค์ประกอบที่สนใจ

$$= \frac{\text{น้ำหนักขององค์ประกอบที่สนใจที่หายไป} \times 100}{\text{น้ำหนักขององค์ประกอบที่สนใจในชีวมวลเริ่มต้น}}$$

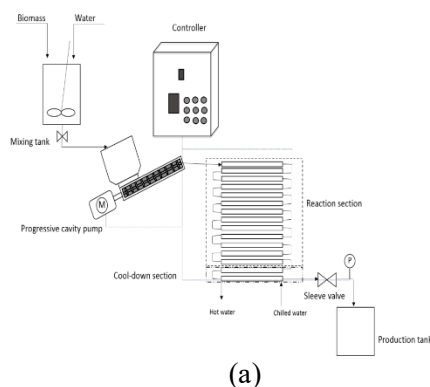
ร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมด

$$= \frac{\text{น้ำหนักของกลูโคสทั้งหมดในของเหลวหลังย่อย} \times 100}{\text{น้ำหนักของชีวมวลแห้งที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้น}}$$

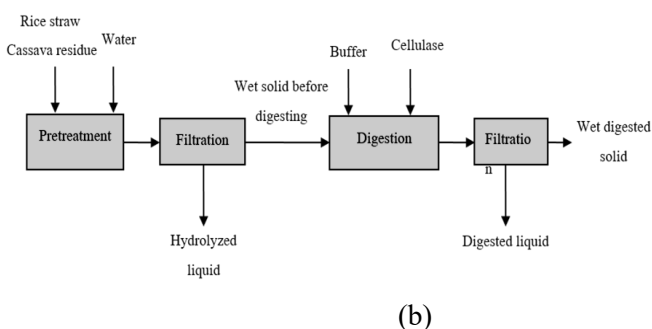
## 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้าในชีวมวลตั้งต้น

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟางข้าวที่นำมาใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของฟางข้าว คิดเป็นร้อยละ 38.19 โดยน้ำหนักแห้ง และองค์ประกอบที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในฟางข้าวคือเฮมิเซลลูโลส คิดเป็นร้อยละ 32.15 โดยน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ยังมีลิกนินและเถ้าอยู่อย่างละประมาณร้อยละ 12 ขณะที่องค์ประกอบอื่น ๆ เป็นสารแทรกชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ปริมาณเล็กน้อยภายในเซลล์ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟางข้าวที่ได้มีความสอดคล้องกับผลจากการศึกษาสมบัติของฟางข้าวเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอลชีวภาพของ Binod และคณะ [13] สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากมันสำปะหลังพบว่ามีความแตกต่างจากฟางข้าวโดยองค์ประกอบหลักในกากมันสำปะหลังเป็นพวกองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่มากถึงร้อยละ 55.32 สำหรับองค์ประกอบในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่เส้นใย (Non-structural carbohydrate) ซึ่งเป็นแป้ง และมีสารแทรกอยู่เล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 53.09 และ 2.23 ตามลำดับ ขณะที่เดียวกันในกากมันสำปะหลังก็ยังพบเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 25.51 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยของธีรพัฒน์และคณะ [14]



(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) แผนภาพกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง  
(b) ขั้นตอนโดยรวมของการผลิตสารละลายกลูโคสจากชีวมวล

นอกจากนี้ตารางที่ 1 ยังแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลผสมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 (โดยน้ำหนักแห้ง) พบว่า ค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากร้อยละเฉลี่ยของฟางและกากมันสำปะหลัง

**ตารางที่ 1** ร้อยละขององค์ประกอบของฟางข้าวและกากมันสำปะหลัง (โดยน้ำหนักแห้ง)

| องค์ประกอบ   | ตัวอย่าง |                    |                |
|--------------|----------|--------------------|----------------|
|              | ฟางข้าว  | กากมัน<br>สำปะหลัง | ชีวมวล<br>ผสม* |
| เซลลูโลส     | 38.19    | 25.51              | 30.85          |
| เฮมิเซลลูโลส | 32.15    | 12.45              | 22.96          |
| ลิกนิน       | 12.68    | 4.29               | 7.93           |
| เถ้า         | 12.02    | 2.43               | 4.24           |
| อื่น ๆ       | 4.96     | 55.32              | 34.02          |

