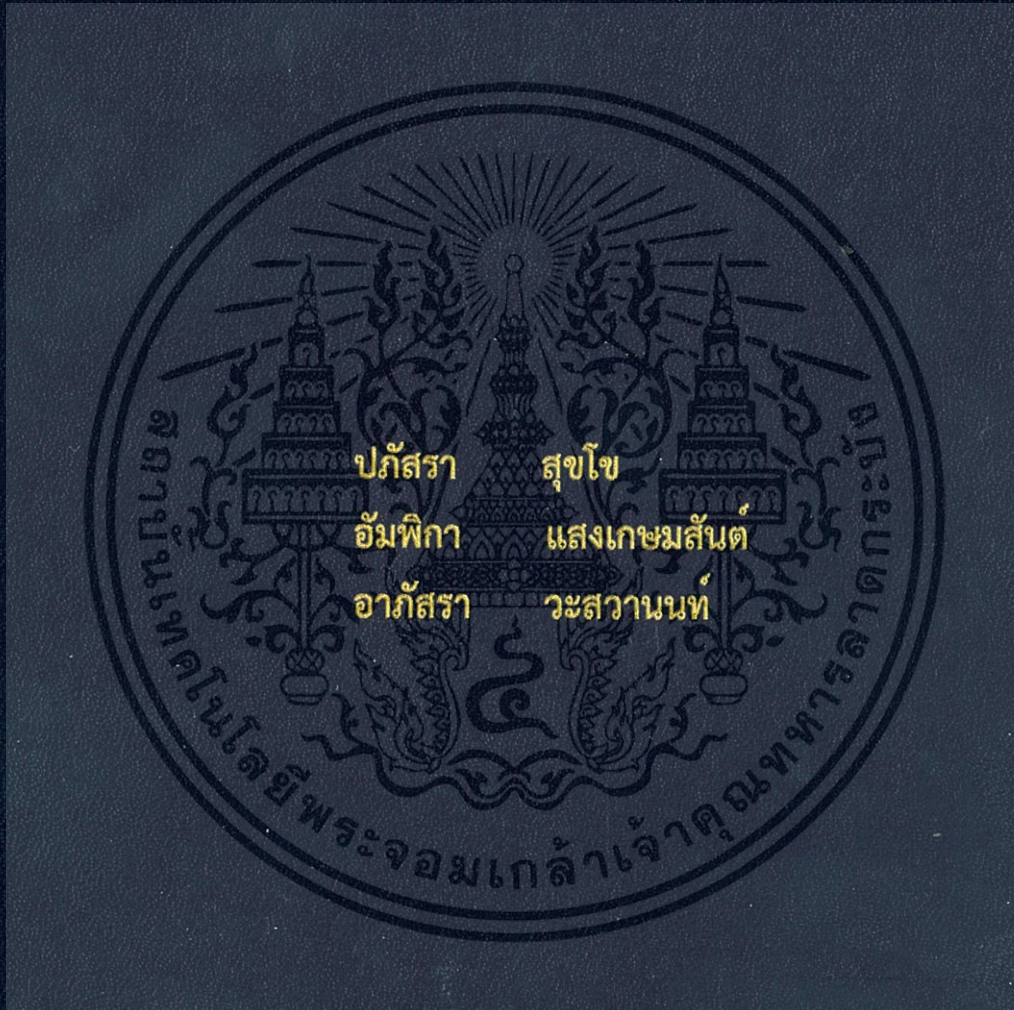


การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกาบมะพร้าวโดยกระบวนการไฮโดรไลซ์  
ด้วยกรดไฮโดรคลอริก

(Reducing sugar production from coconut mesocarp by  
hydrochloric acid hydrolysis)



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาชีววิทยา

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกาบมะพร้าวโดยกระบวนการไฮโดรไลซ์

ด้วยกรดไฮโดรคลอริก

(Reducing sugar production from coconut mesocarp by  
hydrochloric acid hydrolysis)



T149003



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 149003  
วัน,เดือน,ปี 1 ๐ S.A. 256๓

b. 12877426  
f. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาชีววิทยา

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REDUCING SUGAR PRODUCTION FROM COCONUT MESOCARP  
BY HYDROCHLORIC ACID HYDROLYSIS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN BIOLOGY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEARS 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกาบมะพร้าวโดยกระบวนการไฮโดรไลซ์  
ด้วยกรดไฮโดรคลอริก

Reducing sugar production from coconut mesocarp by  
hydrochloric acid hydrolysis

นักศึกษา นางสาวปภัสรา สุขโข รหัส 55051123  
นางสาวอัมพิกา แสงเกษมสันต์ รหัส 55051217  
นางสาวอาภัสรา วัฒนานนท์ รหัส 55051220

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. สุขใจ ชูจันทร์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา  
เทคโนโลยีชีวภาพ ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.สุทธิจิต ศรีวัชรกุล ประธานกรรมการ	สุทธิจิต ศรีวัชรกุล
ผศ.ลินจง สุขล่ำกู กรรมการ	ลินจง สุขล่ำกู
รศ.สุขใจ ชูจันทร์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	สุขใจ ชูจันทร์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตน้ำตาลรีตีวซ์จากกาบมะพร้าวโดยกระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภักสรุ สุโข รหัสนักศึกษา 55051123 นางสาวอัมพิกา แสงเกษมสันต์ รหัสนักศึกษา 55051217 นางสาวอาภัสรา วัฒนานนท์ รหัสนักศึกษา 55051220
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีชีวภาพ
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. สุขใจ ชูจันทร์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการย่อยกาบมะพร้าวแก่โดยการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำตาลรีตีวซ์ ในการศึกษาทำการปรับสภาพกาบมะพร้าวแก่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 4 ในอัตราส่วนกาบมะพร้าวแก่ 1 กรัมต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ ภายใต้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 60, 90 และ 120 นาที อัตราส่วนปริมาณกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1:10, 1:20 และ 1:30 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ตามลำดับ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลาร์ ภายใต้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 120 นาที อัตราส่วนปริมาณกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1:10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 47.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์สูงสุดเท่ากับ 22.59 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

**คำสำคัญ :** กาบมะพร้าวแก่ การปรับสภาพ การไฮโดรไลซ์ กรดไฮโดรคลอริก น้ำตาลรีตีวซ์ น้ำตาลทั้งหมด

Title	Reducing sugar production from coconut mesocarp by hydrochloric acid hydrolysis
Students	Miss Prapasara Sukkho Student ID 55051123 Miss Amphika Saengkasemsan Student ID 55051217 Miss Apatsara Wasawanon Student ID 55051220
Degree	Bachelor of Science
Programme	Biotechnology
Academic Year	2015
Advisor	Associate Professor Sukjai Choojun

### Abstract

The hydrolysis of coconut mesocarp to produce reducing sugar was optimum condition. In this work was pretreated with sodium hydroxide (NaOH) concentration of 4% (w/v), temperature of 70°C for 2 hours. Concentration of hydrochloric acid (HCl) 0.1, 0.2 and 0.4 Molar used for hydrolysis. Time and ratio of hydrolysis were 60, 90 and 120 minutes and 1:10, 1:20 and 1:30 (w/v), respectively. The optimal condition of hydrochloric acid hydrolysis was 0.2 Molar, Temperature of 121°C for 120 minutes and ratio 1:10 (w/v). Total sugar and reducing sugar content of coconut mesocarp hydrolysis were 47.00 mg/ml and 22.59 mg/ml, respectively.

**Keywords** : coconut mesocarp, pretreatment, hydrolysis, hydrochloric acid (HCl), reducing sugar, total sugar

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ได้จัดทำขึ้นตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.สุขใจ ชูจันทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมโครงการพิเศษ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาในระหว่างการค้นคว้างานวิจัย รวมทั้งกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สุทธิจิต ศรีวัชรกุล ประธานกรรมการ และ ผศ.ลินจง สุขล้ำ กรรมการ ที่ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมทั้งกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาตรี และโททุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา ตลอดจนผู้ที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ที่ได้มีส่วนช่วยให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

หากโครงการพิเศษฉบับนี้มีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง คณะผู้จัดทำขออ้อมรับไว้ทั้งหมด ส่วนคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้ที่มีพระคุณทุกท่าน

ปภัสรา สุขโช

อัมพิกา แสงเกษมสันต์

อาภัสรา วะสวานนท์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะพร้าว.....	3
2.1.1 มะพร้าว.....	3
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว.....	6
2.2 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส.....	7
2.3 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยมะพร้าว.....	8
2.3.1 เซลลูโลส.....	8
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส.....	8
2.3.3 ลิกนิน.....	9
2.4 การปรับสภาพวัตถุดิบ.....	10
2.4.1 วิธีทางกายภาพ.....	10
2.4.2 วิธีการทางชีวภาพ.....	11
2.4.3 วิธีการทางเคมี.....	11
2.4.4 วิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การย่อยหรือไฮโดรไลซิส.....	18
2.5.1 การไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมี.....	18
2.5.2 การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์.....	21
2.6 ผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์พลอยได้ของการไฮโดรไลซิส.....	22
2.6.1 น้ำตาล.....	23
2.6.2 5 - ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล.....	24
2.6.3 เฟอฟูรอล.....	25
2.6.4 สารประกอบฟีนอลิก.....	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก.....	53
ภาคผนวก ข.....	63
ภาคผนวก ค.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักจากการอบแห้ง)...	6
2.2 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	7
2.3 จุดเด่นและจุดด้อยของกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภท ลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน.....	15
2.4 ผลกระทบของกระบวนการปรับสภาพต่อองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของวัสดุ เหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส .....	17
2.5 ตารางการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการไฮโดรไลซิสด้วยกรด .....	20
3.1 แสดงการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสโดยวางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3.....	20
4.1 ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3 ของกาบมะพร้าวแก่.....	39
4.2 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3.....	39
4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีทางสถิติ.	40
4.4 ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3 ของกาบมะพร้าวแก่.....	41
4.5 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3.....	41
4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีทางสถิติ....	42
4.7 ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3 ของกาบมะพร้าวแก่.....	43
4.8 ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3 ของกาบมะพร้าวแก่.....	44

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลูกมะพร้าว .....	3
2.2 ส่วนประกอบของลูกมะพร้าว.....	4
2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส	7
2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า1,4-ไกลโคซิดิก .....	8
2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน .....	9
2.6 สูตรโครงสร้างของ (a) trans-coniferyl alcohol (b) trans-p-sinapyl alcohol และ (c) tran-p-coumaryl alcohol .....	9
2.7 สรุปรวมกรรมวิธีต่าง ๆ ในการ Pretreatment ชีวมวลลิกโนเซลลูโลส.....	18
2.8 การตัดพันธะของเซลลูโลสด้วยกรด.....	19
2.9 การย่อยสลายโมเลกุลเซลลูโลสด้วยต่าง .....	21
2.10 การเกิดตัวยับยั้งจากส่วนต่าง ๆ ของพืช .....	23
2.11 โครงสร้างของกลูโคส .....	24
2.12 สูตรโครงสร้างของ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล .....	25
2.13 การเกิด 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอลจากน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ในสภาวะที่เป็นกรด.....	25
2.14 สูตรโครงสร้างของเฟอฟูรอล.....	26
2.15 การเกิดเฟอฟูรอลจากน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ในสภาวะที่เป็นกรด .....	26
2.16 โครงสร้างของกรดแทนนิก.....	27
2.17 ภาพจาก SEM ของเส้นใยมะพร้าว: (a) ไม่ผ่านการปรับสภาพ, (b) ผ่านการปรับสภาพ.....	28
2.18 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเส้นใยมะพร้าว .....	28
2.19 ภาพจาก SEM ของก้านของต้นทานตะวัน.....	30

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ หรือกากทางการเกษตร (agricultural residues) รวมทั้งของเสีย (waste) และผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยกระบวนการทางชีวภาพ เช่น เอทานอล กรดอินทรีย์ สารให้ความหวาน และตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ปัจจุบันเป็นวิทยาศาสตร์ที่ได้รับการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้บางชนิดแต่เดิมสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมี (มีกระบวนการผลิตที่ใช้ต้นทุนต่ำ และใช้เวลาในการผลิตสั้น) โดยใช้วัสดุ หรือ สารตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม แต่ปัจจุบันนี้โลกประสบปัญหาการขาดแคลนปิโตรเลียม ทำให้ต้นทุนในการผลิตโดยกระบวนการทางเคมีสูงขึ้น นอกจากนี้กระบวนการผลิตทางเคมียังก่อให้เกิดสารพิษส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปัญหาแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gases) ในบรรยากาศ เป็นผลให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น (global warming) ซึ่งสภาวะที่เกิดขึ้นนี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตโดยกระบวนการหมักทางชีวภาพ (biological fermentation) จึงเข้ามามีบทบาท โดยในระยะแรกใช้วัตถุดิบเป็นน้ำตาลที่ได้จากพืชซึ่งมีน้ำตาลสูง เช่น อ้อย หัวบีท หรือข้าวฟ่างหวาน แต่ปัจจุบันน้ำตาลที่ได้จากพืชมีราคาสูงมาก ดังนั้น จึงมีการเปลี่ยนแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการหมักมาเป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งชนิดต่าง ๆ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งมันฝรั่ง เป็นต้น และน้ำตาลที่ได้จากทรัพยากรที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (renewable resources) ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบทดแทน โดยใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ชีวภาพร่วมกับกระบวนการทางพันธุวิศวกรรม เพื่อให้กระบวนการผลิตมีต้นทุนต่ำ ได้ผลคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ใช้ผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ นำไปสู่ความต้องการที่จะพัฒนาเทคโนโลยีสีเขียว (green technology) เพื่อผลิตวัตถุดิบสีเขียว (green feedstock) ใช้ในกระบวนการหมักให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ไม่เป็นพิษต่อผู้บริโภค (green product) ซึ่งคาดว่ากระบวนการผลิตทางชีวภาพจะมีบทบาทสูงมากในอนาคต (สุขใจ, 2554)

ลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืชพบได้ทั่วไปในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพืชจำพวกไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสแตกต่างกันตามชนิดของพืชแต่โดยทั่วไปแล้วประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน กระบวนการกำจัดลิกโนเซลลูโลสส่วนใหญ่ทำด้วยการเผาในที่โล่งซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จากสาเหตุนี้ทำให้มีความสนใจที่จะนำลิกโนเซลลูโลสมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้นเช่น แหล่งพลังงานเชื้อเพลิง เอธิล

แอลกอฮอล์ และโดยเฉพาะการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีความสำคัญในระดับอุตสาหกรรม เป็นต้น

มะพร้าว (coconut) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. เป็นพืชเศรษฐกิจพืชที่ปลูกกันอย่างแพร่หลาย โดยที่เส้นใยมะพร้าวมีองค์ประกอบเป็นลิกนิน (lignin) ร้อยละ 38.44±0.7 แอลฟา-เซลลูโลส ( $\alpha$ -cellulose) ร้อยละ 31.84±0.48 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ร้อยละ 24.54±0.15 เพคติน (pectin) ร้อยละ 0.5±0.01 เถ้า ร้อยละ 1.41±0.03 และน้ำมันและไข ร้อยละ 1.12±0.001

วัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาโดยการนำเส้นใยมะพร้าวแถมมาผ่านการปรับสภาพทางกายภาพ และการปรับสภาพทางเคมี จากนั้นนำไปไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อผลิตน้ำตาลกลูโคสให้ได้ปริมาณสูงที่สุด ตัวอย่างเส้นใยมะพร้าวที่นำมาทำการไฮโดรไลซิส คือ เส้นใยมะพร้าวแถม โดยทำการเปรียบเทียบการไฮโดรไลซ์ที่ความเข้มข้นของสารละลาย, อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน ไฮโดรไลซ์เส้นใยมะพร้าวเพื่อให้ได้น้ำตาลกลูโคสในปริมาณมากที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการใช้ประโยชน์ของกาบมะพร้าวแถมเพื่อนำมาผลิตน้ำตาล
- 1.2.2 ศึกษาขนาดของตัวอย่างจากกาบมะพร้าวแถมเพื่อผลิตน้ำตาลให้ได้ปริมาณสูงที่สุด
- 1.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแถมด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อผลิตน้ำตาลให้ได้ปริมาณสูงสุด

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการผลิตน้ำตาล โดยผ่านกระบวนการปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ตัวอย่างกาบมะพร้าวแถมขนาดต่าง ๆ
- 1.3.2 ศึกษากระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่สภาวะต่าง ๆ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงกระบวนการไฮโดรไลซิส ที่เหมาะสมที่สามารถผลิตน้ำตาลได้ปริมาณมากที่สุด
- 1.4.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้
- 1.4.3 แพลงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กาบมะพร้าวแถม เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด และเป็นการเพิ่มมูลค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะพร้าว

##### 2.1.1 มะพร้าว

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้นที่จัดอยู่ในตระกูลปาล์ม เป็นพืชชนิดเดียวที่อยู่ในสกุล Cocos เป็นพืชซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลายทาง เช่น น้ำและเนื้อมะพร้าวอ่อนใช้รับประทาน เนื้อในผลแก่นำไปขูดและคั้นทำกะทิ กะลानำไปประดิษฐ์สิ่งของต่าง ๆ เช่น กระจบาย โคมไฟ ฯลฯ นอกจากนี้มะพร้าวจัดเป็นพรรณไม้มงคลชนิดหนึ่ง ตามตำราพรหมชาติฉบับหลวง ได้กำหนดให้ปลูกมะพร้าวไว้ทางทิศตะวันออกของบ้าน เพื่อความเป็นสิริมงคล



รูปที่ 2.1 ลูกมะพร้าว

ที่มา: <http://www.klongdigital.com/webboard3/27570.html> สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำแนกทางอนุกรมวิธาน (Taxonomic classification)

Class : Angiospermae

Subclass : Monocotyledoneae

Order : Palmales

Family : Palmae

Subfamily : Cocoideae

Tribe : Cocoideae

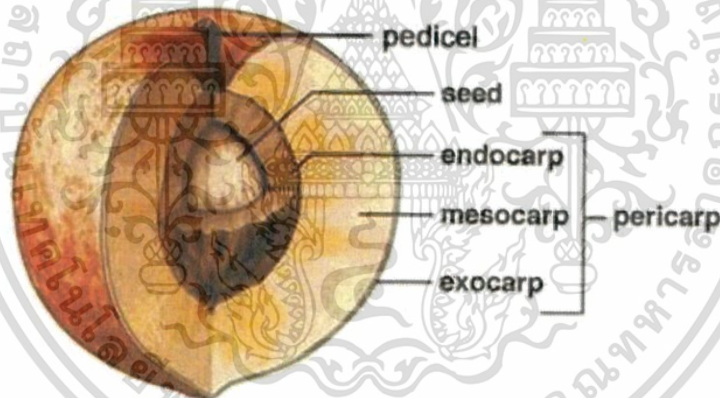
Genus : *Cocos*

Species : *nucifera*

Scientific name : *Cocos nucifera*

Common name : Coconut, Coconut Palm, Ocean Going Nut

#### 2.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพของมะพร้าว



#### รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของลูกมะพร้าว

ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3103/exocarp> สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2558

มะพร้าว เป็นพืชยืนต้น ใบมีลักษณะเป็นใบประกอบแบบขนนก ผลประกอบด้วยเอพิคาร์ป (epicarp) คือ เปลือกนอก ถัดไปข้างในจะเป็นมีโซคาร์ป (mesocarp) หรือใยมะพร้าว ถัดไปข้างในเป็นส่วนเอนโดคาร์ป (endocarp) หรือ กะลามะพร้าว ซึ่งจะมีรูสีคล้ำอยู่ 3 รูสำหรับงอก ถัดจากส่วนเอนโดคาร์ปเข้าไปจะเป็นส่วนเอนโดสเปิร์ม (endosperm) หรือ ที่เรียกว่าเนื้อมะพร้าว ภายในมะพร้าวจะมีน้ำมะพร้าว ซึ่งเมื่อมะพร้าวแก่ เอนโดสเปิร์มก็จะดูดเอาน้ำมะพร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปหมด ขณะที่มะพร้าวยังอ่อน ชั้นเอนโดสเปิร์ม (เนื้อมะพร้าว) ภายในผลมีลักษณะบางและอ่อนนุ่ม ภายในมีน้ำมะพร้าว ซึ่งในระยะนี้เรามักสอยเอามะพร้าวลงมารับประทานน้ำและเนื้อ เมื่อมะพร้าวแก่ซึ่งสังเกตได้จากการที่เปลือกนอกเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ชั้นเอนโดสเปิร์มก็จะหนาและแข็งขึ้น จนในที่สุดมะพร้าวก็หล่นลงจากต้น นอกจากนี้มะพร้าวยังประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ราก ลำต้น ใบ ดอก ผล และเมล็ด มีรายละเอียดดังนี้

