

การปรับสภาพผักตบชวาและจอกด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับต่าง
และกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์เพื่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์
MICROWAVE-ASSISTED ALKALI PRETREATMENT OF WATER HYACINTH (*Eichhornia*
crassipes (Mart.) Solms) AND WATER LETTUCE (*Pistia stratiotes* L.) AND ITS
ENZYMATIC HYDROLYSIS FOR REDUCING SUGAR PRODUCTION

17

เวสารัช สุนทรชัยบูรณ์*

ดร.รัชพล พะวงศรีรัตน์**

บทคัดย่อ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพผักตบชวาและจอกด้วยไมโครเวฟร่วมกับต่าง และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมไฮโดรไลซิสตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแล้วโดยใช้เอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยทำการเก็บตัวอย่างผักตบชวาและจอก (เฉพาะส่วนของใบ) ล้าง อบแห้งและลดขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินคิดเป็นร้อยละ 75.25 ± 2.21 20.05 ± 1.70 และ 3.07 ± 0.40 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ตัวอย่างถูกปรับสภาพโดยใช้วิธีทางกายภาพ (คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ 360 600 800 วัตต์) ร่วมกับทางเคมี (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 (น้ำหนัก/ปริมาตร)) เพื่อให้โครงสร้างภายในเหมาะสมต่อการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ พบว่ากำลังไฟและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมีผลในทางลบต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและน้ำหนักของตัวอย่าง เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณเซลลูโลสพบว่าตัวอย่างเริ่มต้นให้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุด (75.25 ± 2.21 ของน้ำหนักแห้ง) แตกต่างจากวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับขั้นตอนการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยการย่อยด้วยเอนไซม์คือ การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (ที่ความเข้มข้น 1000 ยูนิตต่อกรัมซัสเตรท) ได้แก่ 1) เซลลูเลส (C) 2) ไซลานเนส (X) 3) เซลลูเลสร่วมกับไซลานเนส (X+C) และ 4) ไซลานเนสตามด้วยเซลลูเลส (X/C) พบว่า ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการไฮโดรไลซิสด้วย C ที่เวลา 48 ชั่วโมง ให้ผลผลิตน้ำตาลสูงสุดคิดเป็น 0.24 ± 0.03 กรัมต่อกรัมซัสเตรท และเหลือองค์ประกอบเซลลูโลสเพียงร้อยละ 47.63 ± 0.37 ของน้ำหนักแห้ง

ABSTRACT

Microwave-assisted alkali pretreatment and its enzymatic saccharification of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.)) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) were investigated. The water hyacinth leaves and water lettuce were collected and then washed, dried and reduced size to 1-2 mm. The main components of sample including cellulose, hemicellulose and lignin were $75.25 \pm 2.21\%$ $20.05 \pm 1.70\%$ and $3.07 \pm 0.40\%$ of dry weight, respectively. The combination of pretreatment by using physical method (microwave power 360, 600 and 800 Watt) with chemical method (alkali solution as 1% w/v sodium hydroxide) were studied. The results revealed

* นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

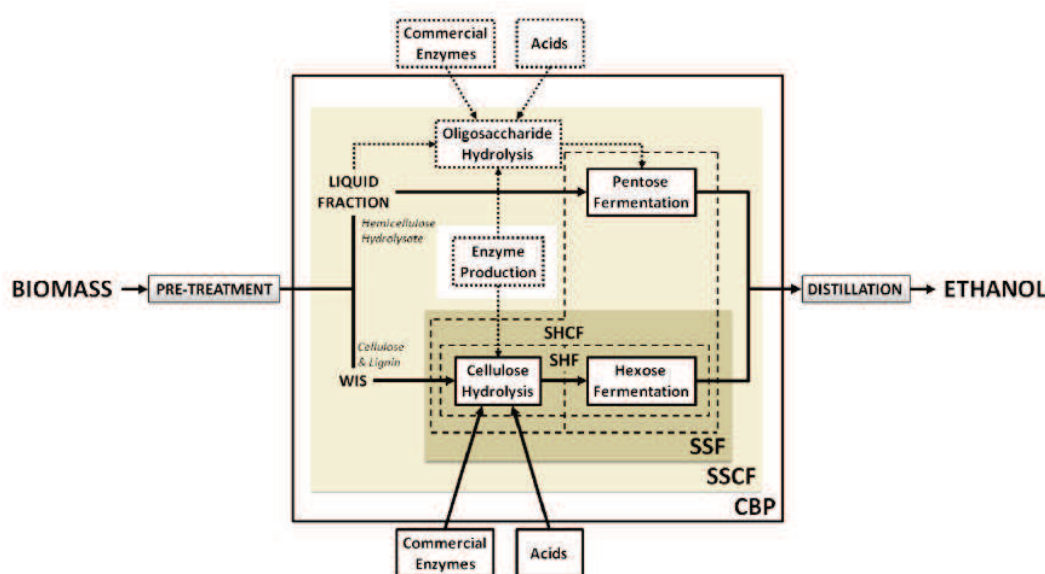
** คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

that an increase of microwave power and reaction time as the chemical composition was decreased and weight loss was increased with statistically significant ($p < 0.05$). From these results, the non-pretreated sample was selected due to containing high cellulose content. For the reducing sugar production, the enzymatic hydrolysis at the same concentration (1000 Unit/g substrate) with four different methods 1) cellulase (C) 2) xylanase (X) 3) cellulase together with xylanase (X+C) and 4) xylanase followed by cellulase (X/C) were studied. The results showed that the reducing sugar content was significantly affected by each method ($p < 0.05$). The highest reducing sugar content was obtained at 0.24 ± 0.03 g/g substrate at 48 hours by hydrolysis with cellulase and the remaining cellulose content was $47.63 \pm 0.37\%$ of dry weight.