\* สัดส่วนของฟางข้าวต่อกากมันสำปะหลังเท่ากับ 1 ต่อ 1 (โดยน้ำหนักแห้ง)

### 3.2 วิธีการเตรียมชีวมวล

ในกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นแบบต่อเนื่อง การป้อนโคลนฟางข้าวเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยตรงไม่สามารถทำได้ เพราะลักษณะทางกายภาพของฟางข้าวที่มีความแข็งทำให้เกิดการอุดตันของโคลนฟางข้าวบริเวณส่วนทำความสะอาดของบ่มและภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นในการทดลองจึงต้องหาวิธีการเตรียมสารป้อนเพื่อให้โคลนฟางข้าวสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอุดตัน จากการทดลองพบว่าโคลนฟางข้าวที่ผ่านการต้มเพียงอย่างเดียวไม่สามารถไหลผ่านส่วนทำความสะอาดเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ได้เช่นกัน เนื่องจากโคลนฟางข้าวที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง (continuity) สำหรับวิธีที่สองซึ่งเป็นการใช้สารเคมีเพื่อช่วยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของฟางข้าว พบว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ฟางมีลักษณะเป็นเจล (Gel) ในน้ำ เนื่องจากการใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นเบสจะทำให้ฟางข้าวอ่อนตัวลงและทำให้เกิดการบวมตัวของฟางข้าว เพราะ

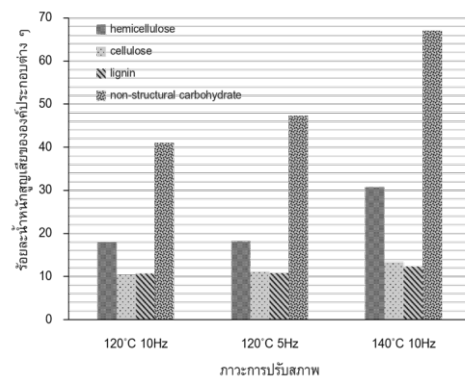
ลิกนินซึ่งถือเป็นองค์ประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ของฟางข้าวสลายตัวออกมา (Delignification) [15] แม้ว่าการเติมสารเคมีอาจทำให้โคลนฟางข้าวสามารถไหลผ่านส่วนทำความสะอาดและเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยไม่เกิดการอุดตัน แต่จะทำให้จุดแข็งของกระบวนการปรับสภาพด้วยน้ำภาวะได้วิกฤตคือเป็นกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นชีวมวลโดยไม่ใช้สารเคมีสูญเสียไป วิธีที่สามเป็นการเติมแป้งมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มความต่อเนื่องและสมบัติการหล่อลื่นของโคลนฟางข้าวในน้ำ พบว่าเมื่อป้อนโคลนฟางข้าวเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ไม่เกิดปัญหาการติดขัดของโคลนฟางข้าวในส่วนทำความสะอาดและเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเจลาติไนซ์ (Gelatinization) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง (Starch granule) เนื่องจากความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง สายพอลิเมอร์ของอะมิโลส (Amylose) และอะมิโลเพกทิน (Amylopectin) ที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมเข้ากันน้ำที่ล้อมรอบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏโดยทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว และความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [16] จึงส่งผลให้โคลนฟางข้าวที่เตรียมด้วยวิธีนี้สามารถไหลได้อย่างไม่ติดขัด แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือแป้งมันสำปะหลังมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการเตรียมสารป้อนโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานจึงไม่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ ในวิธีที่สี่จึงเลือกใช้กากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากโรงงานผลิตแป้งมัน สำปะหลังซึ่งมีราคาถูก แต่องค์ประกอบหลักของกากมันสำปะหลังมีแป้งมากกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เตรียมสารป้อนได้เช่นเดียวกับการใช้แป้งมันสำปะหลัง จากการศึกษาหาวิธีการเตรียมสารป้อนที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมสารป้อนคือการต้มฟางข้าวในน้ำที่ 90–100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงเติมกากมันสำปะหลัง จากนั้นให้ความร้อนต่อไปอีก 30 นาที พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง โดยสัดส่วน

ของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการเตรียมสารป้อนแต่ละครั้ง คิดเป็นร้อยละ 3.5 เมื่อเทียบกับน้ำหนักของของเหลว และ สัดส่วนของฟางข้าวต่อกากมันสำปะหลังเท่ากับ 1 ต่อ 1 (โดยน้ำหนักแห้ง) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของชีว มวลผสมแสดงในตารางที่ 1

### 3.3 ผลของอุณหภูมิและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ของปั๊มต่อร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปใน ระหว่างการปรับสภาพเบื้องต้น

รูปที่ 2 แสดงร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปของ องค์ประกอบต่าง ๆ ในชีวมวลภายหลังผ่านการปรับสภาพ ด้วยน้ำภาวะได้วิกฤตพบว่าภาวะการปรับสภาพที่รุนแรง ขึ้นส่งผลให้ร้อยละน้ำหนักสูญเสียของแต่ละองค์ประกอบ มีค่าสูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิการปรับสภาพแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการปรับสภาพเบื้องต้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด สำหรับกระบวนการปรับสภาพชีวมวล พิจารณาถึงร้อยละ การสูญเสียของเฮมิเซลลูโลสพบว่าการปรับสภาพที่ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความถี่ของกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 10 เฮิร์ต ร้อยละน้ำหนักสูญเสียมีค่าสูงถึงร้อยละ 31 เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิการปรับสภาพสูงเพียงพอ เฮมิ เซลลูโลสที่มีอยู่ในชีวมวลจะเกิดการสลายตัว จากนั้นเริ่ม เกิดดีพอลิเมอไรเซชัน (Depolymerization) จนกระทั่ง เกิดการสลายตัวออกมาอยู่ในน้ำ [17] ขณะที่การเพิ่มเวลา การปรับสภาพในเครื่องปฏิกรณ์โดยการลดความถี่ของ กระแสไฟฟ้าจาก 10 เฮิร์ต เหลือ 5 เฮิร์ต ร้อยละน้ำหนัก สูญเสียของเฮมิเซลลูโลสมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็น ว่าเวลาการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 120 องศา เซลเซียสไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสลายตัวของเฮมิ เซลลูโลส ขณะที่ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปของเซลลูโลส และลิกนินมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในช่วงการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการปรับสภาพจาก 120 องศา เซลเซียส ไปเป็น 140 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ร้อยละ น้ำหนักที่สูญเสียไปขององค์ประกอบทั้งสองยังมีค่าไม่สูง เมื่อเทียบกับร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปของเฮมิเซลลูโลส เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในน้ำภาวะได้ วิกฤตสามารถเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าองค์ประกอบทั้ง

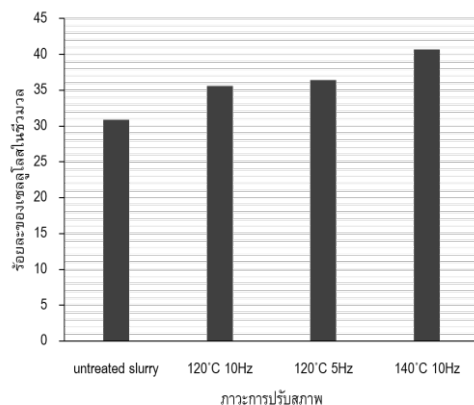
สองชนิด โดยอุณหภูมิของการสลายตัวขององค์ประกอบ ประเภทลิกโนเซลลูโลสสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ได้ดังนี้ เฮมิเซลลูโลส < เซลลูโลส < ลิกนิน [18] อย่างไร ก็ตามในงานวิจัยนี้เป็นการใช้ชีวมวลผสมระหว่างฟางข้าว และกากมันสำปะหลัง ต่างจากงานวิจัยอื่นที่ใช้ฟางข้าว เพียงอย่างเดียว องค์ประกอบหลักในกากมันสำปะหลังคือ แป้งที่สามารถสลายตัวออกมาได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเฮมิ เซลลูโลส เนื่องจากโครงสร้างของแป้งมีการจับตัวกันอย่าง ไม่มีรูปแบบและโมเลกุลเกาะกันอย่างหลวม ๆ จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียไปของคาร์โบไฮเดรตที่ ไม่ใช่เส้นใยในชีวมวลมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 70 ณ ภาวะการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ของปั๊มเท่ากับ 10 เฮิร์ต