ราก มะพร้าวมีระบบรากฝอย (fibrous root system) เมื่อนำมะพร้าวมาเพาะแระติเคิลจะเจริญเป็น primary root จากนั้นไม่นานจะมีราก adventitious root เจริญจากข้อแรกของต้นอ่อน รากเหล่านี้มีขนาดเท่า ๆ กันและไม่แตกต่างจากรากแรก จึงอาจเรียกรากหลัก (main root) ที่รากหลักจะมีรากแขนงขนาดเล็กแตกออกจำนวนมาก และพบปุ่มสีขาวทั้งบนรากหลัก และรากแขนงเรียกว่า breathing organ หรือ breathing root หรือ pneumatophore ทำหน้าที่ช่วยลำเลียงอากาศให้แก่มะพร้าว เมื่อต้นมะพร้าวมีข้อเพิ่มขึ้นก็จะมีรากหลักจำนวนมากงอกออกมาจากข้อที่อยู่ใต้ดินและเหนือผิวดินเล็กน้อย

ลำต้น ส่วนที่อยู่ใต้ดินเรียกว่า bole ต้นมะพร้าวที่เริ่มปลูกจะเจริญขยายขนาดออกทางด้านกว้าง จะได้ขนาดใหญ่เล็กตามลักษณะพันธุ์ จากนั้นจะยืดยาวตั้งตรงขึ้น ลำต้นมะพร้าวประกอบด้วยท่อน้ำ ท่ออาหาร และเนื้อเยื่อที่มองเห็นเป็นใยหยาบๆ ไม่มีเปลือกลำต้น และไม่สามารถที่จะสร้างเนื้อเยื่อปิดบาดแผลหากได้รับอันตราย ฉะนั้น จึงควรระวังการเกิดแผลบนลำต้น เพราะนอกจากทำให้สูญเสียน้ำแล้ว ยังเป็นทางเข้าทำลายของเชื้อโรคได้ด้วย บนลำต้นจะพบรอยที่เคยเป็นที่ติดของใบเป็นรอยขวางลำต้นซึ่งรอยเหล่านี้ใช้คำนวณอายุของมะพร้าวได้ เนื่องจากใน 1 ปีมะพร้าวจะมีรอยแผลเพิ่มขึ้น 12-14 แผล

ใบ หรือ ทางมะพร้าวเป็นใบประกอบแบบ pinnately compound leaf โคนก้านใบแผ่กว้าง และเรียวแหลมไปสู่ปลาย ใบเกิดที่ส่วนยอดของลำต้น ในขณะที่ยังอ่อนจะมีสีเหลืองอ่อนลักษณะเป็นแท่งเรียวยาว เมื่ออายุมากขึ้นใบย่อยจะแยกจากกัน เริ่มมีสีเขียวอ่อน และเข้มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อใบแผ่ขยายเต็มที่ก้านใบจะค่อย ๆ เอนออกจากลำต้น ใน 1 ปีมะพร้าวจะสร้างใบ 12-14 ใบ บริเวณโคนก้านใบจะพบแผ่นเส้นใยสานกันบาง ๆ เรียกว่ารกมะพร้าว

ช่อดอก และ ดอก ดอกมะพร้าวเกิดเป็นช่อแบบ panicle เรียกว่า spadix ในขณะที่ยังอ่อนจะมีกาบหุ้มเรียกว่า spathe แกนกลางของช่อดอก เรียกว่า rachis ใบมะพร้าวส่วนใหญ่แต่ละก้านแขนงจะมีดอกตัวเมีย 1 ดอกอยู่ใกล้โคน หรือ ไม่มีเลย ดอกตัวเมียไม่มีก้านดอก มีชื่อเรียกเฉพาะว่า button ประกอบด้วยเกสรตัวเมียที่มีรังไข่รูปร่างคล้ายปิรามิด ก้านเกสรตัวเมียแยกเป็น 3 แฉก กลีบดอก และกลีบเลี้ยงเชื่อมติดกันเรียกว่า perianth มี 2 ชั้น ๆ ละ 3 กลีบ เมื่อดอกตัวเมียได้รับการผสมและเจริญเป็นผล ส่วนก้านแขนงจะเจริญไปเป็นก้านผล ดอกตัวผู้และดอกตัวเมียในแต่ละช่อบานไม่ตรงกัน จะแตกต่างกันมากน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ ระยะที่ดอกตัวผู้บานเรียกว่า male phase ส่วนระยะที่ดอกตัวเมียพร้อมจะรับการผสมเรียกว่า female phase ดอกตัวผู้ของช่อดอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่ง ๆ จะทยอยบานในหมดเวลา 15-23 วัน ในมะพร้าวพันธุ์ต้นใหญ่ female phase จะสิ้นสุดก่อน female phase ทำให้ต้องใช้ละอองเกสรตัวผู้จากต้นอื่นมาผสม ส่วนมะพร้าวพันธุ์ต้นเตี้ย หรือพันธุ์ลูกผสม ระยะเวลาบานของดอกทั้ง 2 เพศจะมีช่วงเหลื่อมกันทำให้เกิดการผสมในต้นเดียวกัน การผสมข้ามต้นเกิดจากการพัดพาละอองเกสรตัวผู้ของลมและติดไปกับแมลงพวกผึ้งตัวเล็กในวงศ์ melipona แตนขนาดเล็ก ตัวปีกแข็ง และแมลงวันต่าง ๆ รวมทั้งแมลงวันบ้าน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า ลมพัดพาละอองเกสรตัวผู้ไปได้ไกลประมาณ 315 เมตร และสูงจากพื้นดินประมาณ 6 เมตร

ผล และ เมล็ด ผลมะพร้าวเป็นแบบ fibrous drupe มีชื่อเรียกเฉพาะว่า nut เปลือกชั้นนอกสุดเรียกว่า exocarp ถัดเข้าไปเป็นชั้นเส้นใยหนา เรียกว่า mesocarp จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นส่วนของ endocarp หรือ กะลา ถัดจากกะลาเข้าไปเป็นส่วนของเมล็ด ซึ่งประกอบด้วย เปลือกเมล็ดสีน้ำตาลเข้ม เมื่อผลแก่เปลือกเมล็ดจะติดแน่นกับอาหารสะสมที่เป็นของแข็ง (solid endosperm) ซึ่งก็คือ เนื้อมะพร้าว น้ำมันมะพร้าวคืออาหารสะสมชนิดเหลวเรียกว่า liquid endosperm เมื่อผลมะพร้าวแก่เต็มที่ ใบเลี้ยงของต้นอ่อนจะดูดเข้าไปภายในและค่อย ๆ ขยายขนาดขึ้นจนเต็มเมล็ด เรียกว่า จาว (apple) เป็นแหล่งอาหารสำหรับการงอกของต้นอ่อน ซึ่งในระยะนี้ต้นอ่อนจะเริ่มแทงยอดผ่านเปลือกออกมาและรากเจริญไปในด้านตรงกันข้าม

### 2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว (Basu และคณะ, 2015)

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า องค์ประกอบของเส้นใยมะพร้าวประกอบด้วยปริมาณ แอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 38.44±0.7 ปริมาณลิกนินร้อยละ 31.84±0.48 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 24.54±0.15 ปริมาณเพคตินร้อยละ 0.5±0.01 ปริมาณเถ้าร้อยละ 1.41±0.03 และปริมาณน้ำมันและไครร้อยละ 1.12 ± 0.001

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักจากการอบแห้ง)

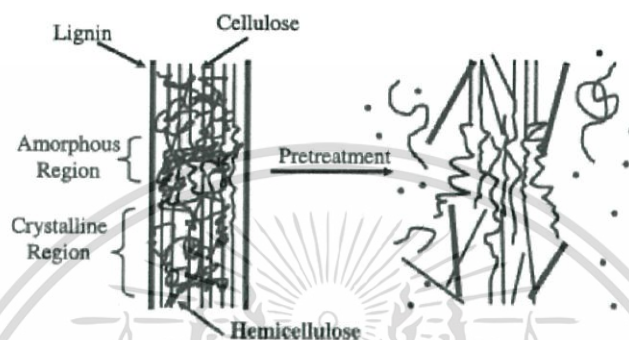
องค์ประกอบ	เส้นใยมะพร้าวที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ
แอลฟา เซลลูโลส	38.44±0.7
ลิกนิน	31.84±0.48
เฮมิเซลลูโลส	24.54±0.15
เพคติน	0.5±0.01
เถ้า	1.41±0.03
น้ำมันและไคร	1.12±0.001

ที่มา: Basu และคณะ (2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส ( รัชพล, 2558)

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (รูปที่ 2.3) ในอัตราส่วนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (ตารางที่ 2.2) โดยทั่วไปพบเซลลูโลสร้อยละ 40-60 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20-30 และลิกนินร้อยละ 15-30 (Lee และคณะ, 2008)



รูปที่ 2.3 โครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส  
ที่มา: Lee และคณะ (2008)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	ร้อยละของเซลลูโลส	ร้อยละของเฮมิเซลลูโลส	ร้อยละของลิกนิน
ไม้เนื้อแข็ง	40-55	24-40	18-25
ไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
ซังข้าวโพด	45	35	15
หญ้า	25-40	35-50	10-30
ฟางข้าว	30	50	15
ใบไม้	15-20	80-85	0
ใยเมล็ดฝ้าย	80-95	5-20	0
หญ้าคอสมอส	25	35.7	6.4
หญ้าสวิช	45	31.4	12.0

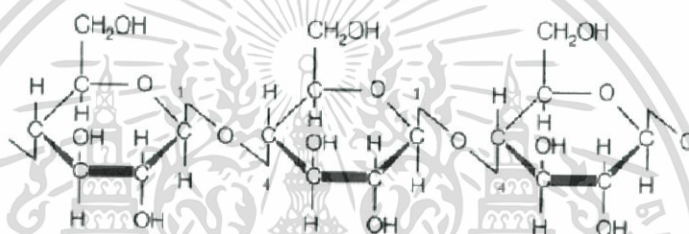
ที่มา: Sun และคณะ (2002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยมะพร้าว

### 2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส เป็นโฮโมโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-D-กลูโคไพราโนส ( $\beta$ -D-Glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4-glycosidic bond) เกิดเป็นโพลิเมอร์กลูแคน (glucan) มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปในธรรมชาติพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ crystalline cellulose และ amorphous cellulose โดยส่วนของ crystalline cellulose จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ยากกว่า amorphous cellulose (เวสารัช และคณะ, 2556 ; Eriksson และคณะ, 1990) สำหรับโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส แสดงในรูปที่ 2.4

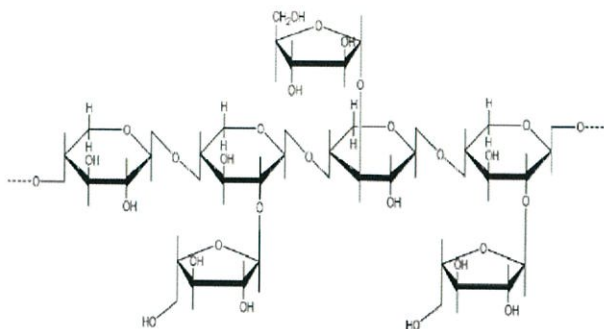


รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก

ที่มา: วนิดา และคณะ (2550)

### 2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไชโลส และอะราบินโนส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนน กาแลกแตน และอะราบินแนน (Bastawde และคณะ, 1992) มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย โดยในพอลิเมอร์ไวลแลน ดี-ไชโลสมีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 85-93 ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น กลูโคส กรดกลูควิโรนิก กรดกาแลคตุโรนิก จะพบปริมาณน้อย (Browning, 1963) โดยไชโลสที่พบจะเชื่อมด้วยพันธะเบตา 1,4 ไกลโคซิดิก (Browning, 1963 ; Bastawde และคณะ, 1992 ; Altintas และคณะ, 2002) สำหรับโครงสร้างทางเคมีของไซแลน แสดงในรูปที่ 2.5

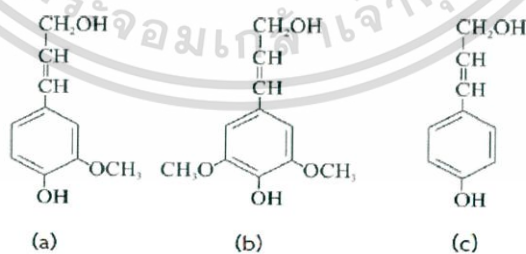


รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไซลแลน

ที่มา : Bastawde และคณะ (1992)

### 2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช พบในปริมาณที่แตกต่างไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลล์ไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ลิกนินเป็นเอเทอโรพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ไม่แตกผลึก (Cheng และคณะ, 2008) ประกอบด้วย สารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ประกอบด้วย tran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohol และ trans-p-sinapyl alcohol (Eriksson และคณะ, 1990) นอกจากนี้โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่นอีกมากมาย เช่น vanillin และ syringaldehyde (Yudkin และ Offord, 1993) สูตรโครงสร้างของ tran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohol และ trans-p-sinapyl alcohol แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของ (a) trans-coniferyl alcohol (b) trans-p-sinapyl alcohol และ (c) tran-p-coumaryl alcohol

ที่มา: Eriksson และคณะ (1990)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment)

ในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ จะกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คือ ทำให้ชั้นแมทริกซ์ของวัสดุลิกโนเซลลูโลสถูกทำลาย ซึ่งมีผลทำให้เอนไซม์สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถทำงานได้ง่ายขึ้น ในการศึกษาจะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการปรับสภาพที่มีความสำคัญจะเป็นตัววัดความสำเร็จของเทคโนโลยีในการแปลงเซลลูโลส เนื่องจาก เป็นตัวช่วยแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าทางพาณิชย์ในการเปลี่ยนเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นเอทานอลได้ จุดประสงค์ของการปรับสภาพวัตถุดิบ คือ เป็นการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มความพรุนความวัสดุ ซึ่งกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบแสดงดังรูปที่ 6 สามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธีหลัก ๆ ซึ่งแต่ละวิธีมีวิธีย่อยลงไปอีกดังนี้

### 2.4.1 วิธีทางกายภาพ (Physical pretreatment)

#### 2.4.1.1 การใช้แรงทางกล (mechanical comminution)

วิธีการทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทุบ การบด การฉีก การเขย่าวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดผลึก (cellulose crystallinity) และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ความสามารถในการลดขนาดจะขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุนั้น ซึ่งปกติขนาดของเศษวัตถุดิบจะให้มีขนาดประมาณ 0.2-2 มิลลิเมตร (Sun และ Cheng, 2002)

#### 2.4.1.2 การไพโรไลซิส (pyrolysis)

วิธีการอบที่ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ให้วัตถุดิบกลายเป็นแก๊สหรือของแข็ง กระบวนการจะทำได้ช้าและการระเหยจะต่ำถ้าใช้อุณหภูมิต่ำ จากการวิจัยพบว่าการใช้อุณหภูมิมากไปหรือน้อยไปจะไม่เป็นผลดี จึงต้องมีการวิจัยที่เหมาะสม ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ยังมีข้อมูลที่ค่อนข้างน้อย

#### 2.4.1.3 การใช้ความร้อน (thermal heat treatment)

เป็นการปรับสภาพของวัตถุดิบเพื่อทำลายเนื้อเยื่อของเซลลูโลส ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะใช้อุณหภูมิมากกว่า 150-180 องศาเซลเซียส แต่ต้องทำให้วัสดุมีขนาดที่เล็กลงก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยวัตถุดิบทางความร้อน

## 2.4.2 วิธีการทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

เป็นวิธีการที่ใช้จุลินทรีย์ซึ่งสามารถใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภท ลิกโนเซลลูโลสและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในขั้นตอนย่อยวัตถุดิบด้วยเอนไซม์ ในการใช้จุลินทรีย์ ในการปรับสภาพ จะทำการย่อยลิกนิน รวมทั้งเฮมิเซลลูโลสด้วย ส่วนเซลลูโลสถูกย่อยน้อยมากซึ่ง เซลลูโลสมีความต้านทานในการย่อยของจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนอื่นๆของลิกโนเซลลูโลส มีการใช้ จุลินทรีย์ brown-, white-, และ soft-rot fungi ในการปรับสภาพวัตถุดิบ white-rot fungi อาทิ เช่น *Phanerochaete chrysosporium*, *Ceriporia lacerata*, *Cyathus stercolerus*, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Pycnoporus cinnabarinus* และ *Pleurotus ostreatus* เป็น จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Kumar และคณะ, 2011 ; Sreenath และคณะ, 2001 ; Slininger และคณะ, 1982)

## 2.4.3 วิธีการทางเคมี (Chemical pretreatment)

### 2.4.3.1 การทำปฏิกิริยากับโอโซน (ozonolysis)

โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่มีประสิทธิภาพ และสามารถทำให้เกิดการ แตกตัวของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัสดุพวกฟางข้าวได้ วิธีนี้มีจุดเด่นคือ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพใน การเอาลิกนินออกได้ดี ไม่มีสารพิษที่จะไปยับยั้งการทำปฏิกิริยาในส่วนต่างๆ กระบวนการนี้สามารถ ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ผลเสียของวิธีนี้คือค่าใช้จ่ายที่สูงมาก (Sun และ Cheng, 2002)

### 2.4.3.2 การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้ด่าง (alkali pretreatment)

การใช้ด่างในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบมีผลต่อวัสดุพวก ลิกโนเซลลูโลส และผลของด่างที่ใช้ในกระบวนการแปลงสภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของลิกนินที่มีอยู่ใน วัสดุนั้นด้วย (Millan, 1994) กลไกการทำงานของด่างนั้นเชื่อว่าจะไปเพิ่มการพองตัวของ โมเลกุลของการต่อสายพันธะภายในของโซลโนเฮมิเซลลูโลส ความพรุนของวัสดุจะเพิ่มขึ้นได้เมื่อ ทำการกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันภายใน การใช้ด่างเจือจางในวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีผลทำให้เกิดการบวม ภายในเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาทำให้วัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้นได้ ลดความเป็น โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ และสามารถแยกสายโครงสร้าง ระหว่างลิกนินและ คาร์โบไฮเดรต และเป็นการแยกองค์ประกอบหรือทำลายโครงสร้างของลิกนิน อย่างไรก็ตามการใช้ด่างเพื่อปรับสภาพมักจะไม่ค่อยมีผลต่อวัสดุพวกไม้เนื้ออ่อนเท่าไม้เนื้อแข็ง ดังที่นิยม ใช้ในการแยกลิกนินได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ Kim และคณะ (2008) ได้ศึกษาการปรับสภาพข้าวบาร์เลย์ด้วยแอมโมเนียพบว่าแอมโมเนียที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 24-72 ชั่วโมง สามารถสกัดแยกเอาส่วนของลิกนินออก ร้อยละ 50-66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.3.3 การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้กรด (acid pretreatment)