ภูมิหลัง

เนื่องจากในปัจจุบันน้ำมันยังคงเป็นแหล่งพลังงานหลักของโลก ซึ่งมักจะประสบปัญหาด้านราคา ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากกลุ่มประเทศโอเปค (OPEC) ทุกครั้งที่เกิดวิกฤตการณ์น้ำมัน ประเทศไทยจะได้รับผลกระทบทางเศรษฐกิจตามมาด้วยปัญหาต่างๆ อีกมาก การใช้เอทานอลเป็นส่วนผสมเชื้อเพลิงในรถยนต์เป็นอีกหนทางหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อแก้ปัญหาด้านพลังงาน (Hu และคณะ. 2008) การผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมเพื่อนำเอทานอลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันได้รับความสนใจมากขึ้น โดยมีการศึกษาการลดต้นทุนในการผลิต การพัฒนากระบวนการหมักและการเลือกวัตถุดิบที่มีราคาถูก เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรพวกกลีโคเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด เป็นต้น (Howard และคณะ. 2003) หลังจากวิกฤตการณ์น้ำมันในช่วงสงครามตะวันออกกลางสิ้นสุดลง ความสนใจในการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากราคาน้ำมันตามปกติมีราคาถูกกว่าน้ำมันที่มีส่วนผสมของเอทานอล อันเนื่องมาจากต้นทุนการผลิตเอทานอลยังสูงอยู่ ต่อมาเมื่อประเทศไทยประสบปัญหาค่าเงินบาทในปี พ.ศ. 2543 และประเทศผู้ผลิตน้ำมันเป็นสินค้าส่งออกได้ร่วมมือกันลดกำลังการผลิตน้ำมัน ทำให้ราคาน้ำมันในตลาดโลกสูงขึ้น อีกทั้งท่ามกลางวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันที่แพงและไม่คงที่ รวมทั้งการคาดการณ์ว่าในอีกไม่ถึง 70 ปีข้างหน้าโลกจะต้องเผชิญกับภาวะขาดแคลนน้ำมัน จึงทำให้หลายๆ ประเทศพยายามที่จะหาแหล่งพลังงานทดแทนอื่น โดยเฉพาะแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด

เอทานอลเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ส่งผลให้การผลิตเอทานอลเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้รับความสนใจอีกครั้ง ประกอบกับวัตถุดิบที่สามารถหาได้จากการเกษตรกรรมในประเทศไทยมีอยู่มากมาย ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีวัตถุดิบประเภทที่จะนำมาใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์อยู่จำนวนมากและมีราคาถูก เช่น อ้อย มันสำปะหลัง รวมทั้งมันประเภทต่างๆ วัตถุดิบนี้มีน้ำตาลหรือแบ่งเป็นส่วนประกอบในปริมาณมากซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วได้มาจากวัสดุเศษเหลือจากการเกษตรทั้งสิ้น นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาพวกวัชพืชน้ำที่ขึ้นตามแหล่งน้ำมาใช้ประโยชน์ โดยที่น่าน้ำใจซึ่งมีปริมาณมากเช่น ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) และจอก (*Pistia stratiotes* L.) พืชทั้งสองชนิดได้ถูกกล่าวว่าเป็นวัชพืชน้ำที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ (Epstein. 1998) ซึ่งได้มีการคิดค้นวิธีการป้องกัน แต่ที่ยังไม่มีวิธีการที่สามารถป้องกันได้อย่างเต็มที่ การเสาะแสวงหาพลังงานจากแหล่งอื่นจึงเป็นเรื่องที่จำเป็น ผักตบชวาและจอกจัดได้ว่าเป็นพืชมีประสิทธิภาพดีเยี่ยมในการสะสมพลังงานจากดวงอาทิตย์ ทั้งนี้เพราะมีโครงสร้างที่เหมาะสมอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำและอาหารธาตุบริบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยซึ่งมีอุณหภูมิเหมาะต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวาและจอกตลอดปี การที่ผักตบชวาและจอกเป็นพืชที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีการนำผักตบชวา และจอกมาใช้ผลิตเอทานอลเพื่อเป็นการลดต้นทุนและเป็นการกำจัดวัชพืชน้ำจำพวกนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย



ภาพประกอบ 1 กระบวนการผลิตเอทานอล

ที่มา : F.M. Girio และคณะ (2010)

ในการผลิตเอทานอลนั้นวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเอทานอลจำเป็นต้องมีการปรับสภาพ(pretreatment) เพื่อกำจัดลิกนินออกก่อน ซึ่งในกระบวนการหมักเอทานอลนั้นลิกนินจะเป็นตัวขัดขวางกระบวนการหมักให้เป็นไปได้ช้าและได้ปริมาณเอทานอลลดลง ก่อนที่จะนำไปสู่ขั้นตอนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสม เพื่อการผลิตเอทานอล (ภาพที่ 1) ซึ่งกระบวนการปรับสภาพสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น วิธีการทางกายภาพ วิธีการทางเคมี วิธีการทางชีวภาพ หรือการร่วมกันในวิธีการดังกล่าวข้างต้น (K. Parveen และคณะ, 2009) โดยปกติในกระบวนการปรับสภาพนั้นนิยมใช้สารละลายเคมีโดยเฉพาะสารละลายด่างร้อนมาใช้ในการกำจัดสารประกอบลิกนิน ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะมีการใช้สารเคมีในปริมาณมาก และความร้อนสูงเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสูญเสียผลผลิต และยังทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นพิษต่อขบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์อย่างมาก ดังนั้นการใช้คลื่นไมโครเวฟจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อน ง่ายต่อการควบคุม ลดขนาดของเครื่องมือในการผลิต และปริมาณเศษเหลือทิ้งได้ (T.H.S. Rodrigues และคณะ. 2011)

