ผลของการปรับสภาพกกอียิปต์ด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอน ระหว่างไฮโดรเทอร์มอลและการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Effects of Pretreatment on Papyrus using Two-stage of Hydrothermal and Chemical pretreatment using Sodium hydroxide

มณฑิรา พงษ์พยัคฆ์[1], คฑาพล ปิ่นพัฒนพงศ์[1], กาญจนา ลอยทะเล[1], และ ฐนียา รังษีสุริยะชัย[1*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: thaneeya.r@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

กกอียิปต์เป็นพืชลิกโนเซลลูโลสที่มีเส้นใยเซลลูโลสสูง อัตราผลผลิตสูง และเจริญเติบโตได้ง่าย เหมาะสมในการผลิตเป็นเซลลูโลสไฟเบอร์ เพื่อดูดซับมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพที่เหมาะสม โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกกอียิปต์ก่อนและหลังการปรับสภาพแบบสองขั้นตอน โดยทำการปรับสภาพในขั้นตอนแรกด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที และการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาการปรับสภาพที่ 30 45 และ 60 นาที จากผลการศึกษาพบว่ากกอียิปต์ก่อนการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เท่ากับ ร้อยละ 48.88 11.1 และ 7.69 ตามลำดับ เมื่อทำการปรับสภาพแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยมีลักษณะมีพื้นผิวแตกหัก ไม่ยึดเกาะกัน แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของลิกนินที่เป็นตัวยึดเกาะเซลลูโลสถูกทำลาย องค์ประกอบทางเคมีหลังการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่การปรับสภาพด้วยระยะเวลา 60 นาที ให้ปริมาณเซลลูโลสดีที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 53.54 และสามารถกำจัดปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้มากที่สุด

คำสำคัญ: กกอียิปต์, การปรับสภาพสองขั้นตอน, ไฮโดรเทอร์มอล, โซเดียมไฮดรอกไซด์

Abstract

Papyrus is a lignocellulose plant with high cellulose content, requiring proper pretreatment. It has a high productivity rate and is easy to grow, which is suitable for producing cellulose fibers to absorb contaminants in wastewater. This research aimed to study papyrus' chemical composition and morphology before and after two-stage pretreatment. The pretreatment was carried out in the first step by a hydrothermal process at 220 °C for 15 minutes and then by pretreatment with 5% sodium hydroxide solution at 120°C. The pretreatment time was varied at 30, 45, and 60 minutes. The results showed that the papyrus before pretreatment contained cellulose, hemicellulose, and lignin contents of 48.88, 11.1, and 7.69%, respectively. It causes morphological changes with a fractured surface and no adhesion. This demonstrates that the lignin structure that binds cellulose is destroyed. The chemical composition after pretreatment contained the highest cellulose content at 60 min. It gave the best cellulose content, equal to 89.23%, and removed the highest hemicellulose and lignin content.

Keywords: Papyrus, two-stage pretreatment, hydrothermal, sodium hydroxide

1. คำนำ

พืชน้ำมีบทบาทสำคัญต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำอย่างมาก เช่น เป็นอาหารของสัตว์ เป็นที่หลบภัยของสิ่งมีชีวิตในน้ำ บางชนิดอาจช่วยบำบัดน้ำเสียขั้นต้นได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีมากเกินความต้องการก็จะทำให้กลายเป็นวัชพืชหรือของเสียที่ต้องพิจารณาในการนำไปกำจัด พืชน้ำจำนวนมากที่เมื่ออายุโตเต็มที่ ก็เน่าหรือตายลงไปโดยไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์หรือต่อยอดเพื่อเพิ่มมูลค่าใดๆ [1] กกอียิปต์เป็นพืชน้ำที่เติบโตในพื้นที่ชุ่มน้ำลำต้นแข็งแรง มีความทนทานและมีผลผลิตสูง ซึ่งมีการนำกกอียิปต์ไปใช้ประโยชน์ในทางบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ [2] แต่เมื่อผ่านขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียแล้วกกอียิปต์จะถูกตัดทิ้ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมา อีกทั้งกกอียิปต์ยังเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อน ถ้านำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ ก็จะสามารถนำกกอียิปต์ไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป ซึ่งกระบวนการปรับสภาพในแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป จึงจำเป็นต้องเลือกกระบวนการที่เหมาะสมโดยคำนึกถึงประสิทธิภาพ ราคา และผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

กระบวนการปรับสภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนหรือกำจัดโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ที่เป็นสิ่งกีดขวางต่อกระบวนการย่อยเซลลูโลส อันได้แก่ ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ออกจากโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มความเป็นรูพรุนของวัสดุ กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ 4 รูปแบบ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ [3] ซึ่งการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี เป็นกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพในการช่วยกำจัดลิกนินที่ห่อหุ้มเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ดี ไฮโดรเทอร์มอลนั้น เป็นการใช้ความร้อนปรับสภาพของวัตถุดิบเพื่อทำลายเนื้อเยื่อของเซลลูโลส [4] และการปรับสภาพวัตถุทางเคมีโดยใช้ด่างเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูก และไม่ต้องใช้พลังงาน [5]

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงสนใจในการศึกษาผลของการปรับสภาพกกอียิปต์ร่วมกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและการปรับสภาพวัตถุทางเคมีโดยใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เพื่อนำไปเป็นวัสดุดูดซับน้ำเสีย หรือเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน อีกทั้งยังเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ซึ่งจะส่งผลดีต่อการกำจัดวัสดุเหล่านี้ออกจากสิ่งแวดล้อมและยังทำให้สภาพแวดล้อมดีขึ้นอีกด้วย

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาปรับสภาพในงานวิจัยครั้งนี้ได้มาจากพืชที่เจริญเติบโตในพื้นที่ชุ่มน้ำที่เพาะปลูกใน อำเภอศรีประจันต์ จังหวัดสุพรรณบุรี ได้แก่ กกอียิปต์ มีอายุการปลูกประมาณ 2-4 เดือน โดยก่อนจะนำไปปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอน จะถูกนำไปลดขนาดให้เล็กลงด้วยเครื่องตัด ต่อจากนั้นนำไปตากแห้งและอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากอบจนครบเวลานำไปปั่นเพิ่มเพื่อลดขนาดให้เล็กลงอีกก่อนจะนำไปคัดแยกขนาดโดยผ่านตระแกรงขนาด 100 Mesh และนำไปเก็บไว้ในถุงสุญญากาศเพื่อรอทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพกกอียิปต์ด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอนระหว่างไฮโดรเทอร์มอลและการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งก่อนกระบวนการปรับสภาพแบบสองขั้นตอน และหลังกระบวนการปรับสภาพด้วยไฮโดรเทอร์มอลและการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะต้องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกกอียิปต์ในสภาพน้ำหนักแห้ง ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส (วิธี TAPPI T203 om-88) [6] และลิกนิน (วิธี TAPPI T222-om-88) [7] เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปของการปรับสภาพด้วยวิธีการแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนการปรับสภาพในแต่ละขั้นตอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 กระบวนการปรับสภาพขั้นแรก โดยไฮโดรเทอร์มอล

เตรียมกกอียิปต์ 20 กรัมและน้ำ DI (Deionized water) 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในกระบอกไฮโดรเทอร์มอลขนาด 250 มิลลิลิตรและปิดฝาให้สนิท จากนั้นบรรจุลงในกระบอกสเตนเลสไฮโดรเทอร์มอล เพื่อทำการปรับสภาพในขั้นแรก โดยทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที [8] เมื่อครบเวลาที่ตั้งไว้แล้ว นำออกมาเทใส่ถาดและเข้าตู้อบ อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้แห้ง แล้วนำบางส่วนออกมาเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

2.2.2 กระบวนการปรับสภาพขั้นที่สอง โดยการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

หลังจากนั้นนำตัวอย่างแห้งที่ผ่านการปรับสภาพในขั้นแรกมาทำการปรับสภาพขั้นที่สองกับสารละลายด่าง ซึ่งได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำปฏิกิริยาโดยใช้ความร้อนด้วยเครื่องหม้อนึ่งความดันไอน้ำ โดยเตรียมกกอียิปต์ 30 กรัมและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 300 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวด 500 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลาย-โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาการปรับสภาพที่ 30 45 และ 60 นาที [9] โดยกำหนดอุณหภูมิในเครื่องหม้อนึ่งความดันไอน้ำ ที่ 80 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลาที่ตั้งไว้แล้ว นำออกมาเทใส่ถาดและเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้แห้ง แล้วนำบางส่วนออกมาเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

3. ผลการทดลอง

ผลการศึกษาการปรับสภาพกกอียิปต์ด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอนระหว่างไฮโดรเทอร์มอลและการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลาย-โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของกกอียิปต์ก่อนและหลังการปรับสภาพ เพื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมของการนำเซลลูโลสไฟเบอร์ที่ได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป ดังแสดง ผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 องค์ประกอบของกกอียิปต์ก่อนและหลังการปรับสภาพ