กระบวนการปรับสภาพโดยใช้กรดนั้น มีจุดประสงค์คือเพื่อให้ได้น้ำตาลในปริมาณที่สูงจากวัสดุชีวมวล ชนิดของกรดที่นำมาปรับสภาพมีมากมายหลายประเภทได้แก่ กรดซัลฟิวริก ไฮโดรคลอริก ไนตริก หรือ ฟอสฟอริก ในกระบวนการปรับสภาพสามารถใช้ได้ทั้งกรดเข้มข้นและเจือจางเพื่อเพิ่มการทำงานของกระบวนการไฮโดรไลซิส (Palmqvist และ Hahn-Hagerdal, 2002) ในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ การใช้กรดเจือจางเป็นวิธีหนึ่งที่มีความสนใจศึกษากันมากและแพร่หลายที่สุด (Mussatto และคณะ, 2005) การใช้กรดเจือจางเพื่อปรับสภาพวัสดุที่อุณหภูมิที่เหมาะสมโดยใช้กรดซัลฟิวริกหรือกรดฟอสฟอริกมักจะถูกใช้สำหรับการเปลี่ยนวัสดุพวก ลิกโนเซลลูโลส ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลส ไปเป็นน้ำตาลที่ละลายได้ตามด้วยการใช้ เอนไซม์เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อให้เกิดเป็นกลูโคส (Silverstein และคณะ, 2007) ใน การใช้กรดเจือจางจะมีอยู่ 2 รูปแบบที่ใช้ คือ (1) ปริมาณสารตั้งต้นน้อย (ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก) ที่ อุณหภูมิสูง ( $T > 433$  องศาเซลเซียส) และ (2) ปริมาณสารตั้งต้นมาก (ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก) ที่ อุณหภูมิต่ำ ( $T < 433$  องศาเซลเซียส)

โดยทั่วไปแล้วพบว่าเมื่อทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงและเวลาที่ใช้สั้นกว่าจะมีผลทำให้พบปริมาณไฮโดรเจน และการทำงานของเอนไซม์สามารถทำงานได้ดีกว่า ที่อุณหภูมิสูง การใช้กรดเจือจางพบว่ามีผลต่อการเพิ่มการย่อยเซลลูโลส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นและความเข้มข้นที่ใช้ โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 80 และ 95 ของน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลสสามารถได้คืนมาโดยการที่ใช้กรดเจือจางในการปรับสภาพจากการใช้วัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นสารตั้งต้น นอกจากนั้นความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิที่ใช้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดสารที่เป็นพิษ อุณหภูมิที่เหมาะสม ( $< 160$  องศาเซลเซียส) ได้มีการพิสูจน์ว่าเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเฮมิเซลลูโลส ในอีกด้านหนึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า  $160$  องศาเซลเซียส จะมีผลต่อเซลลูโลสมากกว่าซึ่งพบว่าจะมีการเกิดปริมาณน้ำตาลที่สูงและมีการสลายส่วนประกอบของลิกนิน (Millan และคณะ, 1994) การทำงานของกรดเจือจางในการปรับสภาพจะมีผลไปยังกระบวนการไฮโดรไลซิสขององค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่สามารถผลิตเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว การมีอยู่ของเซลลูโลส เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาโดยเอนไซม์โดยที่มีการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและส่วนที่เป็นลิกนิน โดยทั่วไปแล้วการใช้กรดเจือจางผสมกับวัสดุชีวมวลและทำที่อุณหภูมิสูงที่  $160-220$  องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้นๆไปไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสให้เป็นไฮโดรเจนและน้ำตาลตัวอื่นและจากนั้นจะมีการทำลายไฮโดรเจนให้เป็นเพอฟูรัล กระบวนการไฮโดรไลซิสโดยไม่ผ่านการปรับสภาพวัตถุดิบก่อน พบว่าผลผลิตที่ได้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 20 ในขณะที่เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วได้ผลผลิตมากกว่าร้อยละ 90 (Hamelinck และคณะ, 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.4 วิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี (Physicochemical pretreatment)

### 2.4.4.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion)

วิธีการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Millan, 1994) การระเบิดด้วยไอน้ำโดยส่วนใหญ่แล้วจะทำให้อุณหภูมิช่วง 160-260 องศาเซลเซียส ภายใต้อุณหภูมิ 0.69-4.82 เมกะปาสคาล วัตถุดิบจะถูกผสมกับไอน้ำอิมพัลส์ที่ความดันสูง แล้วทำการลดความดันอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้เกิดการแยกเอาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินออกจากกันที่อุณหภูมิสูง โดยส่วนของเฮมิเซลลูโลสจะละลายในน้ำที่ควบแน่นจากไอน้ำ ปัจจัยที่มีผลในกระบวนการปรับสภาพด้วยวิธีนี้คือ เวลาที่ใช้ อุณหภูมิ ขนาดของวัสดุตั้งต้นที่ใช้และปริมาณความชื้นที่อยู่ในวัตถุดิบ (Duff และ Murray, 1996) จากการศึกษาพบว่า ค่าที่ดีที่สุดในการละลายเฮมิเซลลูโลส และการเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส สามารถเกิดได้ภายใต้เงื่อนไขสภาวะอย่างใดอย่างหนึ่งดังนี้ คือ สภาวะที่ใช้อุณหภูมิต่ำ และมีการใช้เวลาที่ต่ำ (270 องศาเซลเซียส, 1 นาที) และที่สภาวะการใช้อุณหภูมิต่ำ และเวลาที่ใช้มีค่าสูง (190 องศาเซลเซียส, 10 นาที) จากการศึกษาของ Wright (1998) พบว่าที่การใช้อุณหภูมิต่ำ และเวลาที่ใช้ยาวนานกว่า พบว่า ผลที่ได้มีค่าสูง การเติมกรดเช่นพวก กรดซัลฟิวริก หรือการเติม ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ พบว่ามีผลทำให้เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการไฮโดรไลซิส และเป็นการลดสารที่จะเป็นตัวต่อต้านในการเกิดปฏิกิริยาอื่นที่สำคัญและยังเป็นการทำให้มีการกำจัดเฮมิเซลลูโลสได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ข้อดีของวิธีการปรับสภาพด้วยวิธีนี้คือ มีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ด้วยวิธีทางกล การปรับสภาพโดยวิธีทางกลจะใช้พลังงานสูงกว่าร้อยละ 70 เป็นที่ทราบกันดีว่าวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำนั้น จะมีผลโดยตรงกับวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่เป็นไม้เนื้อแข็ง และวัตถุดิบพวกของเหลือใช้ทางการเกษตร แต่จะมีผลน้อยมากต่อวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่เป็นไม้เนื้ออ่อน (Clark และ Mackie, 1987) วัสดุที่ผ่านกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการไฮโดรไลซิส แต่ข้อจำกัดของกระบวนการนี้ก็คือในการทำลายแยกส่วนประกอบออกจากกันในส่วนของลิกนินมักเกิดไม่สมบูรณ์ และมักเกิดเป็นกลุ่มของสารประกอบที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดจุลชีพ เพราะว่างค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ถูกย่อยออกมาจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การใช้เอนไซม์ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (enzymatic hydrolysis) รวมถึงการหมักด้วย เนื่องจากองค์ประกอบที่ได้จากการย่อยออกมาเป็นสารที่เป็นตัวต่อต้าน และเป็นสารพิษต่อจุลินทรีย์ กระบวนการไฮโดรไลซิส และกระบวนการหมักทำให้ต้องมีการล้างด้วยน้ำเพื่อทำให้สารที่เป็นพิษเหล่านี้ออกไป การล้างมีผลทำให้น้ำตาลที่ได้ถูกชะล้างหรือสูญเสียไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion, AFEX)

วิธีการนี้ใช้แอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิระหว่าง 60-100 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน ระยะเวลาหนึ่ง แล้วทำการลดความดันลงซึ่งมีผลต่อวัตถุดิบโดยวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการนี้จะมีอัตราการผลิตน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณของเฮมิเซลลูโลส ไม่เหมาะสมกับพืชที่มีลิกนินอยู่มาก ในกระบวนการนี้สามารถนำแอมโมเนียกลับมาใช้ได้ใหม่ และไม่ก่อให้เกิดตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น อาทิ เช่น การระเบิดด้วยไอน้ำจะได้ลักษณะของตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) สามารถทำการแยกเป็นส่วนเป็นส่วนของแข็งและของเหลวออกจากกันได้ ในขณะที่ AFEX จะให้ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพเป็นของแข็งเท่านั้น (Alvira และคณะ, 2010)

#### 2.4.4.3 ความร้อนชื้น (liquid hot water)

วิธีการนี้เป็นอีกกระบวนการที่มีการใช้ความร้อนชื้น ซึ่งจะดำเนินการอย่างช้าๆ และไม่ต้องการสารเคมีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ต้องอาศัยความดันเพื่อควบคุมสถานะของน้ำในสถานะของเหลว อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 160-240 องศาเซลเซียส โดยจะส่งผลกระทบต่อเฮมิเซลลูโลส ตัวอย่างที่ได้หลังจากการปรับสภาพจะอยู่ในรูปแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) โดยส่วนที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่จะเป็นเซลลูโลส ส่วนของเหลวส่วนใหญ่เป็นเฮมิเซลลูโลส และเกิดน้ำตาลบางส่วน ทั้งนี้ควรมีการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 4-7 เนื่องจากว่าในช่วงดังกล่าวทำให้เฮมิเซลลูโลสยังคงอยู่ในรูปของโอลิโกเมอร์ (oligomeric form) ช่วยลดปัญหาการเกิดก๊อตัวเกิดเป็นโพลีเมอร์ใหม่อีกครั้ง (Mosier และคณะ, 2005)

#### 2.4.4.4 การย่อยเปียก (wet oxidation)

วิธีการนี้ใช้ออกซิเจน และอากาศเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา นิยมใช้ถังหมักชีวภาพในสถานะที่อุณหภูมิต่ำภายใต้แรงดัน และเวลาสั้น โดยทั่วไปจะใช้เวลา 10-15 นาที อุณหภูมิ 170-200 องศาเซลเซียส และความดันระหว่าง 10-12 บาร์ ของออกซิเจน (Ogbonna และคณะ, 2001) จากงานวิจัยของ Mishima และคณะ (2006) พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้ปริมาณเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น นิยมใช้ในการผลิตเอทานอลในกระบวนการหมักแบบการย่อยให้เป็นน้ำตาลพร้อมการหมัก (simultaneous saccharification and fermentation, SSF)

#### 2.4.4.5 การปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave pretreatment)

วิธีการปรับสภาพโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟจัดเป็นวิธีการทางกายภาพ ร่วมกับทางเคมี เนื่องจากว่ามีการใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และส่วนที่ใช้สารเคมีเจือจางในการแช่วัสดุ การให้คลื่นไมโครเวฟจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุใช้เวลาระหว่าง 5-20 นาที (Keshwani, 2009) จากการศึกษาเบื้องต้นของ เวสาร์ช และรัชพล (2555) และ Zhu และคณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2006) พบว่า การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายต่างมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟมากกว่าสารละลายกรด

#### 2.4.4.6 การปรับสภาพด้วยคลื่นความถี่สูงอัลตราซาวด์ (ultrasonic pretreatment)

วิธีการปรับสภาพด้วยคลื่นความถี่สูงอัลตราซาวด์ยังมีรายงานเกี่ยวกับวิธีดังกล่าวน้อย แต่ผลที่ได้จากการใช้คลื่นความถี่สูงอัลตราซาวด์พบว่าส่งผลให้เกิดการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ได้มากขึ้น จากงานวิจัยของ Yachmenev และคณะ (2009) พบว่าคลื่นความถี่สูงอัลตราซาวด์มีผลทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของวัสดุได้มากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย

#### 2.4.4.7 การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> explosion)

วิธีการนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากกรดคาร์บอนิกในการเพิ่มปฏิกิริยาย่อยสลายขั้นต่อไป นิยมใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมด้วย อาทิ เช่น เอทานอล ช่วยในการกำจัดสารประเภทลิกนิน แต่วิธีการนี้ได้ผลผลิตต่ำกว่าการใช้เอน้ำหรือแอมโมเนีย แต่ไม่เกิดตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเหมือนวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Ragg และ Fields, 1987)

**ตารางที่ 2.3** จุดเด่นและจุดด้อยของกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน

การปรับสภาพ	จุดเด่น	จุดด้อย
ทางชีวภาพ	- ย่อยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส - ใช้พลังงานต่ำ	- มีอัตราการย่อยสลายช้า
การบด การไม่	- ลดขนาดของเซลลูโลส	- ใช้พลังงานสูง
การระเบิดด้วยไอน้ำ	- มีผลทำให้ลิกนินเปลี่ยนรูป และย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้ดี - คุ่มค่าการลงทุน - ให้ผลผลิตของน้ำตาลกลูโคส และเฮมิเซลลูโลสสูง	- มีองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษเจือปน
AFEX	- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย - เกิดตัวยับยั้งในขั้นตอนการย่อยน้อย	- ไม่เหมาะสมกับวัสดุที่มีปริมาณลิกนินสูง - การลงทุนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 จุดเด่นและจุดด้อยของกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภท ลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน (ต่อ)

การปรับสภาพ	จุดเด่น	จุดด้อย
การระเบิดด้วย CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ</li> <li>- ย่อยสลาย</li> <li>- คุ่มค่าการลงทุน</li> <li>- มีองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็น พืชเจือปนน้อย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีผลต่อลิกนิน และ เฮมิเซลลูโลส</li> <li>- ระบบต้องใช้แรงดันสูง</li> </ul>
การย่อยเปียก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพในการแยกลิกนิน</li> <li>- มีองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็น พืชเจือปนน้อย</li> <li>- ใช้พลังงานต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าใช้จ่ายสูงในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา</li> </ul>
ปฏิกิริยาโอโซน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ลดปริมาณลิกนิน</li> <li>- ไม่ก่อให้เกิดองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพืช</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าใช้จ่ายสูง</li> </ul>
สารละลายอินทรีย์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ส่งผลต่อการย่อยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การลงทุนสูง</li> <li>- การใช้สารละลายอินทรีย์ต้องมีดูแลจัดการที่ดี</li> </ul>
กรดความเข้มข้นสูง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ให้ผลผลิตกลูโคสสูง</li> <li>- เกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าใช้จ่ายสูงและการจัดการต้องอยู่ภายใต้การควบคุม</li> <li>- เกิดสารพิษเจือปนสูง</li> </ul>
กรดเจือจาง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ลดปัญหาการกัดกร่อนเมื่อเปรียบเทียบกับกรดความเข้มข้นสูง</li> <li>- เกิดองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพืชต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ผลผลิตค่อนข้างหลากหลาย</li> <li>- ให้ผลผลิตน้ำตาลต่ำ</li> </ul>

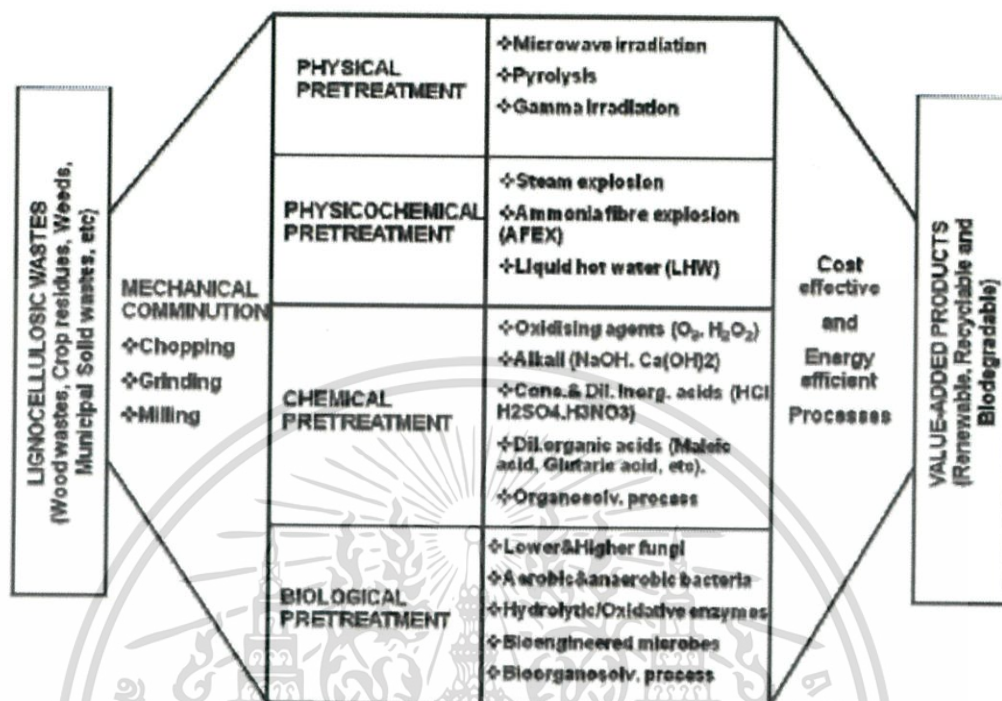
ที่มา : Alvira และคณะ (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของกระบวนการปรับสภาพต่อองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

ผลกระทบ	การบด	การระเบิด ด้วยไอน้ำ	ความร้อนขึ้น	กรด	ต่าง	สาร ออกซิแดนส์	AFEX	การระเบิด ด้วยCO <sub>2</sub>
เพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
การย่อยสลายผลึกเซลลูโลส	สูง	-	n.d.	-	-	n.d.	สูง	-
การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส	-	สูง	สูง	สูง	ต่ำ	-	ปานกลาง	สูง
การแยกลิกนิน	-	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	-
เกิดองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษเจือปน	-	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	-
เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนิน	-	สูง	ปานกลาง	สูง	สูง	สูง	สูง	-

ที่มา: Alvira และคณะ (2010)



รูปที่ 2.7 สรุปกรรมวิธีต่าง ๆ ในการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลส  
 ที่มา: อรุณี (2555)

## 2.5 การย่อยหรือไฮโดรไลซิส (ตรุณวรรณ, 2553)

การไฮโดรไลซิสหรือการย่อย คือ การลดจำนวนพอลิแซคคาไรด์ที่เรียงต่อกันในโมเลกุลให้สั้นลง การย่อยพอลิแซคคาไรด์ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

### 2.5.1 การไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมี (Chemical hydrolysis)

เป็นการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายกรด หรือสารละลายด่าง ทำให้เกิดการทำลายพันธะไกลโคซิดิกระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจน ถ้าการไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว แต่ถ้าไม่สมบูรณ์จะได้เส้นใย การไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมีสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

#### 2.5.1.1 การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) แบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ

กระบวนการแบบเอกพันธ์ (homogeneous process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟิวริก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ คือ น้ำตาลกลูโคส แต่มีข้อเสีย คือ ต้องมีการแยกกรดที่ใช้ออกจากน้ำตาลก่อนนำไปใช้เพราะทำให้เครื่องมือเกิดการผุกร่อน

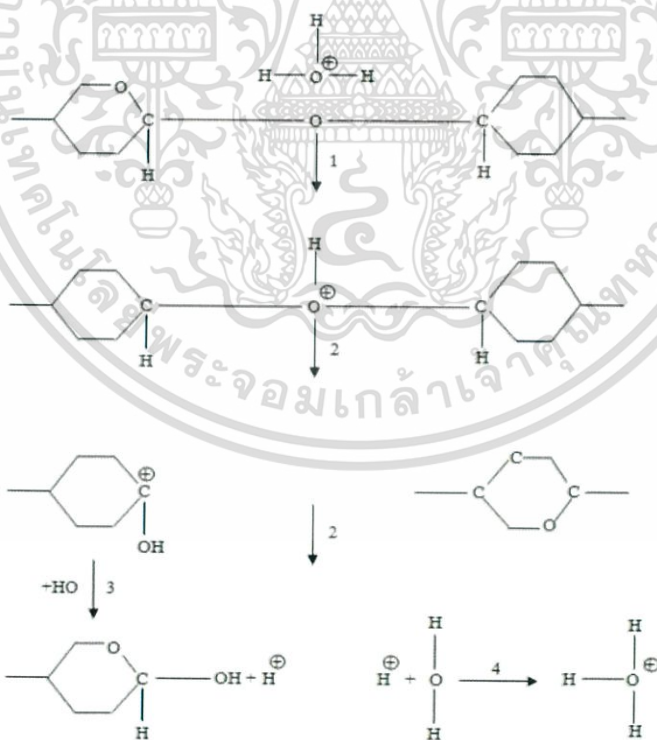
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการแบบวิวิธภันธ์ (heterogeneous process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดอ่อนทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส ผลการไฮโดรไลซิสอาจไม่สมบูรณ์และได้เป็นเส้นใย