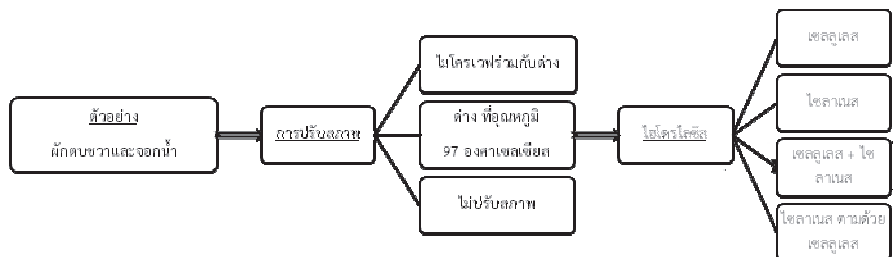
งานวิจัยครั้งนี้จึงได้ศึกษาการใช้ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) และจอก (*Pistia stratiotes* L.) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นโดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) และจอก (*Pistia stratiotes* L.) โดยการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับด่าง และศึกษากระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ อีกทั้งยังเป็นการกำจัดผักตบชวาและจอกได้อย่างมีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาและจอกโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับด่าง
2. เพื่อศึกษากระบวนการในการเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาลโดยการใชเอนไซม์เซลลูเลสและไซลาลเนส

กรอบแนวคิดในการวิจัย

1. ตัวอย่างวัตถุดิบเตรียมจากผักตบชวาและจอก ซึ่งเป็นวัชพืชน้ำที่ขึ้นตามแหล่งน้ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์
2. เปรียบเทียบการปรับสภาพสำหรับการทำให้เป็นน้ำตาลโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับต่าง ใช้ค่าที่อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส และไม่ปรับสภาพ
3. การศึกษาการย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์



ภาพประกอบ 2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

วิธีดำเนินการ

1. การเตรียมวัสดุเริ่มต้น

วัตถุดิบ ผักตบชวา และจอก เก็บตัวอย่างจากสระน้ำบริเวณหน้ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตัดให้เป็นชิ้นขนาด 1-2 เซนติเมตร ล้างทำความสะอาด แล้วผึ่งแดดให้แห้ง จากนั้นชั่งน้ำหนัก แบ่งตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีเริ่มต้น และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น

เอนไซม์เซลลูเลสและไซลานอสทางการค้า ACCELLERASE 1500 จากบริษัท ACCELLERASE FUELING THE BIOBASED ECONOMY, ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. การปรับสภาพด้วยต่าง

นำผักตบชวาและจอก ตัดให้ได้ขนาด 1-2 เซนติเมตร ผสมกันในอัตราส่วน 1ต่อ1 จำนวน 20 กรัม เติมน้ำตาลละลาย 1% w/v NaOH แล้วให้ต้มให้เดือดในเวลาต่างๆกัน (15-60 นาที) หลังจากนั้นนำตัวอย่างล้างด้วยน้ำจนได้ค่าพีเอชที่เป็นกลาง นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นตัวอย่างจะถูกลดขนาด (10-20 mesh) แล้วแบ่งตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี และนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสในการทดลองขั้นต่อไป

3. การปรับสภาพผักตบชวากับไมโครเวฟร่วมกับต่าง (ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Zhu และคณะ (2006))

เครื่องไมโครเวฟ รุ่น WD700 (MG-5062 T) ยี่ห้อ LG ผลิตโดยบริษัท LG electronics Co., Ltd. โดยใช้กำลังไฟระหว่าง 300-800W นำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้ง จำนวน 20 กรัม เติมน้ำตาลละลาย 1% โซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปใส่ในไมโครเวฟที่ กำลังไฟต่างๆกัน (300-800W) ทำการปรับสภาพที่เวลาต่างๆกัน (15-60 นาที) หลังจากนั้นนำตัวอย่างล้างด้วยน้ำจนได้ค่าพีเอชที่เป็นกลาง นำไปอบแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักที่ได้ จากนั้นตัวอย่างจะถูกลดขนาด (10-20 mesh) แล้วแบ่งตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี และนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสในการทดลองขั้นต่อไป

4. กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์

ทำการไฮโดรไลซิสตัวอย่าง โดยส่วนผสมประกอบด้วย ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว 2 กรัม เติมน้ำละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ (พีเอช 4.8) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และเติมเอนไซม์ทางการค้า (1000 ยูนิต/กรัมซับสเตรท) แบ่งออกเป็น 4 วิธี

4.1 เติมเอนไซม์เซลลูเลส ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

4.2 เติมเอนไซม์ไซลาลเนส ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

4.3 เติมเอนไซม์เซลลูเลส ปริมาตร 5 มิลลิลิตร พร้อมกับเอนไซม์ไซลาลเนส ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

4.4 เติมเอนไซม์ไซลาลเนส ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วเติมเอนไซม์เซลลูเลส ปริมาตร 5 มิลลิลิตร

เก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสทันที เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเพื่อหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์ ที่ความเร็วรอบ 8000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที นำส่วนใสขึ้นบนไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาล เก็บตัวอย่างทุกๆ 12 ชั่วโมง จนกระทั่งปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์คงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลง เก็บตัวอย่างที่เหลือ ล้างให้สะอาด อบแห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมี

5. การวิเคราะห์

นำตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแล้วทั้งสองวิธีไปทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามวิธีของ Goering และ Van (1970) จากนั้นนำตัวอย่างที่ปรับสภาพและนำไปย่อยแล้วมาวิเคราะห์ปริมาณของน้ำตาลที่เกิดขึ้นโดยวิธี Dinitrosalicylic colorimetric method (DNS) ของ Miller (1959)

6. การวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติ

ขั้นตอนในการทำวิจัยและผลการทดลองจากการวิจัยจัดทำทั้งหมด 3 ข้อ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95.0เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$)

ผลการทดลอง

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาและจอก

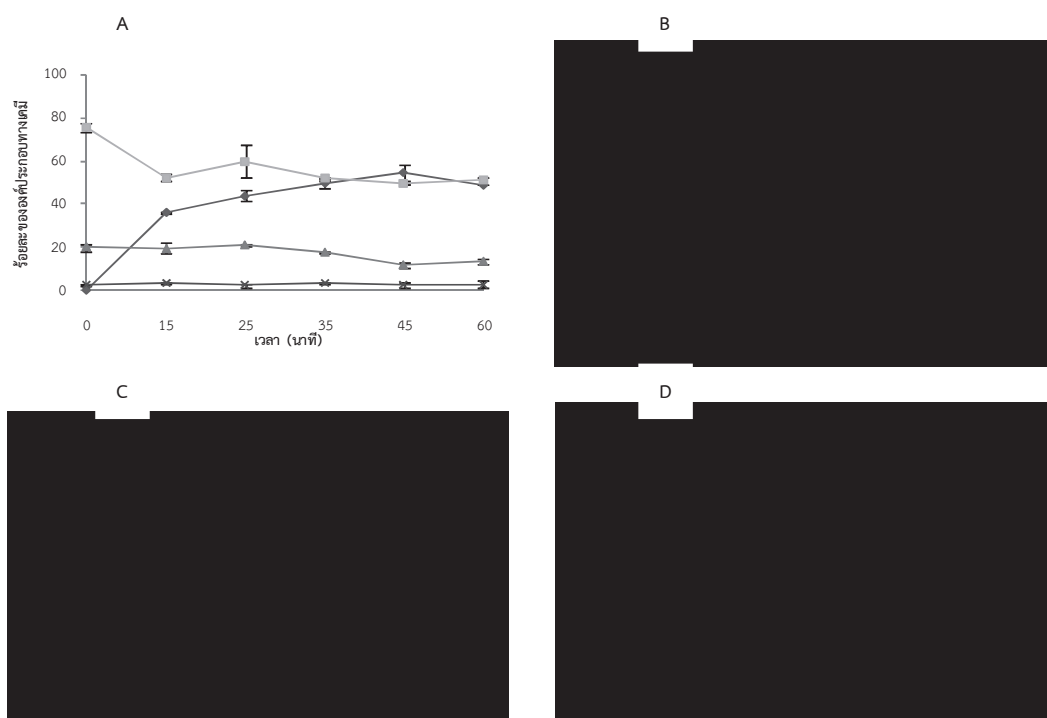
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาและจอกที่ทำการเก็บมาจากคลองมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน ทำความสะอาดทำให้แห้งบดลดขนาด (ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร) อัตราส่วนระหว่างผักตบชวาต่อจอก 1:1 น้ำหนักต่อน้ำหนักและนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อหาปริมาณเส้นใยภายในโครงสร้าง ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จากตารางที่ 3 พบว่าตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด รองลงมาคือ เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 75.25 20.05 และ 3.70 ของน้ำหนักแห้งตามลำดับ ในทำนองเดียวกันจากการศึกษาของ วิทวัส (2554) พบว่า ผักตบชวาส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 24.37 19.82 และ 25.33 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Nigam (2002) พบว่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาที่มีปริมาณมากที่สุดคือ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส คิดเป็นร้อยละ 48.70 รองลงมาคือสารประกอบอื่นๆ ปริมาณเซลลูโลส และปริมาณลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 29.60 18.20 และ 3.50 ของน้ำหนักเปียกตามลำดับ ซึ่งปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสภาพแวดล้อมและสถานที่เก็บตัวอย่างซึ่งพืชจะมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมนั้นจึงทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันซึ่งหากเก็บในสถานที่เดียวกันก็มีความเป็นไปได้สูงที่จะมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน

ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาและจอก (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละของน้ำหนักแห้ง
เซลลูโลส	75.25±2.21
เฮมิเซลลูโลส	20.05±1.70
ลิกนิน	3.70±0.40

2. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพผักตบชวาและจอกด้วยไมโครเวฟร่วมกับต่าง

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพผักตบชวาและจอกด้วยไมโครเวฟร่วมกับต่าง โดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟต่างๆ กันคือ 360, 600, และ 800 วัตต์ ร่วมกับสารละลายต่าง (1% w/v NaOH) เปรียบเทียบกับการปรับสภาพด้วย 1% w/v NaOH ที่อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี และน้ำหนักของตัวอย่างที่หายไป



ภาพประกอบ 3 องค์ประกอบทางเคมีหลังการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ A) 360 วัตต์ B) 600 วัตต์ C) 800 วัตต์ และ D) อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส ร่วมกับสารละลายต่าง 1% w/v NaOH ที่เวลาต่างๆกัน; ◆ แทน เซลลูโลส, ▲ แทน เฮมิเซลลูโลส, ✕ แทน ลิกนิน