**รูปที่ 2** ร้อยละน้ำหนักสูญเสียขององค์ประกอบต่าง ๆ ในชีวมวลระหว่างการปรับสภาพเบื้องต้นอย่างต่อเนื่อง ที่ภาวะต่าง ๆ

การวิเคราะห์ปริมาณของเซลลูโลสที่เหลืออยู่ใน ชีวมวลหลังผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำภาวะได้วิกฤตที่ ภาวะต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3 แสดงโดยเทียบกับร้อยละของ เซลลูโลสในชีวมวลผสมที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ เบื้องต้นซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 30.85 พบว่าการปรับสภาพ เบื้องต้นทำให้ร้อยละเซลลูโลสในชีวมวลมีค่าสูงขึ้น ร้อยละ ของเซลลูโลสในชีวมวลภายหลังการปรับสภาพเบื้องต้นมี ค่าอยู่ระหว่าง 35.62 ถึง 40.72 ขึ้นอยู่กับภาวะการปรับ สภาพเบื้องต้น การที่ชีวมวลภายหลังการปรับสภาพ

เบื้องต้นมีสัดส่วนของเซลลูโลสที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและแป้งที่อยู่ในชีวมวลตั้งต้นออกมาอยู่ในส่วนของของเหลว และเนื่องจากความสามารถในการสลายตัวขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การปรับสภาพเบื้องต้น ดังนั้นร้อยละของเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในชีวมวลภายหลังการปรับสภาพจึงมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพเช่นกัน โดยการปรับสภาพชีวมวลด้วยภาวะรุนแรงที่สุดในการทดลอง คือที่อุณหภูมิการปรับสภาพเป็น 140 องศาเซลเซียส และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ของปั๊มเท่ากับ 10 เฮิร์ต ร้อยละของเซลลูโลสในชีวมวลมีค่าเท่ากับ 40.72 ซึ่งมากกว่าชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นประมาณร้อยละ 10



**รูปที่ 3** ร้อยละของเซลลูโลสในชีวมวลภายหลังการปรับสภาพเบื้องต้นอย่างต่อเนื่องที่ภาวะต่าง ๆ เทียบกับชีวมวลก่อนผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

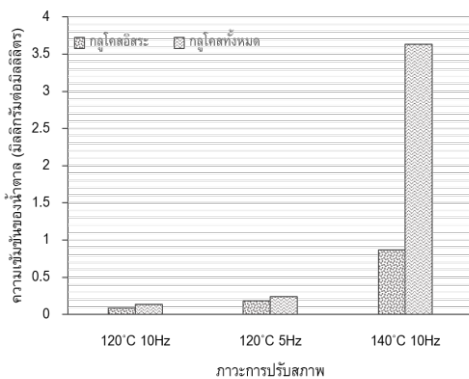
### 3.4 ผลของอุณหภูมิและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ของปั๊มต่อองค์ประกอบในของเหลวหลังปรับสภาพ

องค์ประกอบภายในของเหลวภายหลังการปรับสภาพเบื้องต้นสามารถแยกออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งคือกลุ่มที่เป็นน้ำตาลทั้งที่อยู่ในรูปน้ำตาลอิสระหรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก (Oligosaccharide) คือ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวตั้งแต่สองโมเลกุลขึ้นไปจนถึงสิบโมเลกุล อีกกลุ่มคือสารประกอบกลุ่มฟูแรน (Furanic compounds) เป็นอนุพันธ์ของ

เฟอร์ฟูรอล ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยเฟอร์ฟูรอลเกิดจากการสลายตัวของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ฟูรอลดีไฮด์เกิดจากการสลายตัวของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม สารประกอบกลุ่มนี้ถือเป็นตัวยับยั้ง (Inhibitors) เนื่องจากส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์และยีสต์ในขั้นตอนการเปลี่ยนเป็นน้ำตาลและขั้นตอนการหมักตามลำดับ [19] นอกจากตัวยับยั้งที่เกิดขึ้นแสดงถึงการสูญเสียของน้ำตาลที่สามารถนำไปผลิตเอทานอลแล้วยังส่งผลให้ของแข็งเปียกที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นไม่สามารถนำไปย่อยต่อด้วยเอนไซม์ได้ทันที ต้องผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนก่อน ขณะที่ของเหลวหลังปรับสภาพซึ่งมีน้ำตาลอยู่ก็ไม่สามารถนำไปใช้ผลิตเอทานอลโดยการนำไปย่อยและหมักด้วยยีสต์ต่อได้เช่นกัน