สำหรับการย่อยพอลิแซคคาไรด์ ประเภทเซลลูโลสนั้น เมื่อถูกย่อยสลายโดยสมบูรณ์จะมีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว คือ กลูโคส แต่ถ้าถูกย่อยสลายโดยไม่สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วย กลูโคส เซลโลไบโอส และโอลิโกแซคคาไรด์

กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมี 2 วิธี คือ การใช้กรดเจือจางและการใช้กรดเข้มข้น กระบวนการใช้กรดเจือจางถูกควบคุมภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง และมีระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาเป็นวินาที กระบวนการใช้กรดเข้มข้นมักใช้อุณหภูมิไม่สูงนัก ใช้ความดันที่เกิดจากเครื่องปั๊ม และเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยานานกว่าการใช้กรดเจือจาง (สุขใจ, 2554)

กลไกปฏิกิริยาการย่อยด้วยสารละลายกรด เริ่มต้นจากต้นจากอะตอมของออกซิเจนที่พันธะไกลโคซิดิก ถูกโปรโตไนซ์ด้วยโปรตอนของไฮโดรเนียมไอออน พันธะไกลโคซิดิกแตกออก และเกิดเป็นคาร์โบเรียมไอออนและพอลิแซคคาไรด์ที่สั้นลง คาร์โบเรียมไอออนทำปฏิกิริยากับน้ำได้พอลิแซคคาไรด์สายที่สั้นลงกว่าเดิม โปรตอนรวมกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นไฮโดรเนียมไอออน และเริ่มทำปฏิกิริยาใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การตัดพันธะของเซลลูโลสด้วยกรด

ที่มา : สุขใจ (2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ตารางการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการไฮโดรไลซิสด้วยกรด

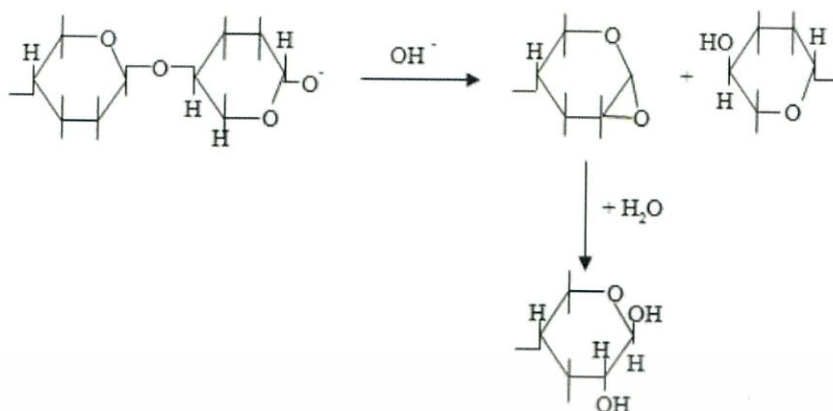
ผลดี	ผลเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัตถุประสงค์ไม่ต้องการปรับสภาพก่อน</li> <li>- ปฏิกริยาเกิดเร็ว ง่าย และสั้น</li> <li>- ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ มีราคาถูก และหาง่าย</li> <li>- ปฏิกริยาสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ในกรณีที่ใช้กรดแก่)</li> <li>- ให้ผลิตภัณฑ์สูง (ในกรณีที่ใช้กรดแก่)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นไม่เฉพาะเจาะจง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่บริสุทธิ์</li> <li>- น้ำตาลที่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นสารอื่น เช่น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล เฟอฟูรอล หรืออื่นๆ</li> <li>- ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้</li> </ul>

ที่มา: ระวีวรรณ (2537)

#### 2.5.1.2 การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (alkaline hydrolysis)

การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง วิธีนี้สามารถไฮโดรไลซ์เอมิเซลลูโลสและลดระดับลิกนิน ได้เซลลูโลสที่เอนไซม์สามารถไฮโดรไลซ์ได้ง่าย กลไกของการไฮโดรไลซิสด้วยด่าง คือ การเกิดปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน (saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของไซแลน เอมิเซลลูโลส และส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น ลิกนิน และเอมิเซลลูโลส ทำให้ช่องว่างของลิกโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น (สุขใจ, 2554)

สารละลายด่างที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง เอทิลีนไดอะมีน และ แอมโมเนีย เป็นต้น การใช้สารละลายด่างในการไฮโดรไลซิสทำให้สายพอลิแซคคาไรด์สั้นลงนั้น ปฏิกริยาจะเกิดได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 160–180 องศาเซลเซียส และต้องใช้ออกซิเจนเข้าร่วมในการทำปฏิกิริยาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การย่อยสลายโมเลกุลเซลลูโลสด้วยด่าง  
ที่มา: Casey (1960)

เมื่อน้ำตาลมาทำปฏิกิริยากับด่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายอย่าง เช่น ถ้าให้น้ำตาลอยู่ในสารละลายของด่างอ่อน เช่น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  น้ำตาลกลูโคสเปลี่ยนโครงสร้างไปมาระหว่างฟรุกโตสและแมนโนสได้ การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นตรงคาร์บอนอะตอมที่ 1 (C1) และ 2 (C2) เท่านั้น เนื่องจากน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดนี้จะผ่านทาง Enol form ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ของปฏิกิริยานี้ก่อน เราเรียกการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้ว่า lobry de bruyn transformation (ดูชฎี, 2550)

การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางเพื่อไฮโดรไลซ์ลิกโนเซลลูโลสทำให้เกิดการบวมน้ำ นำไปสู่การเพิ่มพื้นที่ผิวภายใน ลดระดับการเกิดพอลิเมอร์ ลดความสามารถของการสร้างผลึก มีการแยกโครงสร้างที่เชื่อมกันระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต และทำลายโครงสร้างลิกนิน วิธีนี้ใช้ได้ดีในฟางข้าวและขานอ้อยโดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กรดแต่ใช้เวลานานกว่า (สุขใจ, 2554)

### 2.5.2 การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic hydrolysis) (สุขใจ, 2554)

การไฮโดรไลซ์เซลลูโลสโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสซึ่งมีความจำเพาะสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ น้ำตาลรีดิซ เช่น กลูโคส ซึ่งราคาต้นทุนของการใช้กระบวนการย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรไฮโดรไลซ์ด้วยกรด หรือ ด่าง เพราะว่าการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง (พีเอช 4.8 และอุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส) และไม่มีปัญหาการกัดกร่อน มีทั้งแบคทีเรียและฟังไจที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสสำหรับการไฮโดรไลซ์ลิกโนเซลลูโลส จุลินทรีย์เหล่านี้มีทั้งพวกที่ต้องการออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจนในการเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนไซม์เซลลูเลสเป็นเอนไซม์เชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยกลุ่มหลักที่สำคัญ 3 กลุ่ม คือ เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรไลซิส

2.5.2.1 endoglucanase (EG, Endo-1,4-D-glucanohydrolase หรือ EC 3.2.1.4) ทำลายเส้นใยเซลลูโลสที่มีความสามารถในการเกิดผลึกต่ำที่อยู่เป็นอิสระละลาย

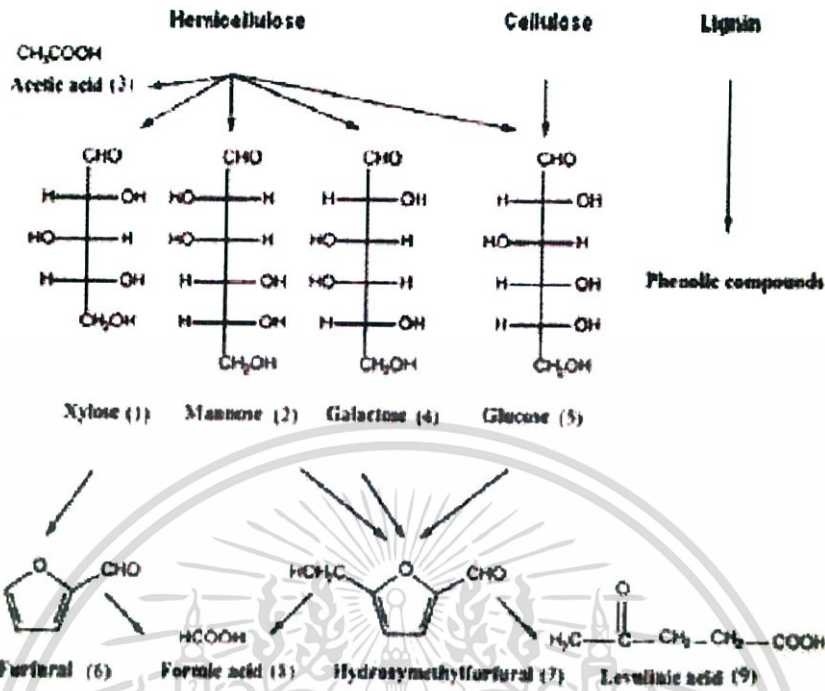
2.5.2.2 exoglucanase หรือ cellobiohydrolase (CBH, 1,4- $\beta$ -D-glucan cellobiohydrolase หรือ EC 3.2.1.91) ย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสโดยการเคลื่อนย้ายหน่วยเซลโลไบโอสจากตำแหน่งอิสระละลาย

2.5.2.3  $\beta$ -glucosidase (EC 3.2.1.21) ไฮโดรไลซ์เซลโลไบโอสเพื่อผลิตกลูโคส

เอนไซม์ 3 กลุ่มหลักของเอนไซม์เซลลูเลสมีจำนวนเอนไซม์ที่ประกอบขึ้นเพื่อช่วยเสริมกันในการไฮโดรไลซ์เอมิเซลลูโลส เช่น glucuronidase, acetylsterase, xylanase,  $\beta$ -xylosidase, galactomannanase และ glucomananase ระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ เซลลูโลสถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์เซลลูเลสเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์ ซึ่งเกิดกระบวนการหมักต่อโดยเชื้อยีสต์ แบคทีเรีย หรือเชื้อรา เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์สุดท้าย

## 2.6 ผลិតภัณฑ์และผลิตภัณฑ์พลอยได้ของการไฮโดรไลซิส (ตรุณวธรณ, 2553)

ผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์พลอยได้ของการไฮโดรไลซิสที่เกิดจากเอมิเซลลูโลสสลายพันธะจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม เช่น น้ำตาลไซโลส น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่น น้ำตาลแมนโนส น้ำตาลกาแลกโตส และน้ำตาลกลูโคส และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส คือ กลูโคส และเมื่อถูกคิงน้ำ (dehydration) จะเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ซึ่งเป็นพิษต่อเซลล์คือ เพอฟูรอล 5-ไฮดรอกซีเมทิลเพอฟูรอล กรดอะซิดิก กรดพอร์มิก และกรดลิวอนิก ดังแสดงในรูปที่ 2.10



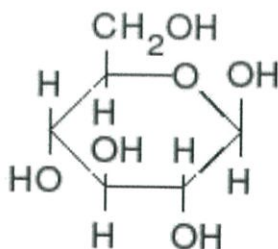
รูปที่ 2.10 การเกิดด้วยยั้งจากส่วนต่าง ๆ ของพืช  
ที่มา: Palmqvist และ Hagerdal (2002)

### 2.6.1 น้ำตาล (Sugar)

น้ำตาลเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีหน่วยเล็กที่สุดซึ่งเรียกตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนที่มีอยู่ เช่น คาร์บอน 5 อะตอม เรียกว่า น้ำตาลเพนโตส และ คาร์บอน 6 อะตอม เรียกว่า น้ำตาลเฮกโซส นอกจากนี้ยังแยกชนิดตามหมู่ของฟังก์ชันของโมโนแซคคาไรด์เป็นอัลดีไฮด์หรือคีโตน กล่าวคือถ้าเป็นอัลดีไฮด์ เช่น กลูโคส เรียกว่า น้ำตาลอัลโดส แต่ถ้าเป็นคีโตน เช่น ฟรุกโตส เรียกว่า น้ำตาลคีโตส โดยในงานวิจัยนี้จะวัดปริมาณน้ำตาลในรูปของน้ำตาลรีดิวซ์

น้ำตาลรีดิวซ์ คือ โมโนแซคคาไรด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนที่ตำแหน่งแอนเออเมอร์ซึ่งถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากโครงสร้างของโมโนแซคคาไรด์เป็นแบบอัลโดสและคีโตส หรือเป็นโครงสร้างแบบวง จึงมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปสายยาว และรูปวงแหวนอยู่ตลอดเวลา โมโนแซคคาไรด์เหล่านี้จึงสามารถแสดงสมบัติของแอลดีไฮด์ และคีโตนได้ ซึ่งเมื่อถูกออกซิไดส์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรด เช่น เมื่อออกซิไดซ์กลูโคสจะได้กรดแอลโดนิกมีชื่อว่า กรดกลูโคนิก ดังนั้นน้ำตาลที่คาร์บอนแอนเออเมอร์ไม่ได้อยู่ในรูปไกลโคไซด์ จึงเรียกว่า น้ำตาลรีดิวซ์ (ดุษฎี, 2550) เช่น น้ำตาลกลูโคส ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 2.11 โครงสร้างของกลูโคส

ที่มา: ดร.ณววรรณ (2553)

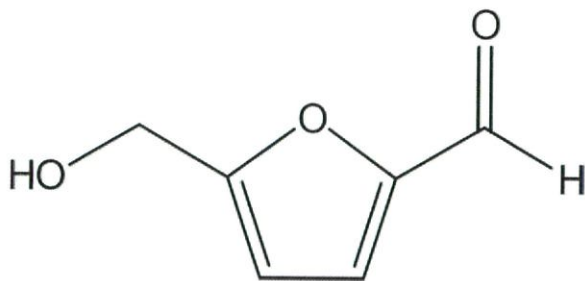
การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หาได้โดยอาศัยคุณสมบัติที่สามารถหารีดิวซ์ของโลหะไอออน เช่น  $\text{Cu}^{2+}$  หรือ  $\text{Ag}^+$  ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำ ตัวอย่างของน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น กลูโคส มอลโตส เซลโลโบไอส และ แลคโตส ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้เนื่องจากอะนอเมอร์คาร์บอนทั้งคู่ถูกจับยึดไว้โดยพันธะไกลโคซิดิก เช่น น้ำตาลซูโครส จัดว่าเป็นน้ำตาล non-reducing

คุณสมบัติในการรีดิวซ์โลหะไอออนนั้น นอกจากจะใช้เพื่อตรวจสอบปริมาณแล้วยังสามารถใช้ในการบอกตำแหน่งทิศทางของหน่วยย่อยคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ได้ ในพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นสายตรง (linear chain) ในหนึ่งโมเลกุลจะมีปลาย reducing end 1 หน่วย (เป็นโมโนแซคคาไรด์ที่มีอะนอเมอร์คาร์บอนอิสระ) และปลายที่เป็น non-reducing end 1 หน่วย ส่วนพอลิแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้าน (branched) ในหนึ่งโมเลกุลจะมีปลายที่เป็น non-reducing end มากมายตามจำนวนกิ่งก้านที่มี แต่จะมีปลาย reducing end เพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น

#### 2.6.2 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล (5-Hydroxymethylfurfural, 5-HMF)

5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอลดีไฮด์ (5-Hydroxymethylfurfural) หรือมีชื่อเรียกทั่วไปว่า 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-ฟูรอลดีไฮด์ (5-Hydroxymethyl-2-furaldehyde) หรือ 5-ไฮดรอกซีเมทิล-2-ฟูแรนคาร์บอลดีไฮด์ (5-Hydroxymethyl-2-furancarbaldehyde) มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยจะมีลักษณะเป็นผลึก มีจุดเดือดอยู่ที่ 115 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 35 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ 79 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.29 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีสูตรทางเคมี คือ  $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_3$  มีน้ำหนักโมเลกุล 126.11 สามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น เมทานอล เอทานอล ไดทิวอีเทอร์ เบนซีน อะซิโตน และ อีทิลอะซิเตต

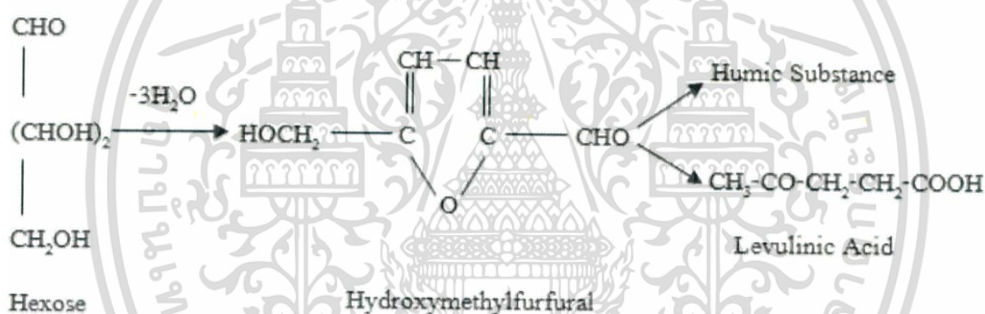
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล

ที่มา: Melo และคณะ (2014)

5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล เกิดจากการถูกดึงน้ำ (dehydration) ออกจากน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.13



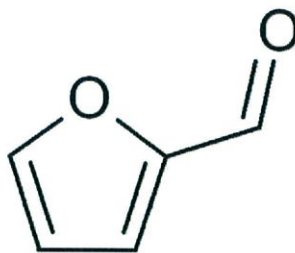
รูปที่ 2.13 การเกิด 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอลจากน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ในสภาวะที่เป็นกรด

ที่มา: ระวีวรรณ (2537)

### 2.6.3 เฟอฟูรอล (Furfural)

เฟอฟูรอล (furfural) หรือมีชื่อเรียกอื่น ๆ คือ ฟูแรน-2-คาร์บอกซอลดีไฮด์ (furan-2-carboxaldehyde), ฟูรอล (fural), เฟอฟูรอลดีไฮด์ (furfuraldehyde), 2-ฟูรอลดีไฮด์ (2-furaldehyde), ไพโรมุซิก แอลดีไฮด์ (pyromucic aldehyde) มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.12 มีคุณสมบัติทางกายภาพ คือ จุดเดือด 161.7 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว คือ -36.5 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟ 62 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 1.16 โดยมีสูตรทางเคมี คือ  $C_5H_4O_2$  มีน้ำหนักโมเลกุล 96.08 สามารถละลายได้ในเมทานอล

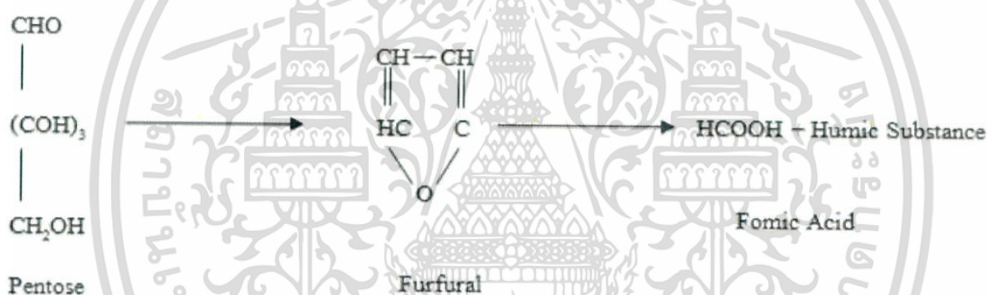
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 สูตรโครงสร้างของเฟอฟูรอล

ที่มา: Danon และคณะ (2013)

เฟอฟูรอลเกิดจากการถุกตั้งน้ำ (dehydration) ออกจากน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.15