จากภาพประกอบที่ 3A-3C การปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับกำลังไฟ 360, 600 และ 800 วัตต์ ร่วมกับ 1% w/v NaOH พบว่ากำลังไฟที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนักตัวอย่างที่หายไปเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงตามไปด้วย เมื่อพิจารณา กำลังไฟเท่ากันพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนักตัวอย่างที่หายไปเพิ่มขึ้น ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงจนถึง ระยะเวลาหนึ่งและเริ่มคงที่ โดยที่เวลาแตกต่างกัน ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตาราง 2) การปรับสภาพผักตบชวาและจอกขึ้นต้น เพื่อแยกส่วนประกอบอื่นออกและช่วยปรับโครงสร้างของเซลลูโลสให้อยู่ ในสภาพที่เหมาะสมต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ในขั้นตอนถัดไป ซึ่งการปรับสภาพโดยใช้สารละลายต่างพบว่าเป็นการกำจัดเฮมิ เซลลูโลสออกจากโครงสร้างเพราะเฮมิเซลลูโลสสามารถละลายในสารละลายต่างได้ดีกว่าเซลลูโลสและยังทำให้เกิดการบวมของ โครงสร้างซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการย่อยเนื่องจากเอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น หลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้า กระแทกกับวัตถุ คลื่นทำให้โมเลกุลหรืออนุภาคที่มีประจุ เช่น น้ำที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบในโมเลกุล หรือไอออนของเกลือที่มีประจุ บวกหรือประจุลบ เกิดการสั่นสะเทือน ทำให้โมเลกุลเกิดการเสียดสีกัน เกิดเป็นความร้อนจึงทำให้อนุภาคของวัตถุที่จับตัวกันอย่าง หนาแน่นแตกออกอย่างรวดเร็ว เมื่อคลื่นไมโครเวฟถ่ายเทพลังงานให้อนุภาคที่มีประจุหมดแล้วก็จะสลายตัวไปและไม่สะสมอยู่ในวัตถุ จึงไม่เป็นอันตรายต่อวัตถุและผู้ใช้งาน แต่ต้องประกอบทางเคมีของผักตบชวาและจอกที่นำใช้ศึกษาที่มีองค์ประกอบโครงสร้างที่ ซับซ้อนเช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนินอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก การปรับสภาพที่นานเกินไป ส่งผลให้ตัวอย่างได้รับความร้อนมากเกินไป จนโครงสร้างองค์ประกอบภายในเกิดความเสียหาย จึงมีผลต่อปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ลดลง ดังนั้นวิธีการปรับสภาพ ด้วยไมโครเวฟร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และการปรับสภาพด้วยต่างเพียงอย่างเดียวจึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมในการปรับสภาพ ผักตบชวาและจอกในครั้งนี้

การปรับสภาพที่อุณหภูมิคงที่ 97 องศาเซลเซียสด้วย 1% w/v NaOH (ภาพที่ 3D) พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนัก ของตัวอย่างที่หายไปเพิ่มขึ้น ปริมาณเซลลูโลสลดลง ส่วนปริมาณเฮมิเซลลูโลสคงที่ในช่วงระยะเวลาแรกที่ 0-45 นาที และเพิ่มขึ้นในใน ระยะเวลาต่อมาจนถึงเวลาหนึ่งจึงเริ่มคงที่และยังสามารถจำกัดปริมาณลิกนินออกได้บางส่วนที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ($p > 0.05$)

การปรับสภาพผักตบชวาและจอกด้วยไมโครเวฟร่วมกับ 1% w/v NaOH ที่ดีที่สุดคือ การปรับสภาพที่ กำลังไฟ 360 วัตต์ เป็นเวลา 25 นาที ส่งผลให้ได้ปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด รองลงมาคือเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 59.98 ± 7.57 26.92 ± 7.56 และ 2.70 ± 0.93 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และการปรับสภาพด้วย 1% w/v NaOH ที่อุณหภูมิคงที่ 97 องศา เซลเซียส สภาวะที่ดีที่สุดคือ ที่เวลา 35 นาที ซึ่งให้ปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด รองลงมาคือเฮมิเซลลูโลสและลิกนินคิดเป็นร้อยละ 59.02 ± 1.74 23.52 ± 4.30 และ 1.37 ± 0.11 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ชุดควบคุมให้ปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินร้อยละ 75.25 ± 2.21 20.05 ± 1.70 และ 3.07 ± 0.40 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตาราง 2) ดังนั้น วิธีการที่ดีที่สุดคือวิธีการไม่ปรับสภาพหรือชุดควบคุมที่มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดร้อยละ 75.25 ± 2.21 ของน้ำหนักแห้ง

ตาราง 2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาและจอกหลังผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการต่างๆ