รูปที่ 4 แสดงความเข้มข้นของกลูโคสอิสระ (กราฟลายจุด) และกลูโคสทั้งหมด (กราฟลายเส้น) จะเห็นว่ากลูโคสส่วนมากที่ละลายอยู่ในน้ำหลังการปรับสภาพไม่อยู่ในรูปกลูโคสโมเลกุลเดี่ยว แต่จะยังคงอยู่ในรูปสายโซ่ของกลูโคสเป็นหลัก (Gluko-oligosaccharide) ซึ่งเป็นข้อดีของการปรับสภาพชีวมวลด้วยน้ำภาวะไควกฤตเมื่อเทียบกับการปรับสภาพโดยใช้สารเคมี เนื่องจากการปรับสภาพด้วยการใช้สารเคมีโดยเฉพาะการใช้กรดจะทำให้กลูโคสเกือบทั้งหมดในของเหลวอยู่ในรูปของกลูโคสโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งทำให้มีโอกาสสลายตัวต่อไปได้ง่ายกว่าการอยู่ในรูปสายโซ่ของกลูโคส [20] สำหรับกลูโคสในน้ำหลังการปรับสภาพมาจากแป้งที่เป็นองค์ประกอบหลักของกากมันสำปะหลัง และจากเซลลูโลสที่มีอยู่ในชีวมวลทั้งสองชนิด โดยพอลิเมอร์สายโซ่ยาวของกลูโคสจากทั้งสองส่วนเกิดการสลายตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่ที่สั้นลงระหว่างการปรับสภาพเบื้องต้น และสามารถเกิดการสลายตัวต่อไปจนกระทั่งบางส่วนเกิดเป็นกลูโคสอิสระ เนื่องจากความเป็นกรดอ่อนของน้ำที่ใช้ในการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงโดยมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 5-6 นอกจากนี้ความเป็นกรดอ่อนของน้ำยังเป็นผลมาจากการสลายตัวออกมาของเฮมิเซลลูโลสที่โครงสร้างประกอบด้วยหมู่เอซีทิล

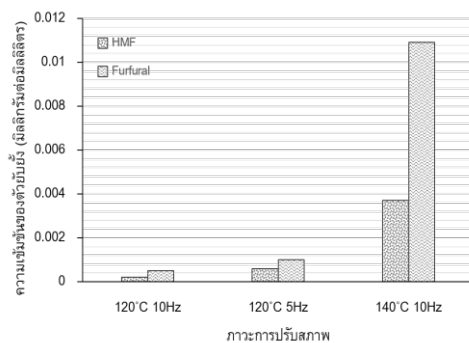
[21, 22] การสลายตัวออกมาของโมเลกุลที่มีหมู่แอซิดทิลทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสายโซ่ยาวของกลูโคสและช่วยในการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียซึ่งแสดงในหัวข้อ 3.3 ทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่ากลูโคสที่เกิดขึ้นในของเหลวน่าจะมาจากแป้งเป็นหลัก เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในชีวมวล ณ ภาวะที่ได้ทำการทดลองต่ำกว่าการสลายของแป้งมาก ส่วนกลูโคสที่อาจเกิดขึ้นมาจากเฮมิเซลลูโลสภายในชีวมวลจะมาจากเฮมิเซลลูโลสบริเวณที่เป็นออสันฐาน เพราะว่าเฮมิเซลลูโลสในส่วนนี้สามารถสลายตัวออกมาได้ง่ายกว่าในส่วนที่มีความเป็นผลึกแม้ใช้อุณหภูมิการปรับสภาพไม่สูงนัก มีงานวิจัยรายงานว่าเฮมิเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูงจะเริ่มสลายตัวออกมาอยู่ในของเหลวภายหลังการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส [23, 24] สำหรับแนวโน้มของความเข้มข้นกลูโคสในของเหลวแปรผันตรงกับความรุนแรงของภาวะการปรับสภาพเบื้องต้น ณ ภาวะการปรับสภาพที่รุนแรงที่สุด พบว่าความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าสูงที่สุด



**รูปที่ 4** ความเข้มข้นของกลูโคสอิสระและกลูโคสทั้งหมดในของเหลวภายหลังการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ

ความเข้มข้นของตัวยั้งที่เกิดขึ้นในน้ำหลังการปรับสภาพแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรอลและ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ฟูราลดีไฮด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามภาวะการปรับสภาพที่รุนแรงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการเกิดของกลูโคสอิสระใน

ของเหลวที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณตัวยั้งที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิการปรับสภาพเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ของบีมเท่ากับ 10 เฮิร์ต ถือว่ามีปริมาณน้อยมากไม่ส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในขั้นตอนการเปลี่ยนเป็นน้ำตาลและการทำงานของยีสต์ในขั้นตอนการหมัก

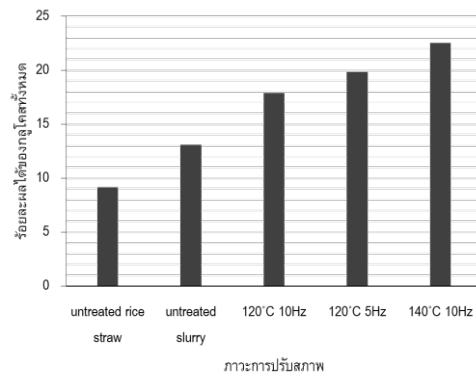


**รูปที่ 5** ความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรอลและ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ฟูราลดีไฮด์ในของเหลวภายหลังการปรับสภาพที่ภาวะต่างๆ

### 3.5 ผลของอุณหภูมิและความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ของบีมต่อประสิทธิภาพในการย่อยด้วยเอนไซม์

รูปที่ 6 แสดงร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดพบว่าชีวมวลที่นำมาเปลี่ยนเป็นน้ำตาลโดยไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นให้ประสิทธิภาพการย่อยของเอนไซม์ที่ต่ำ เนื่องจากความซับซ้อนและแข็งแรงขององค์ประกอบของชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเซลลูโลสถูกปกคลุมด้วยเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้เป็นน้ำตาลมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเปลี่ยนชีวมวลผสมระหว่างฟางข้าวและกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพให้เป็นน้ำตาล ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียมชีวมวลผสมซึ่งมีการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงทำให้โครงสร้างของชีวมวลอ่อนตัวลงทำให้การย่อยเกิดได้ดีขึ้น สำหรับการเปลี่ยนให้เป็น

น้ำตาลของชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว ค่าร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของการปรับสภาพ ณ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ของปั๊ม 10 เฮิร์ต ค่าร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 22.50 เนื่องจากความสามารถในการสลายตัวออกมาของเฮมิเซลลูโลสแปรผันตรงกับความรุนแรงการปรับสภาพ การกำจัดเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลทำให้ความสามารถในการเข้าถึงของเอนไซม์และการย่อยเซลลูโลสไปเป็นกลูโคสมีมากขึ้น นอกจากนี้การสลายตัวออกมาของเฮมิเซลลูโลสยังก่อให้เกิดรูพรุนที่พื้นผิวของชีวมวลเป็นจำนวนมากส่งผลดีต่อการเข้าถึงของเอนไซม์ด้วยเช่นกัน [25] ซึ่งยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของชีวมวลภายหลังการปรับสภาพที่ภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นว่าชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ เส้นใยชิดกันอย่างหนาแน่น แต่เมื่อผ่านการปรับสภาพเส้นใยในชีวมวลจะถูกทำลายให้แตกออก เกิดรูพรุนบริเวณพื้นผิว ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของชีวมวลซึ่งส่งผลดีต่อการเข้าถึงของเอนไซม์ อย่างไรก็ตามค่าร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดมีค่าเพียง 1 ใน 3 เท่านั้นเมื่อเทียบกับร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดตามทฤษฎีซึ่งมีค่าเท่ากับ 68.08 เนื่องจากภาวะการปรับสภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องยังไม่สามารถทำให้เฮมิเซลลูโลสและแป้งที่มีอยู่ในชีวมวลสลายตัวออกมาอย่างสมบูรณ์ สำหรับการปรับสภาพด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ภาวะที่รุนแรงกว่าอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จำเป็นต้องแก้ไขจุดหลัก ๆ คือ การเปลี่ยนปะเก็นเทฟลอนเป็นปะเก็นที่สามารถทนอุณหภูมิและความดันได้สูงขึ้น และแก้ไขระบบหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิตัวอย่างก่อนออกสู่บรรยากาศ