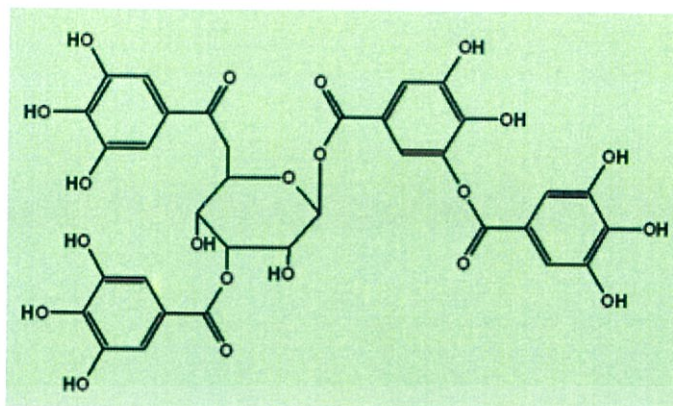
รูปที่ 2.15 การเกิดเฟอฟูรอลจากน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ในสภาวะที่เป็นกรด

ที่มา: ระวีวรรณ (2537)

#### 2.6.4 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นอนุพันธ์ของเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลต่ออยู่เป็นหลัก และอาจมีหมู่แทนที่ต่าง ๆ ในตำแหน่งออร์โท (orto) เมตา (meta) หรือ พารา (para) ได้อีกสารประกอบฟีนอลิกพื้นฐาน คือ ฟีนอลซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเบนซีน 1 วง และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ มีมวลโมเลกุล 94.11 เป็นผลึกรูปเข็ม ไม่มีสี เมื่อโดนอากาศจะมีสีชมพูอ่อน ๆ จุดหลอมเหลว 40.85 องศาเซลเซียส จุดเดือด 182 องศาเซลเซียส และจุดวาบไฟ 79 องศาเซลเซียส สารละลายของฟีนอลเป็นกรดอ่อนโดยมีค่า pKa เท่ากับ 10.0 สารละลายฟีนอลละลายได้ในกลีเซอรอลคาร์บอนไดออกไซด์ไฟต์ แอลกอฮอล์ อีเธอร์ และคลอโรฟอร์ม สามารถวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในรูปของกรดแทนนิก (tannic) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงแหวนเบนซีนดังแสดงในรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของกรดแทนนิก

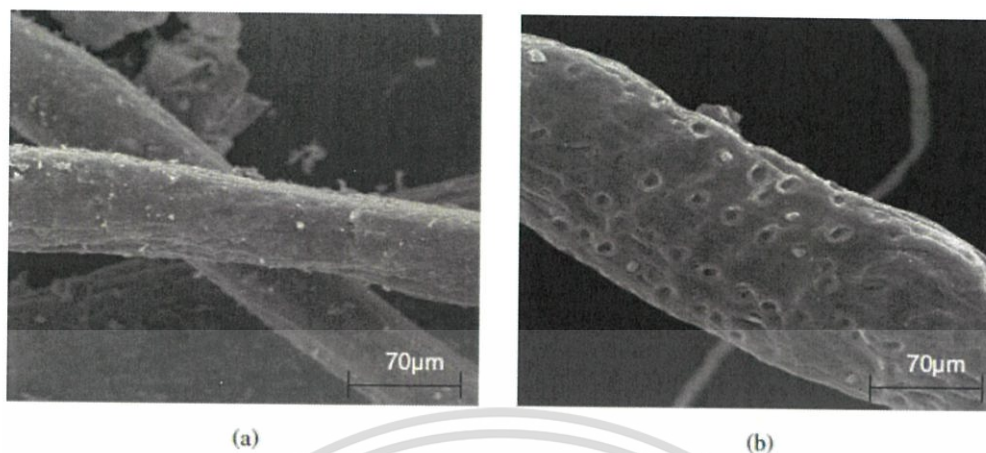
ที่มา: <http://www.phytochemicals.info/phytochemicals/tannic-acid.php> สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2558

หลังจากที่พบว่าผลิตภัณฑ์พลอยได้นั้นมีความเป็นพิษต่อเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำจัดผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นออกเพื่อให้การผลิตเอทานอลนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

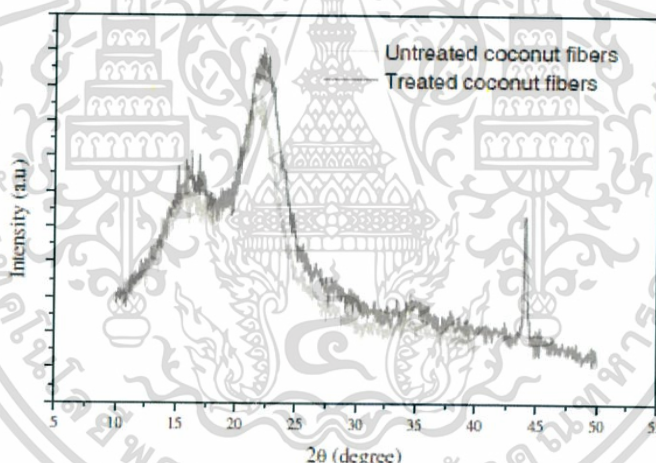
## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mulinari และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของเส้นใยทางธรรมชาติ เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยมะพร้าว โดยขั้นแรกนำส่วนของเส้นใยมะพร้าวไปทำการไล่ความชื้นออก โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการบดและร่อน ให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำเส้นใยมะพร้าวส่วนหนึ่งไปทำการปรับสภาพด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และส่วนหนึ่งไม่ทำการปรับสภาพ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการปรับสภาพจะทำการแยกส่วนที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกาก และนำส่วนที่เป็นกากไปปรับ pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำกลั่น แล้วนำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างของเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพ และไม่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และ x-ray diffractometry ผลจากการศึกษาด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า เส้นใยมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ บริเวณพื้นผิวของวัสดุมีลักษณะขรุขระและมีวัสดุที่ไม่ใช่เซลลูโลสห่อหุ้มอยู่ ในขณะที่เส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพมีการกำจัด wax, pectin, lignin และ hemicellulose ที่บริเวณพื้นผิวเส้นใย เส้นใยมีความหยากกร้านมากขึ้นจึงทำให้เส้นใยสามารถยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ภาพจาก SEM ของเส้นใยมะพร้าว : (a) ไม่ผ่านการปรับสภาพ , (b) ผ่านการปรับสภาพ  
ที่มา: Mulinari และคณะ (2011)



รูปที่ 2.18 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเส้นใยมะพร้าว  
ที่มา: Mulinari และคณะ (2011)

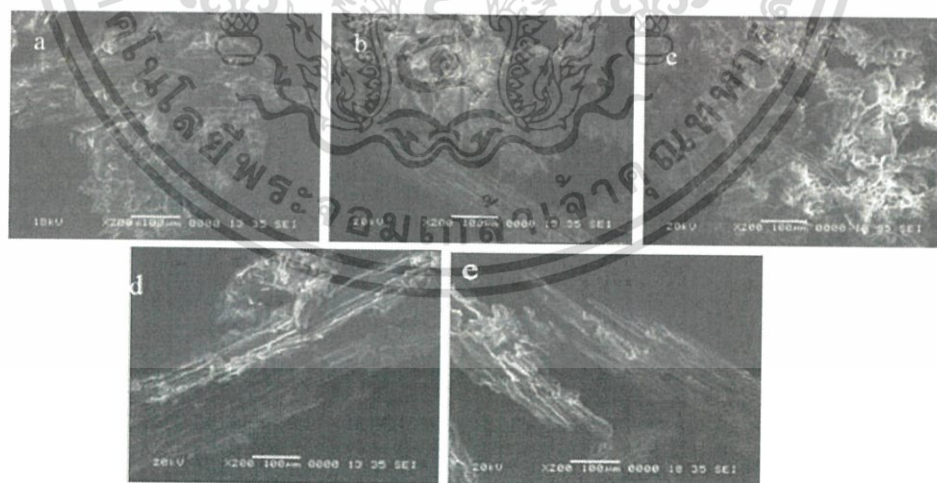
จากภาพแสดงให้เห็น peak ที่ชัดเจน 2 peak คือที่  $2\theta$  เท่ากับ  $15.4^\circ$  และ ที่  $2\theta$  เท่ากับ  $22.5^\circ$  พบว่าดัชนีโครงสร้างผลึก (CI) ที่ได้จากการปรับสภาพ และไม่ปรับสภาพ เท่ากับ 61 เปอร์เซ็นต์ และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นใยมะพร้าว ภายหลังจากการปรับสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Unhasirikul และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกทุเรียนโดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ในการทดลองทำการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.5, 1, 1.5 และ 2 (ปริมาตรต่อปริมาตร) เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที และใช้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส โดยนำเปลือกทุเรียนมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อทำการไล่ความชื้น จากนั้นนำมาร้อนให้มีขนาด 500 ไมครอน และทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริก ด้วยความเข้มข้นและระยะเวลาต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนของเปลือกทุเรียนต่อกรดเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักโดยปริมาตร) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการไฮโดรไลซิส นำกากมาล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของกรด (AHE) ส่วนน้ำที่แยกได้ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS และหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธี phenol sulfuric acid จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลา 45 นาที ของทุกความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (1, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์) จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุด ยกเว้น ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุดในช่วงเวลา 60 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดต่ำที่สุดจะให้ปริมาณน้ำตาลน้อยที่สุด คือ เมื่อใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดต่ำที่สุด และเมื่อใช้ความเข้มข้นกรดสูงสุด คือ กรดไฮโดรคลอริก 2.0 เปอร์เซ็นต์ จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุด โดยได้น้ำตาลรีดิวซ์ 56.07 กรัมต่อลิตร ได้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 59.83 กรัมต่อลิตร จึงสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดมากขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น จากการวิเคราะห์ AHE กรดไฮโดรคลอริกมีสีทึบสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และพบน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์เปลือกทุเรียนด้วยกรดคือ กลูโคส ฟรุคโตส และไซโลส

Du และคณะ (2012) ได้ศึกษาหาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตน้ำตาลจากก้านของต้นทานตะวัน โดยใช้กรดเจือจางดังนี้ กรดซัลฟิวริก, กรดไฮโดรคลอริก, กรดมาลิก และกรดอะซิติก ใช้วัตถุุดิบขนาดแตกต่างกัน คือ 0.125–0.075, 0.188–0.125, 0.250–0.188 และ 0.375–0.205 มิลลิลิตร ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ 0.5, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรต่อปริมาตร อัตราส่วนระหว่างวัตถุุดิบกับปริมาณกรด คือ 1:8, 1:25 และ 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ คือ 30, 60, 90 และ 120 นาที และใช้อุณหภูมิที่ต่างกัน คือ 50, 100 และ 120 องศาเซลเซียส โดยวัดผล 3 วิธี ดังนี้ 1. วิเคราะห์สารประกอบของวัตถุุดิบพบว่าก้านของต้นทานตะวันประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ 2 ส่วน คือ โอลิโกแซคคาไรด์ (57.67±0.4) และลิกนิน (23.11±0.2) ทั้งยังประกอบไปด้วยแก้ว (3.98±0.2) และองค์ประกอบอื่น ๆ (14.35±0.1) 2. วิเคราะห์ผลได้น้ำตาลโดยการไทเทรตด้วย fehling reagent 3. การตรวจสอบโครงสร้างภายหลังกระบวนการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองพบว่ากรดมาลิกให้ผลผลิตน้ำตาลสูงสุด แต่กรดมาลิกมีราคาค่อนข้างสูง จึงมุ่งเน้นการศึกษาไปที่กรดซัลฟิวริก และกรด

ไฮโดรคลอริก พบว่ากรดซัลฟิวริกมีเปอร์เซ็นต์ผลได้น้ำตาลมากกว่ากรดไฮโดรคลอริกเล็กน้อย มีข้อเปรียบเทียบว่า การเคลื่อนย้ายไอออนของกรดซัลฟิวริก เกิดขึ้นได้ง่ายกว่ากรดไฮโดรคลอริก จึงทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลที่มากกว่า จากการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตน้ำตาลจากกากน้ำตาลของต้นทานตะวัน พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อการไฮโดรไลซ์น้ำตาล 5 ปัจจัย โดยแบ่งเป็นข้อ ๆ ดังนี้ 1. ขนาดของวัตถุดิบ พบว่ายิ่งวัตถุดิบมีขนาดเล็กมาก ทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลที่มากขึ้น เนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าเกิดการปฏิกิริยากับกรดได้ดีกว่า แต่ค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลงก็จะมากขึ้นเช่นกัน 2. ความเข้มข้นของกรด พบว่าเมื่อใช้กรดที่มีความเข้มข้นมากขึ้น จะทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลที่มากขึ้นตามไปด้วย 3. อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อกรด พบว่าที่อัตราส่วนยิ่งมากยิ่งขึ้นทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลที่สูงขึ้น แต่หากมากเกินไปอาจทำให้ยับยั้งการเกิดผลผลิตน้ำตาลได้ 4. อุณหภูมิ พบว่าหากใช้อุณหภูมิยิ่งสูงจะทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลมากขึ้น แต่หากใช้อุณหภูมิสูงมากเกินไปผลผลิตน้ำตาลที่ได้จะลดลง เนื่องจากน้ำตาลที่ได้จะเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ จากการศึกษานี้พบว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุด 5. เวลา จากการศึกษานี้พบว่า ที่อุณหภูมิ 0-30 นาทีมีความเหมาะสมที่สุด เพราะหลังจากนี้จะได้ผลผลิตน้ำตาลลดลง เนื่องจากเข้าสู่ช่วงการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่ 2 จากการทดลองสรุปได้ว่าอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อกรด(น้ำหนักโดยปริมาตร) เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตน้ำตาลจากกากน้ำตาลของต้นทานตะวันมากที่สุด และการใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อกรด 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร ระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาล



**รูปที่ 2.19** ภาพจาก SEM ของกากน้ำตาลของต้นทานตะวัน (a) กากน้ำตาลของต้นทานตะวันที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์, (b) ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก, (c) ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยไฮโดรคลอริก, (d) ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดมาลิก และ (e) ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดอะซิติก

ที่มา: Du และคณะ (2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จูลวีร์ และคณะ (2556) ได้ศึกษากระบวนการปรับสภาพของเส้นใยมะพร้าวแก่ด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0, 4, 8 และ 12 โดยใช้เส้นใยมะพร้าวแก่ต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1:10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร ให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยมะพร้าว ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธีของ Van Soest และ Wine (1968) และวิเคราะห์ข้อมูลด้วย โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS เวอร์ชัน 16 ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 0 มีร้อยละปริมาณเซลลูโลส  $44.46 \pm 0.32$ , ร้อยละปริมาณลิกนิน  $25.06 \pm 0.65$ , ร้อยละ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส  $7.66 \pm 0.40$ , ร้อยละปริมาณเถ้า  $0.13 \pm 0.02$ , ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 4 มีร้อยละปริมาณเซลลูโลส  $49.66 \pm 1.00$ , ร้อยละปริมาณลิกนิน  $20.82 \pm 0.35$ , ร้อยละ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส  $2.95 \pm 0.93$ , ร้อยละปริมาณเถ้า  $0.14 \pm 0.01$ , ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 8 มีร้อยละปริมาณเซลลูโลส  $40.60 \pm 0.96$ , ร้อยละปริมาณลิกนิน  $22.13 \pm 0.85$ , ร้อยละ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส  $-3.23 \pm 0.80$ , ร้อยละปริมาณเถ้า  $0.25 \pm 0.05$ , ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 12 มีร้อยละปริมาณเซลลูโลส  $39.05 \pm 0.66$ , ร้อยละปริมาณลิกนิน  $22.31 \pm 0.39$ , ร้อยละ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส  $-1.62 \pm 0.43$ , ร้อยละปริมาณเถ้า  $0.28 \pm 0.01$  เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์แต่ละความเข้มข้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดย พิจารณาความเหมาะสมมากที่สุด จากปริมาณร้อยละเซลลูโลสเนื่องจากเซลลูโลสสามารถผ่าน กระบวนการย่อยสลายไปเป็นน้ำตาลกลูโคสได้มาก พิจารณาจากปริมาณลิกนินเพราะหากมีปริมาณ ลิกนินมากจะส่งผลเสียต่อการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยในเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการ ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 4 มีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และปริมาณลิกนินลดลง ในขณะที่ร้อยละความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 โดยมีมวลต่อปริมาตร ให้อัตราเซลลูโลสมาก แต่ ไม่สามารถกำจัดลิกนินได้ ส่วนที่ร้อยละความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 และ 12 สามารถกำจัด ลิกนินได้มาก แต่ส่งผลให้ปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสลดลงตามไปด้วย จึงแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 โดยมีมวลต่อปริมาตร มีความเหมาะสมในการปรับสภาพ เส้นใยมะพร้าวแก่มากที่สุด

Prado และคณะ (2014) ศึกษาการผลิตน้ำตาลที่ได้จากเส้นใยมะพร้าว เมล็ดองุ่นสกัดไขมัน และเส้นใยปาล์ม โดยวิธีการไฮโดรไลซ์ด้วยวิธี SWH (supercritical water hydrolysis) โดยใช้วัสดุ เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหาร ทั้ง 3 ชนิดข้างต้น เป็นสารตั้งต้นในการไฮโดรไลซ์เพื่อให้ได้ผลผลิต เป็นน้ำตาลที่ได้จากการหมัก การไฮโดรไลซ์จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ด้วยถังขนาด 50 มิลลิลิตร กระบวนการจะใช้อุณหภูมิ 208 องศาเซลเซียส และ 257 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดย กำหนดอัตราการไหลของน้ำที่ 33 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้ความดัน 20 เมกะปาสคาล ปริมาณ ของเหลวของวัตถุดิบและผลผลิตของน้ำตาลรีดิวิจจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยวิธี SWH (supercritical water hydrolysis) คือ เส้นใยมะพร้าว มีผลลิตรีดิวซ์ 11.9 รองลงมาคือ เส้นใยปาล์ม มีผลลิตรีดิวซ์ 11.7 และสุดท้ายคือ เมล็ดตองุ่นสกัดไขมัน มีผลลิตรีดิวซ์ 6.4 โดยเส้นใยมะพร้าว จะให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวสูงที่สุดคือ ร้อยละ 3.4, เส้นใยปาล์มร้อยละ 2.4 และเมล็ดตองุ่นสกัดไขมันร้อยละ 0.7 ในทางตรงกันข้ามมีการเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ ระหว่างกระบวนการซึ่งจะยับยั้งกระบวนการหมักและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะให้ผลผลิตของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่แตกต่างกันในแต่ละวัตถุดิบ ซึ่งการจะใช้การไฮโดรไลซ์ ด้วยวิธี SWH (supercritical water hydrolysis) จึงควรพิจารณาให้เหมาะสมในแต่ละกรณี