ลำดับ	วิธีการ	กำลังไฟ (วัตต์)	เวลา (นาทีก)	องค์ประกอบทางเคมี		
				เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
1	ก	-	-	75.25±2.21 ^a	20.05±1.70 ^{cde}	3.07±0.40 ^{abcd}
2	ข	360	15	52.55±1.60 ^{ef}	19.86±2.30 ^{cde}	3.65±0.76 ^{ab}
3	ข	360	25	59.98±7.57 ^{bcd}	26.92±7.56 ^{bc}	2.70±0.93 ^{abcdef}
4	ข	360	35	52.11±0.62 ^f	17.78±0.35 ^{de}	3.79±0.46 ^a
5	ข	360	45	49.71±0.15 ^f	11.82±1.35 ^e	3.08±1.22 ^{abcd}
6	ข	360	60	51.24±1.69 ^f	13.59±1.22 ^e	3.23±1.53 ^{abc}
7	ข	600	15	60.13±7.13 ^{bcd}	23.57±5.49 ^{cd}	2.24±0.86 ^{abcdefg}
8	ข	600	25	63.66±1.66 ^b	34.33±0.36 ^{ab}	2.01±0.54 ^{abcdefg}
9	ข	600	35	54.07±0.47 ^{cdef}	16.51±0.43 ^{de}	2.59±0.77 ^{abcdefg}
10	ข	600	45	52.66±1.74 ^{ef}	17.55±1.29 ^{de}	2.34±0.67 ^{abcdefg}
11	ข	600	60	49.37±0.48 ^f	16.74±0.88 ^{de}	2.19±0.47 ^{abcdefg}
12	ข	800	10	47.66±1.99 ^f	17.29±1.68 ^{de}	1.31±0.19 ^{defg}
13	ข	800	15	51.90±2.23 ^f	17.51±1.19 ^{de}	1.27±0.30 ^{defg}
14	ข	800	25	50.28±2.04 ^f	16.12±1.75 ^{de}	2.85±0.87 ^{abcdef}
15	ข	800	35	49.94±1.77 ^f	16.08±1.46 ^{de}	3.39±0.97 ^{abc}
16	ค	-	25	53.51±0.74 ^{def}	20.05±0.76 ^{cde}	2.07±1.09 ^{abcdefg}
17	ค	-	35	59.02±1.74 ^{bcde}	23.52±4.30 ^{cd}	1.37±0.11 ^{defg}
18	ค	-	45	53.69±1.01 ^{cdef}	19.63±0.52 ^{cde}	1.85±1.05 ^{bcdefg}
19	ค	-	55	62.68±1.29 ^b	36.11±5.22 ^a	1.21±0.03 ^{ef}
20	ค	-	70	64.28±5.73 ^b	34.02±5.66 ^{ab}	1.21±0.09 ^{cdefg}
21	ค	-	85	61.76±1.31 ^b	37.04±5.54 ^a	1.20±0.16 ^{ef}
22	ค	-	100	60.42±1.78 ^{bc}	38.72±5.98 ^a	0.86±0.44 ^f

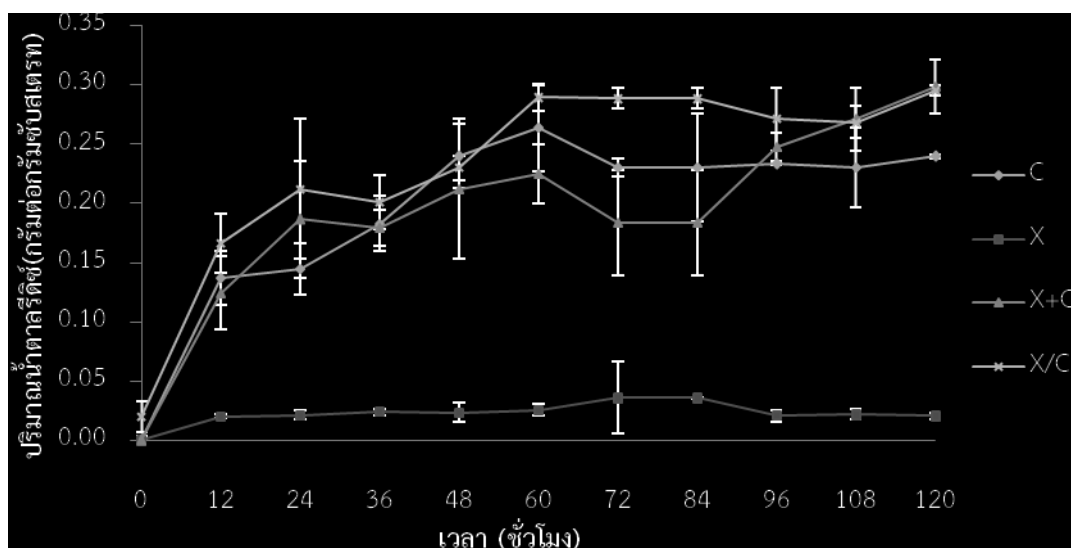
*หมายเหตุ : ก : ชุดควบคุม; ข : ปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับ 1% w/v NaOH; ค : ปรับสภาพด้วย 1% w/v NaOH ที่อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส

ตัวอักษรที่กำกับในแนวตั้งที่ต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95.0% (p<0.05)

3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการไฮโดรไลซิสผักตบชวาและจอกโดยใช้เอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

เนื่องจากผักตบชวาและจอกเป็นวัสดุชนิดลิกโนเซลลูโลสมีองค์ประกอบของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เพราะฉะนั้นต้องใช้เอนไซม์ในการย่อยที่แตกต่างกัน องค์ประกอบพวกเซลลูโลสจะมีโครงสร้างที่เป็นกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic ในการย่อยสลายเซลลูโลสจึงต้องใช้เอนไซม์กลุ่มเซลลูเลส (Nigam, 1999) ซึ่งถ้าหากการย่อยเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้น้ำตาลกลูโคส แต่ถ้าการย่อยเกิดไม่สมบูรณ์จะเกิดทั้งกลูโคส เซลโลไบโอส และโอลิโกแซคคาไรด์ ส่วนการย่อยเฮมิเซลลูโลส โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขา และประกอบด้วยโพลิเมอร์ของน้ำตาลหลายชนิดด้วยกัน เช่นไซโลส เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เอนไซม์ที่จำเพาะเพื่อที่จะย่อยสลาย ซึ่งองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสคือ ไซแลน จึงต้องใช้เอนไซม์กลุ่มไซแลเนสในการย่อยเฮมิเซลลูโลส