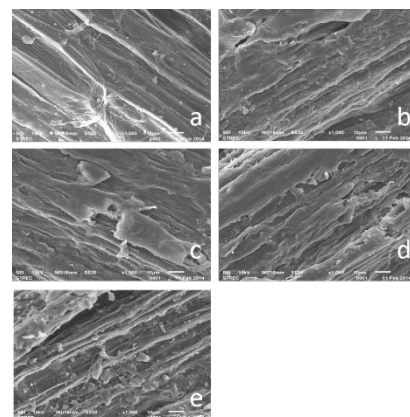


รูปที่ 6 ร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดในของเหลวภายหลังการนำชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพที่ภาวะต่าง ๆ

และชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น มาย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส ที่ความเป็นกรด-เบส 4.8 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สัดส่วนชีวมวลแห้งต่อเอนไซม์ 1.2 กรัมต่อ 1 มิลลิลิตร เวลาในการย่อย 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นของกลูโคสจากการย่อยเซลลูโลสบริสุทธิ์จำนวน 1.2 กรัม

เท่ากับ 16.26 กรัมต่อลิตร

(Enzyme activity = 16.94 FPU/ml)



รูปที่ 7 ลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของชีวมวลทั้งที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพที่ค่าดังขยาย 1000 เท่า a) ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ b) ชีวมวลผสมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ c) ชีวมวลผสมผ่านการปรับสภาพที่ 120 องศาเซลเซียส ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ของปั๊ม 10 เฮิร์ต d) ชีวมวลผสมผ่านการปรับสภาพที่ 120 องศาเซลเซียส ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ของปั๊ม 5 เฮิร์ต e) ชีวมวลผสมผ่านการปรับสภาพที่ 140 องศาเซลเซียส ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ของปั๊ม 10 เฮิร์ต

#### 4. สรุปผล

จากการเตรียมชีวมวลเพื่อใช้เป็นสารป้อนสำหรับกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นอย่างต่อเนื่องพบว่าวิธีการที่เหมาะสมที่สุดคือ การต้มฟางข้าวในน้ำที่ 90–100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงเติมกากมันสำปะหลัง จากนั้นให้ความร้อนต่อไปอีก 30 นาที พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง สัดส่วนของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการเตรียมสารป้อนแต่ละครั้งคิดเป็นร้อยละ 3.5 เมื่อเทียบกับน้ำหนักของน้ำ และสัดส่วนของฟางข้าวต่อกากมันสำปะหลังเท่ากับ 1 ต่อ 1 การศึกษาภาวะการปรับสภาพที่เหมาะสมพบว่าอุณหภูมิการปรับสภาพเบื้องต้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการที่อุณหภูมิการปรับสภาพเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ของปั๊มเป็น 10 เฮิร์ต ค่าร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 22.50 สัมพันธ์กับ

ร้อยละการสูญเสียของเฮมิเซลลูโลส และที่ภาวะการปรับสภาพนี้พบว่า ค่าร้อยละผลได้ของกลูโคสทั้งหมดสูงกว่าผลที่ได้จากการย่อยฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและย่อยชีวมวลผสมระหว่างฟางข้าวและกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพประมาณ 2.5 และ 1.5 เท่าตามลำดับ ขณะที่ตัวบ่งชี้ที่เกิดขึ้นในของเหลวภายหลังการปรับสภาพมีปริมาณที่ต่ำเนื่องจากกลูโคสที่ละลายอยู่ในของเหลวภายหลังการปรับสภาพไม่อยู่ในรูปโมเลกุลเดี่ยว แต่จะยังคงอยู่ในรูปสายโซ่พอลิเมอร์ของกลูโคส