Sun และคณะ (2015) ทำการทดลองการปรับสภาพเซลลูโลสโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อเพิ่มผลผลิตน้ำตาลกลูโคสให้สูงขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดโครงสร้างที่เป็นผลึกของเซลลูโลส และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซ์ภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง จากการทดลองใช้เซลลูโลส 0.1 กรัม ในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร ทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิต่ำ โดยค่อย ๆ เติมกรดไฮโดรคลอริก 0.06 โมลาร์ ลงไปผสมอย่างช้า ๆ จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 20 มิลลิลิตร จนสุดท้ายได้ความเข้มข้นของเซลลูโลสเป็น 5 กรัมต่อลิตร และนำไปเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในขั้นตอนการปรับสภาพ จากนั้นนำไปไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที ทำให้เซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนแปลง 54.1 เปอร์เซ็นต์, ผลได้น้ำตาลกลูโคส 36.7 เปอร์เซ็นต์, เปอร์เซ็นต์ glucose selectivity 67.8 และได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดสูงถึง 53.7 เปอร์เซ็นต์ หากในขั้นตอนการปรับสภาพด้วยต่างใช้อุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส จะทำให้เซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยลง คือ 38.2 เปอร์เซ็นต์ และมีผลได้น้ำตาลกลูโคสลดลง คือ 23.9 เปอร์เซ็นต์ และสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสคือ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ทำให้เซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนแปลงมากถึง 93.7 เปอร์เซ็นต์ มีผลได้น้ำตาลกลูโคสสูงสุด คือ 80.9 เปอร์เซ็นต์ หากใช้ระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสเพียง 10 นาที จะทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลกลูโคสน้อยลง และหากใช้อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส จะทำให้น้ำตาลกลูโคสที่ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ และส่งผลให้ได้น้ำตาลไม่มากเท่าที่ควร และผลผลิตของกลูโคสจะขึ้นอยู่กับปริมาณ  $H^+$  ในกรดที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลได้น้ำตาลของเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพ และเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ในการไฮโดรไลซ์ เซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพจะให้ผลผลิตน้ำตาลสูงกว่า คือ 43.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะให้ผลผลิตน้ำตาลเพียง 11.8 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดมากขึ้น การปรับสภาพด้วยต่างเป็นการทำให้เซลลูโลสเกิดการบวมพอง ง่ายต่อการการแลกเปลี่ยนของไอออน  $Cl^-$  และ  $H^+$  ส่งผลให้โครงสร้างคริสตัลเซลลูโลสลดลง และง่ายต่อการไฮโดรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kim และคณะ (2016) ได้ศึกษาเทคนิคการปรับสภาพวัตถุดิบชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส ด้วยต่างเพื่อประโยชน์ต่อการย่อยสลายของเอนไซม์ เนื่องจากโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสที่พบในธรรมชาติมีลักษณะแข็งแรง ทนทานต่อการย่อยสลายของเอนไซม์ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการปรับสภาพด้วยต่าง และใช้สารเคมีหลายชนิดเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบข้อจำกัดต่าง ๆ ของแต่ละสารเคมี รวมทั้งตรวจสอบประสิทธิภาพในการปรับสภาพวัตถุดิบ การปรับสภาพด้วยต่างเป็นวิธีการกำจัดลิกนิน ทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุดิบให้มากขึ้น ส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น การปรับสภาพด้วยต่างเป็นเทคนิคที่สามารถประยุกต์ใช้สารเคมีได้หลากหลายชนิด จากการศึกษาการปรับสภาพด้วยต่างด้วยสารเคมี 4 ชนิด คือ 1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2. โซเดียมคาร์บอเนต 3. สารในกลุ่มแอมโมเนียม และ 4. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5-10.0 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60-180 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดลิกนินได้มากที่สุดสูงถึง 60-80 เปอร์เซ็นต์ และเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่โซเดียมคาร์บอเนต สามารถกำจัดลิกนินได้ 40-60 เปอร์เซ็นต์ เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส 20-40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สารในกลุ่มแอมโมเนียม สามารถกำจัดลิกนินได้ 0-80 เปอร์เซ็นต์ เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเพียง 10-50 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในการปรับสภาพให้ผลการกำจัดลิกนินได้เท่ากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าคือ 20-40 เปอร์เซ็นต์ เห็นได้ชัดว่าการปรับสภาพด้วยต่างเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีฤทธิ์กัดกร่อนน้อยกว่าการใช้กรด โดยเฉพาะโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในสภาวะไม่รุนแรง โดยจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่พันธะระหว่างลิกนินกับเฮมิเซลลูโลส ได้คาร์โบไฮเดรตที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตเป็นพลังงานต่อไปได้ ดังนั้น การปรับสภาพด้วยต่างจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์

- 3.1.1 ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.2 หลอดทดลอง (test tube) บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.3 ที่วางหลอดทดลอง (test tube rack)
- 3.1.4 กระจกฟอยล์
- 3.1.5 ปิเปต (pipettes) บริษัท Precipolar, Germany
- 3.1.6 ลูกยางปิเปต (pipettes bulb)
- 3.1.7 บีกเกอร์ (beaker) บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.8 คิวเวต (cuvette)
- 3.1.9 หลอดหยด (dropper)
- 3.1.10 กรวยบุษเนอริ์ บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.11 พรอทวัดอุณหภูมิ (thermometer) บริษัท R.O.C, Taiwan
- 3.1.12 ตะแกรงร่อน บริษัท Laboratory test sieve, UK

#### 3.2 เครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง รุ่น Adventurer บริษัท OHAUS, USA
- 3.2.2 เครื่องบด บริษัท Shel lab, USA
- 3.2.3 เครื่องบด รุ่น SK100/C Gusseisen, Germany
- 3.2.4 เครื่องผสมสารละลาย (vortex) บริษัท VELP scientifica, Italy
- 3.2.5 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) รุ่น Helios Gamma, Germany
- 3.2.6 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) รุ่น UV-2800A บริษัท Unico, USA
- 3.2.7 ตู้ดูดควัน (hood)
- 3.2.8 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส บริษัท Contherm Scientifica, New Zealand
- 3.2.9 เตาแก๊ส รุ่น Dual burners IG623 บริษัท Imarflex, Thailand
- 3.2.10 โถดูดความชื้น (desiccator) บริษัท Brand, Western-Germany
- 3.2.11 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) บริษัท Hirayama, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.12 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) บริษัท Becthai, Thailand

### 3.3 สารเคมี

3.3.1 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 36 เปอร์เซ็นต์ (HCl) บริษัท Univar, Australia

3.3.2 ฟีนอล (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH) บริษัท PS Panreac, E.U.

3.3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท Univar, Australia

3.3.4 กลูโคส (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) บริษัท Univar, Australia

3.3.5 ดีเอ็นเอส (3,5-Dinitrosalicylic acid; (C<sub>7</sub>H<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)) บริษัท Sigma, USA

3.3.6 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) บริษัท Univar, Australia

### 3.4 วัตถุดิบ

กากมะพร้าวแก่ได้รับความอนุเคราะห์จากรองศาสตราจารย์ สุขใจ ชูจันทร์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร

#### 3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำกากมะพร้าวแก่ผ่านการสับเป็นชิ้นให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นทำการไล่ความชื้นออกจนความชื้นคงที่ โดยการนำไปอบที่ตู้อบอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำการอบอีกครั้งและร่อนให้มีขนาด น้อยกว่า 150, 150–300 และ 300–500 ไมโครเมตร

### 3.5 กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 (จุลวัชร และคณะ, 2556)

การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 โดยทำการชั่งกากมะพร้าวแก่ขนาด น้อยกว่า 150, 150–300 และ 300–500 ไมโครเมตร ที่บดแล้วมา 1 กรัม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 น้ำหนักโดยปริมาตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในฟลาสก์ขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยการใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการแยกส่วนของเหลวกับกากออกจากกันโดยใช้กรวยกรองบุชเนอร์ โดยใช้กระดาษกรอง whatman เบอร์ 2 แล้วนำส่วนกากมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง นำส่วนที่เป็นของเหลวไปทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่าง ๆ

นำกากที่ได้เข้าสู่ขั้นตอนไฮโดรไลซ์โดยใช้ ปริมาณกาบมะพร้าวแก่ต่อกรดไฮโดรคลอริก ที่อัตราส่วน 1:10, 1:20 และ 1:30 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.1, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เวลา 60 , 90 และ 120 นาที โดยที่อัตราส่วน 1:10, 1:20 และ 1:30 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ทำในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956) จึงจะสรุปได้ว่า ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกใด ที่สภาวะใด ให้ผลผลิตเป็นน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด

ตารางที่ 3.1 แสดงการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์โดยวางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3

ความเข้มข้นของกรด ไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	เวลา (นาที)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1:10 ( $c_1$ )	1:20 ( $c_2$ )	1:30 ( $c_3$ )
0.1 ( $a_1$ )	60 ( $b_1$ )	$a_1b_1c_1$	$a_1b_1c_2$	$a_1b_1c_3$
	90 ( $b_2$ )	$a_1b_2c_1$	$a_1b_2c_2$	$a_1b_2c_3$
	120 ( $b_3$ )	$a_1b_3c_1$	$a_1b_3c_2$	$a_1b_3c_3$
0.2 ( $a_2$ )	60 ( $b_1$ )	$a_2b_1c_1$	$a_2b_1c_2$	$a_2b_1c_3$
	90 ( $b_2$ )	$a_2b_2c_1$	$a_2b_2c_2$	$a_2b_2c_3$
	120 ( $b_3$ )	$a_2b_3c_1$	$a_2b_3c_2$	$a_2b_3c_3$
0.4 ( $a_3$ )	60 ( $b_1$ )	$a_3b_1c_1$	$a_3b_1c_2$	$a_3b_1c_3$
	90 ( $b_2$ )	$a_3b_2c_1$	$a_3b_2c_2$	$a_3b_2c_3$
	120 ( $b_3$ )	$a_3b_3c_1$	$a_3b_3c_2$	$a_3b_3c_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 วิธีวิเคราะห์ผล

#### 3.7.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

หลังจากผ่านกระบวนการปรับสภาพและกระบวนการไฮโดรไลซ์ ทำการกรองด้วยกรวยกรองบุชเนอร์โดยจะแยกส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวออกจากกัน โดยส่วนที่เป็นของเหลวจะนำมาปรับพีเอชให้มีสภาพเป็นกลาง แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956)

3.7.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลโดยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956) นำตัวอย่างส่วนที่เป็นของเหลวมาใส่ในหลอดทดลองปริมาณ 1 มิลลิลิตร ส่วนในหลอดทดลองที่เป็นตัวควบคุมจะใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่าง จากนั้นเติมฟินอลปริมาณ 1 มิลลิลิตร แล้วจึงเติมกรดซัลฟิวริกปริมาณ 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer แล้วตั้งทิ้งไว้อีก 20 นาที จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร โดยเทียบความเข้มขึ้นกับกราฟน้ำตาลมาตรฐาน (standard curve)

3.7.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลโดยวิธี DNS (Miller, 1959) นำตัวอย่างส่วนที่เป็นของเหลวมาใส่ในหลอดทดลองปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ส่วนในหลอดทดลองที่เป็นตัวควบคุมจะใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่าง จากนั้นเติม DNS ปริมาณ 1.5 มิลลิลิตร นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer แล้วจึงนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปแช่ในน้ำเย็นทันที หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาณ 3 มิลลิลิตร นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยเทียบความเข้มขึ้นกับกราฟน้ำตาลมาตรฐาน (standard curve)

#### 3.7.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ศึกษาโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 17

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการศึกษาการปรับสภาพกาบมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการทดลองนำกาบมะพร้าวแก่ที่ผ่านการอบแห้งและบดด้วยเครื่องบด ทำการร่อนผ่านตะแกรงร่อนให้มีขนาด 3 ขนาดดังนี้ ขนาดนี้้นน้อยกว่า 150, 150–300 และ 300–500 ไมโครเมตร จากนั้นนำมาทำการปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 (จุลวัชร และคณะ, 2556) โดยใช้อัตราส่วนของกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองแยกส่วนกากและของเหลวออกจากกัน นำส่วนของเหลวไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ว่าที่ขนาดใดให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด

เมื่อทำการทดลองแล้วผลที่ได้พบว่า ขนาดของกาบมะพร้าวแก่ที่ขนาดน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด เมื่อทราบวากาบมะพร้าวแก่ขนาดใดให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด นำมาทำการไฮโดรไลซ์ต่อโดยใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.1, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 60, 90 และ 120 นาที และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อกรดไฮโดรคลอริก 1:10, 1:20 และ 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำส่วนที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่อไป

#### 4.2 การศึกษากระบวนการไฮโดรไลซ์ของกาบมะพร้าวโดยออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3×3×3

ผลการศึกษากระบวนการไฮโดรไลซ์ของกาบมะพร้าวแก่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ โดยออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3×3×3 โดยปัจจัยที่ศึกษาคือความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (0.1, 0.2 และ 0.4 โมลาร์) ระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ (60, 90 และ 120 นาที) และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อกรดไฮโดรคลอริก (1:10, 1:20 และ 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร) ได้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์แสดงผลดังตารางที่ 4.1 และ 4.4 จากนั้นนำข้อมูลของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากกาบมะพร้าวมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS เวอร์ชัน 17 เพื่อศึกษาว่าแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลที่เกิดขึ้นหรือไม่ ดูได้จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงผลดังตารางที่ 4.2 และ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมดโดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3×3×3 ของกาบมะพร้าวแก่

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1 : 10 (c <sub>1</sub> )	1 : 20 (c <sub>2</sub> )	1 : 30 (c <sub>3</sub> )
0.1 (a <sub>1</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	34.82±0.84 <sup>ef</sup>	25.87±1.14 <sup>i</sup>	15.17±0.98 <sup>no</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	32.62±0.75 <sup>f</sup>	27.05±0.88 <sup>hi</sup>	13.77±0.48 <sup>pq</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	38.71±1.00 <sup>d</sup>	30.27±1.41 <sup>g</sup>	19.64±0.44 <sup>kl</sup>
0.2 (a <sub>2</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	42.95±1.45 <sup>c</sup>	19.09±0.90 <sup>kl</sup>	12.67±0.90 <sup>q</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	44.38±0.45 <sup>b</sup>	27.60±0.97 <sup>hi</sup>	14.40±0.33 <sup>o</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	47.00±1.16 <sup>a</sup>	20.88±0.66 <sup>jk</sup>	18.53±1.17 <sup>lm</sup>
0.4 (a <sub>3</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	18.40±1.10 <sup>lm</sup>	17.31±0.25 <sup>m</sup>	15.42±0.24 <sup>no</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	34.51±3.40 <sup>ef</sup>	13.55±1.13 <sup>pq</sup>	11.01±1.03 <sup>r</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	34.78±0.80 <sup>ef</sup>	20.31±0.20 <sup>jk</sup>	10.26±0.34 <sup>s</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

**ตารางที่ 4.2** ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3×3×3

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value
Concentrate	1017.405	2	508.702	429.922	0.000*
Hydrolysis time	250.267	2	125.133	105.754	0.000*
Ratio	6657.998	2	3328.999	2813.453	0.000*
Concentrate × Hydrolysis time	75.325	4	18.831	15.915	0.000*
Concentrate × Ratio	674.995	4	168.749	142.615	0.000*
Hydrolysis time × Ratio	138.451	4	34.613	29.252	0.000*
Concentrate × Hydrolysis time × Ratio	524.639	8	65.580	55.424	0.000*

a. R Square = .993 (Adjusted R Square = .990)

หมายเหตุ : เครื่องหมาย \* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของกระบวนการไฮโดรไลซ์ (ตารางที่ 4.2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักคือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกกับอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์กับอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัย คือความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แสดงว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการทดลองทั้งหมดคิดเป็น 27 ปัจจัย จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 แสดงผลดังตารางที่ 4.1 (ซึ่งมีตัวอักษรภาษาอังกฤษกำกับบอกความแตกต่างหรือไม่แตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) พบว่าสภาวะเหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ คือ การใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก 1 ต่อ 10 กรัมต่อมิลลิลิตร สามารถผลิตน้ำตาลทั้งหมดได้ 47.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีทางสถิติ

ปัจจัย	สภาวะที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์	เซตย่อย	
27	เวลา (นาที)	60	22.4130 <sup>c</sup>
		90	24.3211 <sup>b</sup>
		120	26.7096 <sup>a</sup>
	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:30	14.5415 <sup>c</sup>
		1:20	22.4370 <sup>b</sup>
		1:10	36.4652 <sup>a</sup>
	ความเข้มข้น ของกรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	0.4	19.5070 <sup>c</sup>
		0.1	26.4356 <sup>b</sup>
		0.2	27.5011 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3 ของกาบมะพร้าวแก่

ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1 : 10 (c <sub>1</sub> )	1 : 20 (c <sub>2</sub> )	1 : 30 (c <sub>3</sub> )
0.1 (a <sub>1</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	13.64±0.83 <sup>fg</sup>	10.59±0.35 <sup>hi</sup>	5.47±0.36 <sup>mn</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	16.46±0.21 <sup>de</sup>	10.45±0.28 <sup>hi</sup>	6.65±0.13 <sup>lm</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	15.90±0.44 <sup>e</sup>	13.07±0.64 <sup>fg</sup>	7.21±0.09 <sup>kl</sup>
0.2 (a <sub>2</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	19.30±0.78 <sup>cd</sup>	8.12±0.29 <sup>j</sup>	5.40±0.04 <sup>mn</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	19.79±0.12 <sup>cd</sup>	10.46±0.44 <sup>hi</sup>	6.23±0.11 <sup>lm</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	22.59±0.84 <sup>a</sup>	11.61±0.84 <sup>g</sup>	6.74±0.02 <sup>lm</sup>
0.4 (a <sub>3</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	10.48±0.13 <sup>hi</sup>	7.26±0.09 <sup>kl</sup>	4.66±0.30 <sup>n</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	16.78±0.20 <sup>de</sup>	7.17±0.24 <sup>kl</sup>	5.47±0.26 <sup>mn</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	21.23±1.15 <sup>b</sup>	9.42±0.14 <sup>i</sup>	5.74±0.05 <sup>mn</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

**ตารางที่ 4.5** ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value
Concentrate	80.947	2	40.474	194.128	0.000*
Hydrolysis time	136.086	2	68.043	326.364	0.000*
Ratio	1816.356	2	908.178	4356.002	0.000*
Concentrate × Hydrolysis time	15.906	4	3.976	19.073	0.000*
Concentrate × Ratio	121.063	4	30.266	145.167	0.000*
Hydrolysis time × Ratio	42.692	4	10.673	51.192	0.000*
Concentrate × Hydrolysis time × Ratio	63.697	8	7.962	38.190	0.000*

a. R Square = .995 (Adjusted R Square = .993)

หมายเหตุ : เครื่องหมาย \* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของกระบวนการไฮโดรไลซ์ (ตารางที่ 4.5) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักคือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกกับอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์กับอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แสดงว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการทดลองทั้งหมดคิดเป็น 27 ปัจจัย จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงดังตารางที่ 4.4 (ซึ่งมีตัวอักษรภาษาอังกฤษกำกับบอกความแตกต่างหรือไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95) พบว่าสภาวะเหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่คือ การใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก 1 ต่อ 10 กรัมต่อมิลลิลิตร สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 22.59 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีทางสถิติ

ปัจจัย	สภาวะที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์	เซตย่อย	
27	เวลา (นาที)	60	9.4359 <sup>c</sup>
		90	11.0511 <sup>b</sup>
		120	12.6107 <sup>a</sup>
	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1:30	5.9522 <sup>c</sup>
		1:20	9.7941 <sup>b</sup>
		1:10	17.3515 <sup>a</sup>
	ความเข้มข้น ของกรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	0.4	9.8000 <sup>c</sup>
		0.1	11.0493 <sup>b</sup>
		0.2	12.2485 <sup>a</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับฉัตรสุมาลย์และคณะ (2557) โดยทำการทดลองนำ กาบมะพร้าวแก่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 ทำการบ่มเป็น ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการปรับให้เป็นกลางโดยใช้น้ำกลั่นแยก ส่วนกากและส่วนที่เป็นของเหลวออกจากกัน นำส่วนที่เป็นกากมาทำการไฮโดรไลซ์ต่อโดยใช้กรด ซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 0.1, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 60, 90 และ 120 นาที และอัตราส่วนระหว่างกากมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 1:10, 1:20 และ 1:30 กรัมต่อ มิลลิลิตร โดยตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 คือการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3×3×3 และได้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) แสดงดังตาราง

**ตารางที่ 4.7** ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมดโดยการ ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3×3×3 ของกากมะพร้าวแก่