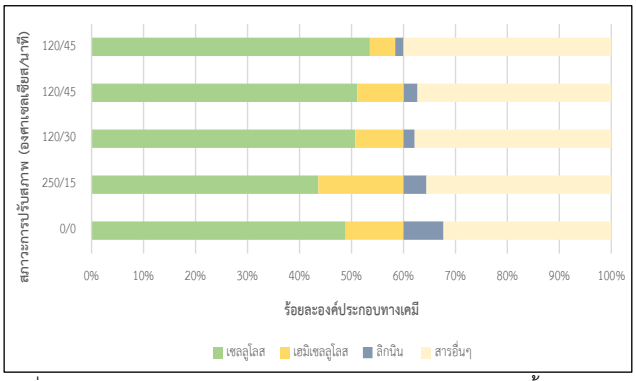
กกอียิปต์มีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของพืชที่เป็นลิกโนเซลลูโลส ที่มีความแข็งแรงและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน โดยกกอียิปต์เป็นพืชที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสไฟเบอร์ที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากเป็นวัสดุที่นิยมนำไปทำกระดาษ [10] ดังนั้นในการปรับสภาพแต่ละวิธีจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาโดยก่อนการปรับสภาพ พบว่ากกอียิปต์ที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย เซลลูโลสเท่ากับร้อยละ 48.88 เฮมิเซลลูโลสเท่ากับร้อยละ 11.12 ลิกนินเท่ากับร้อยละ 7.69 และเป็นองค์ประกอบอื่นๆ เช่น แร่ธาตุ เถ้า และสารประกอบอินทรีย์บางชนิดมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 32.31 ซึ่งจะเห็นว่าในกกอียิปต์ก่อนการปรับสภาพมีปริมาณลิกนินในปริมาณที่ค่อนข้างสูง รวมถึงมีปริมาณของ

เฮมิเซลลูโลสที่สามารถไฮโดรไลซิสไปเป็นเซลลูโลสได้ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการในการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสด้วย

จากรูปที่ 1 แสดงผลวิเคราะห์ขององค์ประกอบทางเคมีของกกอียิปต์ก่อนการปรับสภาพและหลังการปรับสภาพขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สองในแต่ละอุณหภูมิ พบว่า เมื่อผ่านการปรับสภาพครั้งที่หนึ่งด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลทำให้ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินลดลง เท่ากับร้อยละ 43.64 และ 4.42 แต่มีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ปรับสภาพในขั้นตอนนี้มีอุณหภูมิที่สูงเกินไป จึงเกิดสารยับยั้งขึ้น ในปริมาณสูง โดยสารยับยั้งที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบ กลุ่มฟูแรน (Furanic compounds) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ เฟอร์ฟูรอล เช่น เฟอร์ฟูรอลและ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-เฟอร์ฟูราลดีไฮด์ [11] และหลังกระบวนการปรับสภาพขั้นที่สอง โดยการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้กกอียิปต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพในขั้นแรกนำมาทำการทดลอง ให้ความร้อนในอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 นาที 45 นาที และ 60 นาที โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 พบว่าระยะเวลาในการปรับสภาพมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของกกอียิปต์ โดยที่ระยะเวลาที่มากขึ้นทำให้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากกกอียิปต์ก่อนการปรับสภาพและมากกว่าหลังการปรับสภาพขั้นที่หนึ่ง เฮมิเซลลูโลสและลิกนินน้อยลงหลังจากการปรับสภาพครั้งที่หนึ่ง ลิกนินก็ลดลงอย่างมาก แสดงให้เห็นว่ามีการกำจัดลิกนินที่มากในกระบวนการขั้นที่สองได้ดีกว่าการปรับสภาพขั้นตอนเดียว โดยมีเซลลูโลสมากที่สุดที่ร้อยละ 53.54 และลิกนินน้อยที่สุดที่ร้อยละ 1.62 ในการปรับสภาพแบบสองขั้นตอนที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของด่างที่ 60 นาที อุณหภูมิในการปรับสภาพ 120 องศาเซลเซียส

3.2 สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 นั้น จะได้นำมาใช้ในการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ โดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานและเป้าหมายของการปรับสภาพ ว่าต้องการประสิทธิภาพสูงสุดหรือคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพ หรือการนำวัสดุลิกโนเซลลูโลสดังกล่าวไปใช้ในการผลิตเซลลูโลสไฟเบอร์ หรือ นำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (ไบโอเอทานอล/ก๊าซชีวภาพ) [12] เป็นต้น ถ้าคำนึงประสิทธิภาพในการผลิตเซลลูโลส หรือ การกำจัดลิกนินนั้น พบว่า ที่สภาวะการปรับสภาพสองขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลา 60 นาที โดยทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาถึงมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์หรือค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการปรับสภาพนั้น พบว่า การปรับสภาพแบบสองขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลา 30 นาที สามารถกำจัดลิกนินได้ใกล้เคียงกับที่ระยะเวลา 45 และ 60 นาที โดยมีปริมาณลิกนินเหลือร้อยละ 2.16, 2.67 และ 1.62 ที่ระยะเวลา 30 45 และ 60 นาที ตามลำดับ และมีเซลลูโลสที่ผลิตได้เท่ากับร้อยละ 50.74, 51.13 และ 53.54 ที่ระยะเวลา 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ระยะเวลา 30 นาทีมีปริมาณเซลลูโลสใกล้เคียงกับที่ระยะเวลา 45 นาที ดังนั้น สรุปได้ว่าถ้าพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายซึ่งเกิดจากการให้ความร้อน การใช้เวลาที่น้อยลง (30 นาที) จะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่า