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Ashok, P. Handbook of plant-based biofuels. CRC Press (Taylor&Francis Group), 2009.
- [2] พลังงานชีวมวล. มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554.
- [3] Graeme, M.W. Bioethanol: science and technology of fuel alcohol. *Ventus publishing Aps*, 2010; 8-53.
- [4] Cheng, J. Biomass to renewable energy processes. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [5] Chiaramonti, D., Prussi M., Ferreno, S., Oriani, L., Ottonello, P., Torre, P. and Cherchi, F. Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method. *Biomass and Bioenergy*, 2012; 46: 25-35.
- [6] Himmel, M.E. Biomass recalcitrance: deconstructing the plant cell wall for bioenergy. Oxford : Blackwell Pub, 2008.
- [7] Hendriks, A.T.W.M. and Zeeman, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 2009; 100(1): 10-18.
- [8] Kumar, P., Barrett, D.M., Delwiche, M.J. and Stroeve, P. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009; 48(8): 3713-3729.
- [9] Wan, C., Zhou, Y. and Li, Y. Liquid hot water and alkaline pretreatment of soybean straw for improving cellulose digestibility. *Bioresour Technol*, 2011; 102(10): 6254-6259.
- [10] Mosier, N.S., Hendrickson, R., Brewer, M., Ho, N., Sedlak, M., Dreshel, R., Welch, G., Dien, B.S., Aden, A. and Ladisch, M.R. Industrial scale-up of pH-controlled liquid hot water pretreatment of corn fiber for fuel ethanol production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2005; 125: 77-97.
- [11] Van Soest, P.J. and Goering, H.K. Forage fiber analyses (Apparatus, Reagents, Procedures, and Some Applications). *Agriculture Handbook*, 1983; 379.
- [12] Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J. and Templeton, D. Determination of sugars, byproducts, and degradation products in liquid fraction process samples. Technical Report, NREL/TP-510-42623. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2008.

- [13] Binod, P., Sindhu, R., Singhanian, R. R., Vikram, S., Devi, L., Nagalakshmi, S., Kurien, N., Sukumaran, R. K. and Pandey, A. Bioethanol production from rice straw: An overview. *Bioresource Technology*, 2010; 101(13): 4767-4774.
- [14] ชีรภัทร ศรีนรคุตร, เลิศลักษณ์ แก้ววิมล และละเอียด แซ่โจ้ว. การย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในประเทศไทย. *วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2006; 31(1).
- [15] Yoo, C., Lee, C.W. and Kim, T. Two-stage fractionation of corn stover using aqueous ammonia and hot water. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011; 164(6): 729-740.
- [16] Wajira, S. R. and David, S. J. Starch Gelatinization. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2008; 55: 221–268.
- [17] Pérez, J. A., Ballesteros, I., Ballesteros, M., Sáez, F., Negro, M. J. and Manzanares, P. Optimizing liquid hot water pretreatment conditions to enhance sugar recovery from wheat straw for fuel-ethanol production. *Fuel*, 2008; 87(17–18): 3640-3647.
- [18] Ando, H., Sakaki, T., Kokusho, T., Shibata, M., Uemura, Y. and Hatate, Y. Decomposition behavior of plant biomass in hot-compressed water. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2000; 39(10): 3688-3693.
- [19] Sanchez, G., Pilcher, L., Roslander, C., Modig, T., Galbe, M. and Liden, G. Dilute-acid hydrolysis for fermentation of the Bolivian straw material Paja Brava. *Bioresource Technology*, 2004; 93(3): 249-256.
- [20] Mosier, N., Ho, N., Hendrickson, R., Sedlak, M. and Ladisch, M.R. Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover. *Bioresource Technology*, 2005; 96(18): 1986-1993.
- [21] Öhgren, K., Bura, R., Saddler, J. and Zacchi, G. Effect of hemicellulose and lignin removal on enzymatic hydrolysis of steam pretreated corn stover. *Bioresource Technology*, 2007; 98(13): 2503-2510.
- [22] Carvalheiro, F., Silva-Fernandes, T., Duarte, L. and Girio, F. Wheat Straw Autohydrolysis: Process optimization and products characterization. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2009; 153(1-3): 84-93.
- [23] Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M. and Ladisch, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2005; 96(6): 673-686.
- [24] Weil, J., Brewer, M., Hendrickson, R., Sarikaya, A. and Ladisch, M. Continuous pH monitoring during pretreatment of yellow poplar wood sawdust by pressure cooking in water. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1998; 70-72(1): 99-111.
- [25] Zeng, M., Mosier, N., Huang, C.P., Sherman, D.M. and Ladisch, M.R. Microscopic examination of changes of plant cell structure in corn stover due to hot water pretreatment and enzymatic hydrolysis. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007; 97(2): 265-278.