ความเข้มข้นของกรด ซัลฟิวริกที่ใช้ (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1 : 10 (c <sub>1</sub> )	1 : 20 (c <sub>2</sub> )	1 : 30 (c <sub>3</sub> )
0.1 M (a <sub>1</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	13.17±0.17 <sup>lm</sup>	6.17±0.24 <sup>p</sup>	4.33±0.73 <sup>rs</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	35.48±3.35 <sup>d</sup>	17.78±0.27 <sup>jk</sup>	12.50±3.83 <sup>mn</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	49.33±5.20 <sup>a</sup>	43.04±0.62 <sup>c</sup>	25.33±3.02 <sup>i</sup>
0.2 M (a <sub>2</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	10.00±0.62 <sup>no</sup>	5.83±0.97 <sup>qr</sup>	4.00±0.67 <sup>rs</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	33.70±7.21 <sup>e</sup>	17.23±0.66 <sup>jk</sup>	10.78±0.22 <sup>no</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	44.66±1.58 <sup>b</sup>	30.66±0.38 <sup>f</sup>	17.33±8.16 <sup>jk</sup>
0.4 M (a <sub>3</sub> )	60 (b <sub>1</sub> )	9.83±0.83 <sup>op</sup>	5.16±1.19 <sup>qr</sup>	3.50±1.20 <sup>t</sup>
	90 (b <sub>2</sub> )	28.60±2.56 <sup>s</sup>	12.22±0.22 <sup>mn</sup>	9.66±0.28 <sup>op</sup>
	120 (b <sub>3</sub> )	27.33±3.48 <sup>h</sup>	14.66±2.30 <sup>k</sup>	13.00±8.54 <sup>lm</sup>

**หมายเหตุ :** ตัวอักษรภาษาอังกฤษในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05)

**ที่มา :** ฉัตรสุมาลย์ และคณะ (2557)

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3 ของกาบมะพร้าวแก่

ความเข้มข้นของกรด ซัลฟิวริกที่ใช้ (โมลาร์)	เวลา (นาทีก)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1 : 10 ( $c_1$ )	1 : 20 ( $c_2$ )	1 : 30 ( $c_3$ )
0.1 M ( $a_1$ )	60 ( $b_1$ )	9.62±0.49 <sup>hi</sup>	5.01±0.18 <sup>jk</sup>	3.10±0.32 <sup>lm</sup>
	90 ( $b_2$ )	15.64±3.85 <sup>c</sup>	9.92±2.67 <sup>hi</sup>	6.41±1.64 <sup>ij</sup>
	120 ( $b_3$ )	29.51±0.32 <sup>a</sup>	12.63±2.42 <sup>e</sup>	6.91±1.83 <sup>ij</sup>
0.2 M ( $a_2$ )	60 ( $b_1$ )	6.61±0.35 <sup>jk</sup>	4.41±0.05 <sup>kl</sup>	3.00±0.67 <sup>lm</sup>
	90 ( $b_2$ )	13.53±3.42 <sup>d</sup>	9.82±0.98 <sup>hi</sup>	4.81±0.05 <sup>kl</sup>
	120 ( $b_3$ )	16.64±5.46 <sup>b</sup>	10.82±5.41 <sup>g</sup>	5.21±1.15 <sup>jk</sup>
0.4 M ( $a_3$ )	60 ( $b_1$ )	6.51±0.41 <sup>ij</sup>	4.21±0.53 <sup>kl</sup>	2.30±0.27 <sup>m</sup>
	90 ( $b_2$ )	11.13±4.64 <sup>fg</sup>	6.41±0.24 <sup>ij</sup>	3.50±0.10 <sup>lm</sup>
	120 ( $b_3$ )	11.43±0.04 <sup>fg</sup>	6.81±0.43 <sup>ij</sup>	4.11±0.41 <sup>kl</sup>

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ที่มา : ฉัตรสุมาลย์ และคณะ (2557)

จากผลการทดลองของฉัตรสุมาลย์และคณะ (2557) พบว่าสภาวะเหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ คือ การใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนของกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 1 ต่อ 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) สามารถผลิตน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 49.33 และ 29.51 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันพบว่า สภาวะเหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ของกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกมีความแตกต่างกัน โดยการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก มีสภาวะเหมาะสมที่สุด คือ การใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนของกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 1 ต่อ 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) สามารถผลิตน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 47.00 และ 22.59 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้กรดซัลฟิวริกในการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกในการไฮโดรไลซ์กาบมะพร้าวแก่ ทั้งนี้เป็นเพราะการเคลื่อนย้ายไอออนของกรดซัลฟิวริก เกิดขึ้นได้ง่ายกว่ากรดไฮโดรคลอริก จึงทำให้ได้ผลผลิตน้ำตาลที่สูงกว่า (Du และคณะ, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกาบมะพร้าวแก่ โดยการปรับสภาพใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากการปรับสภาพจึงนำกาบมะพร้าวแก่ที่ได้ไปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซ์ และออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล  $3 \times 3 \times 3$  โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์ กาบมะพร้าวแก่ คือ การใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก 1 ต่อ 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์คือ 120 นาที ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเป็น  $47.00 \pm 1.16$  มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และนอกจากนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์คือ การใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างกาบมะพร้าวแก่ต่อปริมาณกรดไฮโดรคลอริก 1 ต่อ 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์คือ 120 นาที ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์  $22.59 \pm 0.84$  มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตน้ำตาลทั้งหมดและการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ที่สภาวะเดียวกันและมีความสอดคล้องกัน

## เอกสารอ้างอิง

- จุลวัชร คงแท่น, บดินทร์ เนียมมนคร และวีรพันธุ์ ไม้แก้ว. 2556. การผลิตกลูโคสจากเส้นใยมะพร้าว โดยกระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด. โครงการงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฉัตรสุมาลย์ วัฒนศรี, ซาลิสสา สุขสบาย และปาริฉัตร ใจแสน. 2557. การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จาก กาบมะพร้าวโดยกระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด. โครงการงานพิเศษตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดร.ณรรณ ชื่นบุปผา. 2553. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเปลือกกล้วยน้ำว้า และการกำจัดสารพิษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ดุขฎี อดุภาพ. 2550. Carbohydrate Technology. สาขาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากร ชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์. 2558. กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุ เหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University ISSN 2408-1248. 2(1) เดือน มกราคม- มิถุนายน.
- ระวีวรรณ แก้วกล้า. 2537. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วนิดา ปานอุทัย, นิคม แผลมสัก, สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล, วิรัตน์ วาณิชศรีรัตน และประมุข ภาระกุลสุทธิดิษฐ์. 2553. “การผลิตเอทานอลจากไม้ยูคาลิปตัสโดยกระบวนการย่อยเป็น น้ำตาล และหมักพร้อมกัน.” หน้า 392-400. ใน การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วาสนา วงษ์ใหญ่. 2525. มะพร้าว. พฤษศาสตร์พืชเศรษฐกิจ. ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรม การเกษตรแห่งชาติ มก. วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม : 118-126.
- วิเชียร รัตนพุกษ์. เอกสารวิชาการ เรื่องการปลูกมะพร้าว. สถานีกลีกรมสวี่ กรมวิชาการ เกษตร : 2-8 (โรเนียว).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- เวสารัช สุนทรชัยบูรณ์ และ รัชพล พะวงศ์รัตน์. 2555. การปรับสภาพผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) และจอก (*Pistia stratiotes* L.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับต่าง และกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์เพื่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์. *Sakon nakon graduate studies Journal*. 10(45) : 173-184.
- เวสารัช สุนทรชัยบูรณ์ และ รัชพล พะวงศ์รัตน์. 2556. การใช้ประโยชน์วัสดุพุงจากขยะธรรมชาติ สำหรับการตรึงเซลล์ และประยุกต์ใช้ในการผลิตเอทานอล. *Veridian E-Journal Silpakorn University*. 6(1) : 795-807.
- สุขใจ ชูจันทร์. 2554. การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มวลชีวภาพ. สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- สงวนศักดิ์ ศรีพลั้ง<sup>1</sup>, อมรรัตน์ วงษ์กลม<sup>1</sup> และเกศินี จันทร์โสภณ<sup>2</sup>. 2557. การใช้ประโยชน์จากชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อผลิตเอทานอล. <sup>1</sup>สาขาวิชาเคมี. <sup>2</sup>สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.
- สุภาวดี ผลประเสริฐ. 2557. การปรับสภาพวัตถุดิบพวกกลีโคเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล. **บทความวิชาการ**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อรุณี ศุภสินสาธิต. 2555. พลังงานจากชีวมวลที่มีกลีโคเซลลูโลสสูง. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 16(2) : 36-43.
- Altintas, M.M., U lgen K.O., Kirdar, B. O., nsan, Z.I. and Oliver, S.G. 2002. Improvement of ethanol production from starch by recombinant yeast through manipulation of environmental factors. *Enzyme Microb Technol*. 31 : 640–647.
- Alvira., P.E. Tomas-Pejo., M. Ballesteros. and M.J. Nergro. 2010. Pretreatment technology for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis : A review. *Bioresource Technol*. 101: 4851-4861.
- Bastawde, K.B. 1992. Xylan structure, microbial xylanases and their mode of action. *World Journal of Microbiology and Biotechnol*. 8 : 355-368.
- Basu, G., Mishra, L., Jose, S. and Samanta, A.K., 2015. Accelerated retting cum softening of coconut fibre. *Industrial Crops and Products*. 77 : 42-48.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- Browning, B.L. 1963. Method in wood chemistry. **Interscience Publishers**, New York, London.
- Cheng, K.K., Zhang J.A., Ping W.X., Ge J.P., Zhou Y.J., Ling H.Z. and Xu J.M. 2008. Sugarcane Bagasse Mild Alkaline/Oxidative Pretreatment for Ethanol Production by Alkaline Recycle Process. **Biochem Biotechnol.** 151 : 43-50.
- Child, R. 1964. Coconuts. **Tropical Agriculture Series.** Longman Group Ltd. London.
- Clark, T.A. and Mackie, K.L. 1987. Steam explosion of the soft-wood. *Pinus radiata* with sulphurdioxide addition. I. Process optimization. **J. Wood Chem. Technology.** 7 : 373-403.
- Danon, B., Marcotullio, G. and Jong, W. 2013. Mechanistic and kinetic aspects of pentose dehydration towards furfural in aqueous media employing homogeneous catalysis. **Royal society of chemistry.** 16 : 39-54.
- Du, W., Ren, X., Xu, M. and Zhou, A. 2012. Influencing factors in hydrolysis of sunflower stalks by using dilute acid. **Energy Procedia.** 17: 1468-1475.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugar and related substance. **Analytical Chemistry.** 28 : 350-356.
- Duff, S.J.B. and Murray, W. D. 1996. Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review. **Bioresource Technology.** 55 : 1-33.
- Eriksson, K.E.L. 1990. Biotechnology in the pulp and paper industry. **Wood Science and Technology.** 24 : 79-101
- Eriksson, K.E.L., Blanchette, R.A. and Ander P. 1990. Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Component. **Springer Verlag.** Berlin. 407.
- Hamelinck, C. N., van Hooijdonk, G., and Faaij, A. P. 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short, middle, and long term. **Biomass and Bioenergy.** 28(4) : 384-410.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- Keshwani, D.R. 2009. **Microwave pretreatment of switchgrass for bioethanol production.** Thesis Dissertation. North Carolina State University.
- Kim, J.S., Lee, Y.Y. and Kim, T.H. 2016. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology.** 199 : 42-48.
- Kim, T.H., Taylor, F. and Hicks, K.B. 2008. Bioethanol Production from Barley Hull Using SSA (Soaking in Aqueous Ammonia) Pretreatment. **Bioresource Technology.** 99 : 5694-5702.
- Kumar, S., Singh, S.P., Mishra, I.M. and Adhikari, D.K. 2011. Continuous ethanol production by *Kluyveromyces sp.* IIPE453 immobilized on bagasse chips in packed bed reactor, **Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels.** 2(1) : 1-6.
- Lee, J.S., Parameswaran, B., Lee, J.P. and Park, S.C. 2008. Recent Developments of Key Technologies on Cellulosic Ethanol Production. **Journal of Scientific and Industrial Research.** 67: 865-873.
- McMillan, J.D. 1994. Pretreatment of lignocellulosic biomass. In:Himmel, M.E., Baker, J.O., Overend, R.P. (Eds.), **Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production.** American Chemical Society. Washington DC : 292-324.
- Melo, F.C., Souza, R.F., Coutinho, P.L. and Souza, M.O. 2014. Synthesis of 5-Hydroxymethylfurfural from Dehydration of Fructose And Glucose Using Ionic Liquids. **Journal of the Brazilian Chemical Society.** Print version ISSN 0103-5053.
- Miller, G.L. 1959. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Anal chem.** 31 : 426-428.
- Mishima, D., M. Tateda., M. Ike and M. Fujita. 2006. Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. **Bioresource Technology.** 97(16) : 2166-2172.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M. and Ladisch, M. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**. 96: 673-686.
- Mulinari, D.R., Baptista, C.A.R.P., Souza, J.V.C. and Voorwald, H.J.C. 2011. Mechanical Properties of Coconut Fibers Reinforced Polyester Composites. **Procedia Engineering**. 10 : 2074–2079.
- Mussatto, S.I., Dragone, G. and Roberto, I.C. 2005. Influence of the toxic compounds present in brewer's spent grain hemicellulosic hydrolysate on xylose-to-xylytol bioconversion by *Candida guilliermondii*. **Process Biochem**. 40 : 3801–3806.
- Ogbonna, J.C., Mashima, H. and Tanaka, H. 2001. Scale up of fuel ethanol production from sugar beet juice using loofa sponge immobilized bioreactor. **Bioresources Technology**. 76 : 1-8.
- Palmqvist, E. and Hahn Hagerdal, B. 2002. Fermentation of Lignocel-lulosic Hydrolysates.I: Inhibition and Detoxification. **Bioresource Technology**. 74: 17-24.
- Prado, J.M., Forster-Carneiro T., Rostagno, M.A., Follegatti-Romero, L.A., Filho, F.M. and Meireles, A.A. 2013. Obtaining sugars from coconut husk, defatted grape seed, and pressed palm fiber by hydrolysis with subcritical water. **The Journal of Supercritical Fluids**. 89 : 89-98.
- Purseglove, J.W. 1972. Tropical Crops : **Monocotyledons**. Vol.1 and 2 combined. Longman Group Ltd. 453-460.
- Ragg, P. L. and Fields, P.R. 1987. The development of a process for the hydroysis of lignocellulosic waste. **Phil Trans R Soc Lond A321** : 537-547.
- Silverstein, R.A., Chen, Y., Sharma-Shivappa, R.R., Boyette, M.D. and Osborne, J. 2007. A comparison of chemical pre-treatment methods for improving saccharification of cotton stalks. **Bioresource Technology**. 98 : 3000-3011.

## เอกสารอ้างอิง

- Slininger, P.J., Bothast, R.J., Van Cauwenberge, J.E. and Kurtzman, C.P. 1982. Conversion of xylose to ethanol by the yeast *Pachysolen tannophilus*. **Biotechnology**. Bioeng. 24 : 371-384.
- Sreenath, H.K., Koegel, R.G., Moldes, A.B., Jeffrie, T.W. and Straub, R.J. 2001. Ethanol Production from Alfalfa Fiber Fraction by Saccharification and Fermentation. **Proc. Biochem.** 36 : 1199-1204.
- Sun, B., Peng, G., Duan, L., Xu, A. and Li, X., 2015. Pretreatment by NaOH swelling and then HCl regeneration to enhance the acid hydrolysis of cellulose to glucose. **Bioresource Technology**. 196 : 454-458.
- Sun, Y. and Cheng, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for bioethanol production: review. **Bioresource Technology**. 83 : 1-11.
- Unhasirikul, M., Naranong, N. and Narkrugs, W. 2012. Reducing Sugar Production from Durian Peel by Hydrochloric Acid Hydrolysis. **International Journal of Biological. Biomolecular. Agricultural, Food and Biotechnological Engineering**. 6(9) : 708-713.
- Wright, J.D. 1998. Ethanol from biomass by enzymatic hydrolysis. **Chem Eng Prog**; 84: 62-74.
- Yachmenev, V., Condon, B., Klasson, T. and Lambert, A. 2009. Acceleration of enzymatic hydrolysis of corn stover and sugar cane bagasse by low intensity uniform ultrasound. **J. Biobased Mater. Bioenergy**. 3 : 25-31.
- Yudkin, M. and Offord, R. 1973. *Comprehensive biochemistry*. American ed, **Biochemistry Bibliography** : 547-550.
- Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Wang, C., Yu, F., Jin, S., Ding, Y., Chi, R., Liao, J. and Zhang, Y. 2006. Comparison of three microwave / chemical pretreatment process for enzymatic hydrolysis of rice straw. **Biosyt. Eng.** 93 : 279-283.
- ชมรมคนรักการถ่ายภาพ. “ลูกมะพร้าว”. [Online]. Available : <http://www.klongdigital.com/webboard3/27570.html>. สืบค้นวันที่ 24 ธันวาคม 2558

## เอกสารอ้างอิง

Food Network Solution. “องค์ประกอบภายในของลูกมะพร้าว”. [Online]. Available :  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3103/exocarp>. สืบค้นวันที่  
 24 ธันวาคม 2558

Phytochemicals. “Tannic acid.” [Online]. Available :  
<http://www.phytochemicals.info/phytochemicals/tannic-acid.php>. สืบค้นวันที่  
 24 เมษายน 2016



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์

#### 1. การวิเคราะห์น้ำตาลด้วยวิธีฟินอล - ซัลฟิวริก (Dubois, 1956)

##### 1.1 อุปกรณ์

- 1.1.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง
- 1.1.2 เครื่องผสมสารละลาย
- 1.1.3 คิวเวตแก้ว
- 1.1.4 ปีเปิด
- 1.1.5 ลูกยาง
- 1.1.6 หลอดทดลอง

##### 1.2 สารเคมี

- 1.2.1 กรดซัลฟิวริก (reagent grade 95.5%, specific gravity 1.84)
- 1.2.2 ฟีนอลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งฟีนอล 5 กรัมแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร
- 1.2.3 สารละลายกลูโคสมาตรฐาน เตรียมโดยชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 1000 มิลลิลิตร ได้สารละลายกลูโคสเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังตารางที่ 1

##### 1.3 วิธีการวิเคราะห์

- 1.3.1 ปีเปิดสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายกลูโคสมาตรฐานปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายฟีนอลร้อยละ 5 ลงไป 1 มิลลิลิตร
- 1.3.2 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 5 มิลลิลิตร ลงไปอย่างรวดเร็ว โดยปล่อยกรดลงไปที่ผิวหน้าของของเหลวโดยตรง จะทำให้การผสมกันเกิดได้ดีกว่าการปล่อยลงที่ข้างหลอด
- 1.3.3 ตั้งหลอดทดลองของสารผสมนี้ไว้เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเขย่าแล้วนำมาบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 25–30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-20 นาที
- 1.3.4 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร
- 1.3.5 นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส (รูปที่ 1) เพื่อหาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง หรือคำนวณได้จาก

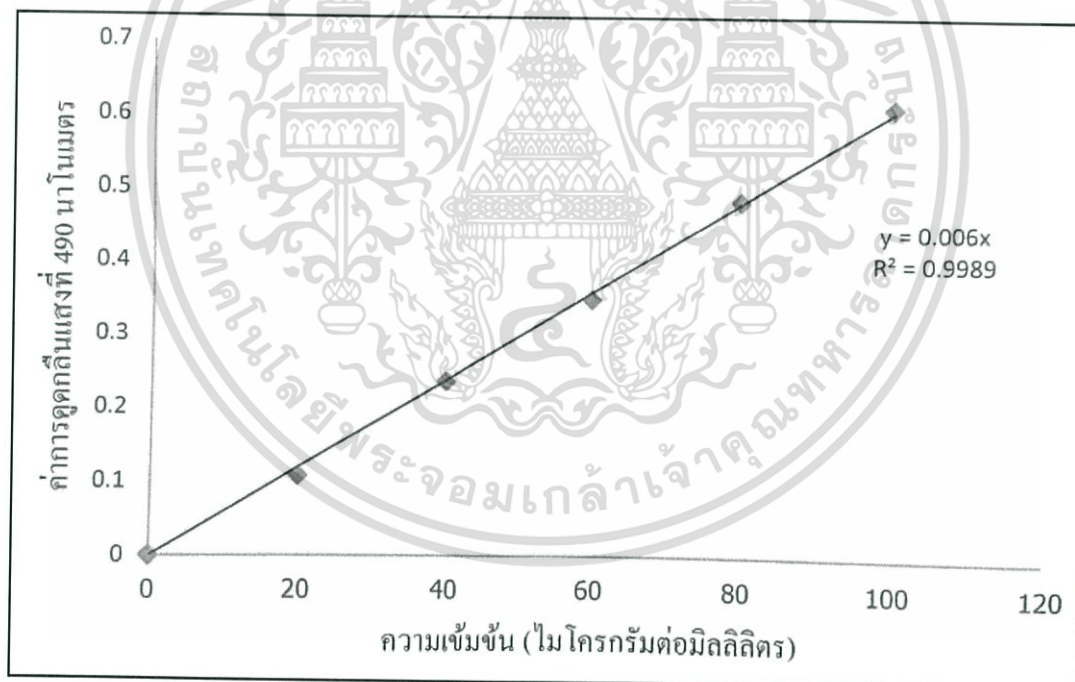
$$\text{ความเข้มข้นของกลูโคส(กรัมต่อลิตร)} = \frac{(\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ } 490 \text{ นาโนเมตร}) \times \text{อัตราการเจือจาง}}{\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน} \times 1000}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0–100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