รูปที่ 1 ร้อยละของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในแต่ละขั้นตอนของการปรับสภาพและที่ระยะเวลาต่างๆ ในการปรับสภาพขั้นที่สองด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0/0 คือ ก่อนการปรับสภาพ, 250/15 คือ การปรับสภาพขั้นแรกด้วยไฮโดรเทอร์มอล, 120/30 คือ การปรับสภาพขั้นที่สองอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสที่เวลา 30 นาที, 120/45 คือ การปรับสภาพขั้นที่สองอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสที่เวลา 45 นาที และ 120/60 คือ การปรับสภาพขั้นที่สองอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสที่เวลา 60 นาที)

4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกกอียิปต์หลังกระบวนการปรับสภาพแบบสองขั้นตอนระหว่างไฮโดรเทอร์มอลและการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาการปรับสภาพในกระบวนการปรับสภาพแบบสองขั้นตอนพบว่า สามารถกำจัดลิกนินได้สูงสุดที่ร้อยละ 79.01 และนำกลับเซลลูโลสได้สูงสุดที่ร้อยละ 53.54 โดยใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพในขั้นที่สองที่ระยะเวลา 60 นาที อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีการกำจัดลิกนินที่มากในกระบวนการขั้นที่สองได้ดีกว่าการปรับสภาพขั้นตอนเดียว และระยะเวลาในการปรับสภาพมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี การปรับสภาพสองขั้นตอนโดยใช้ไฮโดรเทอร์มอลและการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นก็เป็นอีกทางเลือกที่ดีที่จะช่วยลดระยะเวลาในการปรับสภาพลงได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้การสนับสนุนในด้านสิ่งสนับสนุนการวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์. 2532. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของพืชน้ำกับสารอาหารในบึงมักกะสัน. กรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[2] Boar, R.R., Harper, D.M., Adams, C.S., 1999. Biomass allocation in Cyperus papyrus in a tropical wetland, Lake Naivasha, Kenya. Biotropica 31 (3), 411–421.

[3] สุภาวดี ผลประเสริฐ. (2557). การปรับสภาพวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 22(5), 641-649.

[4] Ashraf, M.T., Schmidt, J.E., 2018. Process simulation and economic assessment of hydrothermal pretreatment and enzymatic hydrolysis of multi-feedstock lignocellulose - Separate vs combined processing. Bioresour. Technol. 249, 835–843.

[5] ชัชนันท์ นิวาสวงษ์ และเฉลิมเรืองวิริยะชัย. 2555 “การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย”.วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 40(4): 1073-1088.

[6] Anonymous, 1999, Technical Association of the Pulp and Paper Industry: Sampling and Preparing Wood for Analysis Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI Standard T203 om-88, Atlanta, USA.

[7] Anonymous, 2002, Technical Association of the Pulp and Paper Industry: Sampling and Preparing Wood for analysis Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI Standard T222 om-02, Atlanta, USA.

[8] Bonfiglio, F., Cagno, M., Yamakawa, C.K., Mussatto, S.I., 2021. Production of xylitol and carotenoids from switchgrass and Eucalyptus globulus hydrolysates obtainded by intensified steam explosion pretreatment. Bioresour. Technol. 170, 113800

[9] Kim, I., and Han, J.I. 2012. Optimization of alkaline pretreatment conditions for enhancing glucose yield of rice straw by response surface methodology. Biomass Bioenergy, 46: 210-217.

[10] สิริภาจันทรชาติ. (2553). สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำตาลจากกระดาษด้วยเซลลูเลสโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ. ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.

[11] Sanchez, G., Pilcher, L., Roslander, C., Modig, T.,Galbe, M. and Liden, G. 2004. Dilute-acid hydrolysis for fermentation of the Bolivian straw material Paja Brava. Bioresource Technology. 93(3): 249-256.

[12] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. and Li, Y., 2014, Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Prog. Energ. Comb. Sci. 24: 35-53.