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกศึกษาการย่อยทางชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการย่อยผักตบชวาและจอกด้วยโดยใช้เอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยผ่านกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (C), เอนไซม์ไซแลเนส (X), การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับเอนไซม์ไซแลเนส (X+C) และการใช้เอนไซม์ไซแลเนสแล้วตามด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (X/C) ทำการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เมื่อเวลาผ่านไปทุกๆ 12 ชั่วโมง พบว่า ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 12-24 ชั่วโมง และสูงสุดที่เวลาประมาณ 60 ชั่วโมง (ภาพที่ 4) เมื่อสิ้นสุดการทดลองการย่อยด้วยวิธี C, X, X+C และ X/C ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์คือ 0.24 ± 0.00 0.02 ± 0.00 0.30 ± 0.02 และ 0.30 ± 0.00 กรัมต่อกรัมขี้สเตรท ตามลำดับ (ตาราง 3) การย่อยด้วยวิธี X+C และ X/C ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) รองลงมาคือวิธี C ส่วนวิธี X ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณที่น้อยมากต่างจากวิธีอื่น (ตาราง 4)



ภาพประกอบ 4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หลังผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (1000 หน่วย/กรัมขี้สเตรท) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส pH 4.8 และความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ทุกๆ 12 ชั่วโมง โดยกำหนดให้ เอนไซม์เซลลูเลส (C), เอนไซม์ไซแลเนส (X), การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับเอนไซม์ไซแลเนส (X+C) และการใช้เอนไซม์ไซแลเนสแล้วตามด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (X/C)

ตาราง 3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หลังผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อกรัมซบสเตรท)			
	C	X	X+C	X/C
0	0.00±0.00 ^d	0.00±0.00 ^b	0.00±0.00 ^e	0.02±0.01 ^e
12	0.14±0.02 ^c	0.02±0.00 ^{ab}	0.12±0.03 ^d	0.17±0.02 ^d
24	0.14±0.02 ^c	0.02±0.00 ^{ab}	0.19±0.05 ^{cd}	0.21±0.06 ^{cd}
36	0.18±0.02 ^{bc}	0.02±0.00 ^{ab}	0.18±0.02 ^{cd}	0.20±0.02 ^{bc}
48	0.24±0.03 ^a	0.02±0.01 ^{ab}	0.21±0.06 ^{bc}	0.23±0.01 ^{bc}
60	0.26±0.04 ^a	0.03±0.00 ^{ab}	0.22±0.03 ^{abc}	0.29±0.01 ^a
72	0.23±0.00 ^{ab}	0.04±0.30 ^a	0.18±0.04 ^{cd}	0.29±0.01 ^a
84	0.23±0.05 ^{ab}	0.04±0.00 ^a	0.18±0.04 ^{cd}	0.29±0.01 ^a
96	0.23±0.00 ^{ab}	0.02±0.01 ^{ab}	0.25±0.01 ^{abc}	0.27±0.03 ^{ab}
108	0.23±0.03 ^{ab}	0.02±0.00 ^{ab}	0.27±0.03 ^{ab}	0.27±0.01 ^{ab}
120	0.24±0.00 ^a	0.02±0.00 ^{ab}	0.30±0.02 ^a	0.30±0.00 ^a

หมายเหตุ : กำหนดให้ เอนไซม์เซลลูเลส (C), เอนไซม์ไคลาเนส (X), การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับเอนไซม์ไคลาเนส (X+C) และการใช้เอนไซม์ไคลาเนสแล้วตามด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (X/C)

ตัวอักษรที่กำกับในแนวนอนที่ต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95.0% ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาวิธี X+C เป็นวิธีที่ใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายร่วมกัน 2 ชนิด คือ เอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์ไคลาเนส จึงสามารถย่อยสลายได้ทั้งส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณมากกว่าวิธีอื่น เช่นเดียวกับวิธี X/C ที่ใช้เอนไซม์สองชนิดร่วมกัน โดยใส่เอนไซม์ไคลาเนสก่อนใส่เอนไซม์เซลลูเลสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ไม่แตกต่างกันทางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทำให้ทราบว่า วิธี X/C การใช้เอนไซม์ไคลาเนสก่อนใส่เอนไซม์เซลลูเลสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ไม่แตกต่างกับวิธี X+C

โดยวิธี X พบว่าให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ 0.02±0.00 กรัมต่อกรัมซบสเตรท ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น และใช้เซลลูโลสไปเพียงร้อยละ 31.35 วิธี X เป็นวิธีการใช้เอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อการย่อยสลายไซแลนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลส จึงไม่สามารถย่อยสลายในส่วนของเซลลูโลส และเนื่องจากองค์ประกอบของตัวอย่างมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสอยู่ในปริมาณน้อยจึงทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ออกมาในปริมาณน้อย

พิจารณาผลของการย่อยด้วยวิธี C พบว่า เมื่อเปรียบเทียบการย่อยด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 48 กับ 120 ชั่วโมง โดยให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ 0.24±0.03 และ 0.24±0.00 กรัมต่อกรัมซบสเตรท ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของเอนไซม์ที่ให้ผลผลิตน้ำตาลสูงที่สุด และคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยน้อยที่สุด เพื่อความคุ้มค่าของเอนไซม์ที่ใช้ในปริมาณน้อยเพียงแค่นิดเดียวและสามารถให้ผลผลิตสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกวิธี C ที่ใช้เวลาในการย่อย 48 ชั่วโมง จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการย่อยผักตบชวาและจอกในการศึกษาครั้งนี้มากที่สุด

ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาและจอกหลังผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

เอนไซม์	น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อกรัมซบสเตรท)	ร้อยละขององค์ประกอบของเซลลูโลส
ชุดควบคุม	-	75.25±2.21 ^a
C	0.24±0.00 ^b	47.63±0.37 ^c
X	0.02±0.00 ^c	51.66±3.24 ^b
X+C	0.30±0.02 ^a	52.23±2.68 ^b
X/C	0.30±0.00 ^a	52.49±0.52 ^b

หมายเหตุ : กำหนดให้ เอนไซม์เซลลูเลส (C), เอนไซม์ไซลาลเนส (X), การใช้เอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับเอนไซม์ไซลาลเนส (X+C) และการใช้เอนไซม์ไซลาลเนสแล้วตามด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (X/C)

ตัวอักษรที่กำกับในแนวตั้งที่ต่างกัน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95.0% ($p < 0.05$)

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อการผลิตเอทานอลจากผักตบชวาและจอกโดยศึกษาเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับ 1% w/v NaOH และการปรับสภาพด้วยต่างก่อนที่จะเข้าสู่การไฮโดรไลซิสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. องค์ประกอบของผักตบชวาและจอกส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ร้อยละ 75.25±2.21 20.05±1.70 และ 3.07±0.40 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ แต่ทั้งนี้องค์ประกอบที่เป็นโครงสร้างที่จับตัวกันอย่างหนาแน่นเช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งมีอยู่ในผักตบชวาและจอก จะทำให้เกิดการลดประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสภาพขั้นต้นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

2. จากผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวาและจอกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และวิธีการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว ที่เวลาแตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุดและปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงสุดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเซลลูโลสสูงสุดและปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงสุดของวิธีการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และวิธีการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว กับวิธีการไม่ปรับสภาพหรือชุดควบคุม พบว่าวิธีการไม่ปรับสภาพหรือชุดควบคุมมีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 75.25±2.21 ของน้ำหนักแห้ง ดังนั้นจึงเลือกวิธีการไม่ปรับสภาพผักตบชวาและจอกเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

3. ผลการวิเคราะห์การย่อยผักตบชวาและจอกที่ไม่ผ่านการปรับสภาพหรือชุดควบคุมด้วยเอนไซม์ไซลาลเนส (C), การย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับไซลาลเนส (X+C) และการย่อยด้วยเอนไซม์ไซลาลเนสตามด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (X/C) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทุกๆ 12 ชั่วโมง พบว่าวิธี X ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น และการย่อยด้วยวิธี C, X+C และ X/C ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดของแต่ละวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อครบ 120 ชั่วโมงพบว่า วิธี C สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้มากที่สุดร้อยละ 47.63±0.37 ของน้ำหนักแห้ง และสามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 0.24±0.00 กรัมต่อกรัมซบสเตรท ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับวิธีอื่น

ข้อเสนอแนะ

1. การปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงเรื่อยๆ จนถึงเวลาหนึ่งจึงเริ่มคงที่ อาจเนื่องมาจากระยะเวลาในการปรับสภาพที่นานเกินไปอาจส่งผลให้ตัวอย่างได้รับความร้อนนานมากเกินไปจนโครงสร้างองค์ประกอบภายในเกิดความเสียหายจึงมีผลต่อปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ลดลงเมื่อได้รับการปรับสภาพที่นานขึ้น เพราะฉะนั้นวิธีการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และการปรับสภาพด้วยด่างเพียงอย่างเดียวจึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาและจอกในครั้งนี้

2. การไฮโดรไลซิสด้วยเซลลูเลสเพียงอย่างเดียว เป็นวิธีที่ใช้ปริมาณเอนไซม์น้อยกว่าวิธีอื่น นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่ประหยัดเวลามากกว่า ทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการย่อยผักตบชวาและจอกในการศึกษาครั้งนี้มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- วิฑูรย์ จิรัฐพงศ์. การศึกษาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืชเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ : กรุงเทพฯ, 2554.
- Epstein, P. "Nairobi Weeds bring disease to the east African waterways". *The Lancet*. 351 (9102) : 577 ; 1998.
- Girio, F. M., Fonseca, C., Carvalho, F., Duarte, L. C., Marques, S., Bogel-Lukasik, R. Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. *Bioresour Technol*. 101(13) : 4775-4800 ; 2010.
- Goering, H. K., and Van Soest, P. J. *Forage fiber analysis : Apparatus, reagents, procedures and some applications*. Agricultural Handbook 379. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture. iv, 20 pp. 1970.
- Howard, G. L., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, E. L., and Howard, S. "Lignocellulose biotechnology : Issues of bioconversion and enzyme production". *African Journal of Biotechnology*. 2 : 602-619 ; 2003.
- Hu, G., Heitmann, J. A., and Rojas, O. J. "Feedstock pretreatment strategies for producing ethanol from wood, bark, and forest residues". *BioResources*. 3(1) : 270-294; 2008.
- Miller, G. L. "Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar". *Analytical Chemistry*. 31 : 420-428 ; 1959.
- Nigam, J. N. "Production of ethanol from recycled paper sludge using cellulase and yeast, *Kluveromyces Marxianus*". *Biomass and Bioenergy*. 21 : 135-143 ; 1999.
- Nigam, J. N. "Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast". *Biotechnology*. S0168-1656(02)00013-5, 2002.
- Parveen, K., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., and Stroeve, P. "Method for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production". *Ind. Eng. Chem. Res*. 48 : 3713-3729 ; 2009.
- Rodrigues, T. H. S., Rocha M. V. P., and de Macedo, G. R. "Ethanol Production from Cashew Apple Bagasse : Improvement of Enzymatic Hydrolysis by Microwave Assisted Alkali Pretreatment". *Appl Biochem Biotechnol*. 164(6) : 929-943 ; 2011.
- SPSS. SPSS for window. Release 11.0.0 (19 Sept, 2001) standard version. (1989-2001), Cary, NC : SPSS Institute.
- Zhu S. et al. 2006. "Microwave-assisted Alkali Pre-treatment of Wheat Straw and its Enzymatic Hydrolysis". *Biosystems Engineering*. 94(3) : 437-442 ; 2006.