หลอดที่	สารละลายกลูโคส (0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	สารละลายกลูโคสมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	0	10	0
2	2	8	20
3	4	6	40
4	6	4	60
5	8	2	80
6	10	0	100

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) และค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร



รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีเอ็นเอส (Miller, 1959)

### 2.1 อุปกรณ์

- 2.1.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง
- 2.1.2 เครื่องผสมสารละลาย
- 2.1.3 คิวเวตแก้ว
- 2.1.4 ปีเปิด
- 2.1.5 ลูกยาง
- 2.1.6 หลอดทดลอง

### 2.2 สารเคมี

2.2.1 DNS เตรียมโดยชั่ง 3,5-dinitrosalicylic acid 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ที่ละน้อย (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 16 กรัมละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร) คนจนสารละลายใส จากนั้นเติมโพแทสเซียมทาร์เทรต 300 กรัมที่ละน้อย จากนั้นทำการปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

2.2.2 สารละลายกลูโคสมาตรฐาน เตรียมโดยชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร ได้สารละลายกลูโคสเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 1.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังตารางที่ 2

### 2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ปีเปิดสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายกลูโคสมาตรฐานปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายกรดไดโนโตรซาลิไซลิก 3 มิลลิลิตร

2.3.2 นำไปต้มในน้ำกลั่น 5 นาที

2.3.3 ทำให้เย็นทันที และเติมน้ำกลั่น 6 มิลลิลิตร

2.3.4 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร

2.3.5 นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส (รูปที่ 2) เพื่อหาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง หรือคำนวณได้จาก

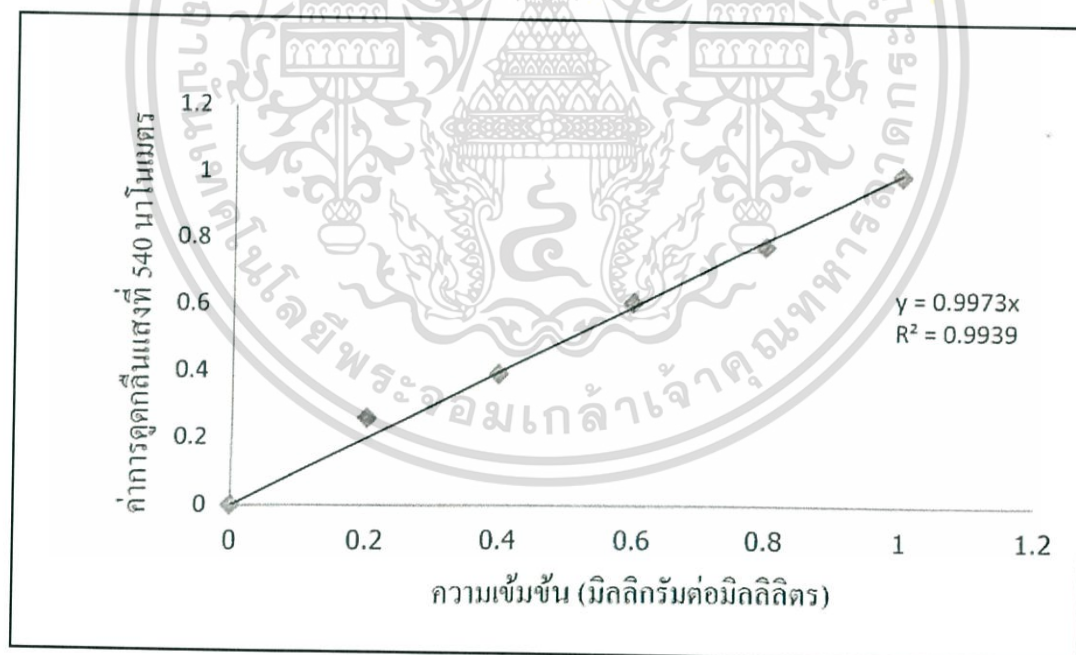
$$\text{ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)} = \frac{(\text{ค่าการดูดกลืนแสง } 540 \text{ นาโนเมตร}) \times \text{อัตราการเจือจาง}}{\text{ความชันกราฟมาตรฐาน}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0 - 1.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

หลอดที่	สารละลายกลูโคส (1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	สารละลายกลูโคสมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	0	10	0
2	2	8	0.2
3	4	6	0.4
4	6	4	0.6
5	8	2	0.8
6	10	0	1.0

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกลูโคส (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) และค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร



รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธี DNS (Miller, 1959)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การวิเคราะห์หาขนาดของกาบมะพร้าวแก่ที่ให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ภายหลังกระบวนการปรับสภาพ

ตารางที่ 3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการปรับสภาพ

ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ซ้ำที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร (เจือจางที่ 10 เท่า)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร (เจือจางที่ 30 เท่า)
น้อยกว่า 150	1	1.758	0.784
	2	1.749	0.728
	3	1.734	0.703
150 - 300	1	1.185	0.635
	2	1.299	0.633
	3	1.242	0.636
300 - 500	1	1.239	0.477
	2	0.972	0.465
	3	1.435	0.520

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.784+0.728+0.703}{3} = 0.738$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.635+0.633+0.636}{3} = 0.635$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.477+0.465+0.520}{3} = 0.487$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการปรับสภาพ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

1. ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.738 \times 200}{0.006 \times 1000} = 24.60$
2. ขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.635 \times 200}{0.006 \times 1000} = 21.17$
3. ขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.487 \times 200}{0.006 \times 1000} = 16.23$

ตารางที่ 4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ซ้ำที่	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด 1 : 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร)	
				ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร (เจือจางที่ 200 เท่า)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร (เจือจางที่ 400 เท่า)
0.2	120	น้อยกว่า 150	1	1.453	0.693
			2	1.489	0.725
			3	1.463	0.697
		150 - 300	1	1.211	0.648
			2	1.216	0.640
			3	1.264	0.644
		300 - 500	1	1.144	0.611
			2	1.047	0.567
			3	1.131	0.553

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.693 + 0.725 + 0.697}{3} = 0.705$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.648 + 0.640 + 0.644}{3} = 0.644$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.611 + 0.567 + 0.553}{3} = 0.577$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

1. ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.705 \times 400}{0.006 \times 1000} = 47.00$
2. ขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.644 \times 400}{0.006 \times 1000} = 42.93$
3. ขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.577 \times 400}{0.006 \times 1000} = 38.47$

เมื่อรวมกับปริมาณน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการปรับสภาพ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

1. ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $47.00 + 24.60 = 71.6$
2. ขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $42.93 + 21.17 = 64.10$
3. ขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $38.47 + 16.23 = 54.70$

ตารางที่ 5 ตารางสรุปค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยเฉลี่ยภายหลังกระบวนการปรับสภาพและกระบวนการไฮโดรไลซ์

ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการปรับสภาพ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการปรับสภาพ + ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
น้อยกว่า 150	24.60	47.00	71.6
150 - 300	21.17	42.93	64.10
300 - 500	16.23	38.47	54.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การวิเคราะห์หาขนาดของกาบมะพร้าวแก่ที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ภายหลังกระบวนการปรับสภาพ

ตารางที่ 6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลรีดิวซ์ภายหลังกระบวนการปรับสภาพ

ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ซ้ำที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร (เจือจางที่ 10 เท่า)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร (เจือจางที่ 30 เท่า)
น้อยกว่า 150	1	1.318	0.487
	2	1.478	0.458
	3	1.398	0.473
150 - 300	1	0.925	0.240
	2	0.966	0.218
	3	0.946	0.229
300 - 500	1	0.726	0.150
	2	0.677	0.101
	3	0.797	0.165

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.487+0.458+0.473}{3} = 0.473$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.240+0.218+0.229}{3} = 0.229$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.150+0.101+0.165}{3} = 0.139$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำตาสรีดิวซ์ภายหลังกระบวนการปรับสภาพ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

1. ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.473 \times 30}{0.9973} = 14.23$
2. ขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.229 \times 30}{0.9973} = 6.89$
3. ขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.139 \times 30}{0.9973} = 4.18$

ตารางที่ 7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาสรีดิวซ์ภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์

ความเข้มข้น กรดไฮโดร คลอริกที่ใช้ (โมลาร์)	เวลา (นาท)	ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ซ้ำที่	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด 1 : 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร)	
				ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร (เจือจางที่ 10 เท่า)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร (เจือจางที่ 30 เท่า)
0.2	120	น้อยกว่า 150	1	2.359	0.759
			2	2.465	0.720
			3	2.453	0.774
		150 - 300	1	2.164	0.562
			2	2.001	0.635
			3	2.083	0.599
		300 - 500	1	2.126	0.580
			2	2.238	0.572
			3	1.806	0.528

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.759 + 0.720 + 0.774}{3} = 0.751$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.562 + 0.635 + 0.599}{3} = 0.599$$

ค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร

$$= \frac{0.580 + 0.572 + 0.528}{3} = 0.560$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

1. ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.751 \times 30}{0.9973} = 22.59$
2. ขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.599 \times 30}{0.9973} = 18.02$
3. ขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $\frac{0.560 \times 30}{0.9973} = 16.85$

เมื่อรวมกับปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

1. ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $22.59 + 14.23 = 36.82$
2. ขนาดตัวอย่าง 150 - 300 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $18.02 + 6.89 = 24.91$
3. ขนาดตัวอย่าง 300 - 500 ไมโครเมตร ความเข้มข้นกลูโคส =  $16.85 + 4.18 = 21.03$

**ตารางที่ 8** ตารางสรุปค่าปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์โดยเฉลี่ยภายหลังกระบวนการปรับสภาพและกระบวนการไฮโดรไลซ์

ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ภายหลังกระบวนการปรับสภาพ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ภายหลังกระบวนการปรับสภาพ + ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
น้อยกว่า 150	14.23	22.59	36.82
150 - 300	6.89	18.02	24.91
300 - 500	4.18	16.85	21.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

## 1. น้ำตาลทั้งหมด

1.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ

น้ำตาลทั้งหมด

Duncan<sup>a,b</sup>

อัตราส่วน	N	Subset		
		1	2	3
60 นาที	27	22.4130 <sup>c</sup>		
90 นาที	27		24.3211 <sup>b</sup>	
120 นาที	27			26.7096 <sup>a</sup>
Sig.		1.000	1.000	1.000

Mean for groups in homogeneous subsets are displayed

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 27.00

1.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่อัตราส่วนต่าง ๆ

น้ำตาลทั้งหมด

Duncan<sup>a,b</sup>

อัตราส่วน	N	Subset		
		1	2	3
1:30	27	14.5415 <sup>c</sup>		
1:20	27		22.4370 <sup>b</sup>	
1:10	27			36.4652 <sup>a</sup>
Sig.		1.000	1.000	1.000

Mean for groups in homogeneous subsets are displayed

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 27.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

น้ำตาลทั้งหมด

Duncan<sup>a,b</sup>

อัตราส่วน	N	Subset		
		1	2	3
0.4 M	27	19.5070 <sup>c</sup>	26.4356 <sup>b</sup>	27.5011 <sup>a</sup>
0.1 M	27			
0.2 M	27			
Sig.		1.000	1.000	1.000

Mean for groups in homogeneous subsets are displayed

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 27.00

Tests of Between Subjects Effects

Dependent Variable : น้ำตาลทั้งหมด

Tests of Between Subjects Effects

Dependent Variable : น้ำตาลทั้งหมด

Source	Type III Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9339.079 <sup>a</sup>	26	359.195	303.568	.000
Intercept	48545.799	1	48545.799	41027.743	.000
concentration	1017.405	2	508.702	429.922	.000
time	250.267	2	125.133	105.754	.000
ratio	6657.998	2	3328.999	2813.453	.000
concentration*time	75.325	4	18.831	15.915	.000
concentration*raio	674.995	4	168.749	142.615	.000
time*ratio	138.451	4	34.613	29.252	.000
concentration*time*raio	524.639	8	65.580	55.424	.000
Error	63.895	54	1.183		
Total	57948.773	81			
Correct Total	9402.974	80			

R Square = .993 (Adjusted R Square = .990)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. น้ำตาลรีตีวซ์

2.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ที่เวลาต่าง ๆ

### น้ำตาลรีตีวซ์

Duncan<sup>a,b</sup>

อัตราส่วน	N	Subset		
		1	2	3
60 นาที	27	9.4359 <sup>c</sup>		
90 นาที	27		11.0511 <sup>b</sup>	
120 นาที	27			12.6107 <sup>a</sup>
Sig.		1.000	1.000	1.000

Mean for groups in homogeneous subsets are displayed

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 27.00

2.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

### น้ำตาลรีตีวซ์

Duncan<sup>a,b</sup>

อัตราส่วน	N	Subset		
		1	2	3
1:30	27	5.9522 <sup>c</sup>		
1:20	27		9.7941 <sup>b</sup>	
1:10	27			17.3515 <sup>a</sup>
Sig.		1.000	1.000	1.000

Mean for groups in homogeneous subsets are displayed

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 27.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

#### น้ำตาลรีดิวซ์

Duncan<sup>a,b</sup>

อัตราส่วน	N	Subset		
		1	2	3
0.4 M	27	9.8000 <sup>c</sup>		
0.1 M	27		11.0493 <sup>b</sup>	
0.2 M	27			12.2485 <sup>a</sup>
Sig.		1.000	1.000	1.000

Mean for groups in homogeneous subsets are displayed

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 27.00

Tests of Between Subjects Effects

Dependent Variable : น้ำตาลรีดิวซ์

Tests of Between Subjects Effects

Dependent Variable : น้ำตาลรีดิวซ์

Source	Type III Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2276.747 <sup>a</sup>	26	87.567	420.009	.000
Intercept	9859.166	1	9859.166	47288.688	.000
concentration	80.947	2	40.474	194.128	.000
time	136.086	2	68.043	326.364	.000
ratio	1816.356	2	908.178	4356.002	.000
concentration*time	15.906	4	3.976	19.073	.000
concentration*raio	121.063	4	30.266	145.167	.000
time*ratio	42.692	4	10.673	51.192	.000
concentration*time*ratio	63.697	8	7.962	38.190	.000
Error	11.258	54	.208		
Total	12147.171	81			
Correct Total	2288.005	80			

R Square = .995 (Adjusted R Square = .993)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลทั้งหมด ที่เวลา 60 นาที

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการ เจือจาง 100 เท่า	ค่าการ เจือจาง 200 เท่า	ค่าการ เจือจาง 300 เท่า	ค่าการ เจือจาง 400 เท่า
0.1	1 : 10 (1)			0.723	0.508
0.1	1 : 10 (2)			0.715	0.527
0.1	1 : 10 (3)			0.789	0.532
0.1	1 : 20 (1)		0.737		
0.1	1 : 20 (2)		0.800		
0.1	1 : 20 (3)		0.791		
0.1	1 : 30 (1)	0.829	0.422		
0.1	1 : 30 (2)	0.875	0.466		
0.1	1 : 30 (3)	0.810	0.478		
0.2	1 : 10 (1)			0.836	0.651
0.2	1 : 10 (2)			0.865	0.662
0.2	1 : 10 (3)			0.871	0.620
0.2	1 : 20 (1)		0.596		
0.2	1 : 20 (2)		0.543		
0.2	1 : 20 (3)		0.579		
0.2	1 : 30 (1)	0.834	0.350		
0.2	1 : 30 (2)	0.817	0.403		
0.2	1 : 30 (3)	0.829	0.387		
0.4	1 : 10 (1)			0.398	0.295
0.4	1 : 10 (2)			0.387	0.265
0.4	1 : 10 (3)			0.318	0.268
0.4	1 : 20 (1)		0.515		
0.4	1 : 20 (2)		0.528		
0.4	1 : 20 (3)		0.515		
0.4	1 : 30 (1)		0.458		
0.4	1 : 30 (2)		0.459		
0.4	1 : 30 (3)		0.471		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลทั้งหมด ที่เวลา 90 นาที

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการ เจือจาง 100 เท่า	ค่าการ เจือจาง 200 เท่า	ค่าการ เจือจาง 300 เท่า	ค่าการ เจือจาง 400 เท่า
0.1	1 : 10 (1)			0.662	
0.1	1 : 10 (2)			0.635	
0.1	1 : 10 (3)			0.660	
0.1	1 : 20 (1)		0.868	0.538	
0.1	1 : 20 (2)		0.843	0.525	
0.1	1 : 20 (3)		0.823	0.560	
0.1	1 : 30 (1)		0.429		
0.1	1 : 30 (2)		0.401		
0.1	1 : 30 (3)		0.409		
0.2	1 : 10 (1)			0.883	
0.2	1 : 10 (2)			0.882	
0.2	1 : 10 (3)			0.898	
0.2	1 : 20 (1)		0.696	0.530	
0.2	1 : 20 (2)		0.773	0.559	
0.2	1 : 20 (3)		0.779	0.567	
0.2	1 : 30 (1)	0.869	0.442		
0.2	1 : 30 (2)	0.848	0.422		
0.2	1 : 30 (3)	0.853	0.432		
0.4	1 : 10 (1)				0.576
0.4	1 : 10 (2)				0.496
0.4	1 : 10 (3)				0.481
0.4	1 : 20 (1)		0.427	0.295	
0.4	1 : 20 (2)		0.406	0.250	
0.4	1 : 20 (3)		0.452	0.268	
0.4	1 : 30 (1)	0.655	0.312		
0.4	1 : 30 (2)	0.711	0.366		
0.4	1 : 30 (3)	0.711	0.313		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลทั้งหมด ที่เวลา 120 นาที

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการ เจือจาง 100 เท่า	ค่าการ เจือจาง 200 เท่า	ค่าการ เจือจาง 300 เท่า	ค่าการ เจือจาง 400 เท่า
0.1	1 : 10 (1)				0.566
0.1	1 : 10 (2)				0.580
0.1	1 : 10 (3)				0.596
0.1	1 : 20 (1)			0.589	
0.1	1 : 20 (2)			0.638	
0.1	1 : 20 (3)			0.640	
0.1	1 : 30 (1)		0.574		
0.1	1 : 30 (2)		0.597		
0.1	1 : 30 (3)		0.597		
0.2	1 : 10 (1)				0.693
0.2	1 : 10 (2)				0.725
0.2	1 : 10 (3)				0.697
0.2	1 : 20 (1)		0.607	0.415	
0.2	1 : 20 (2)		0.639	0.432	
0.2	1 : 20 (3)		0.618	0.406	
0.2	1 : 30 (1)		0.560		
0.2	1 : 30 (2)		0.589		
0.2	1 : 30 (3)		0.519		
0.4	1 : 10 (1)			0.688	0.576
0.4	1 : 10 (2)			0.685	0.496
0.4	1 : 10 (3)			0.714	0.481
0.4	1 : 20 (1)		0.603	0.397	
0.4	1 : 20 (2)		0.610	0.363	
0.4	1 : 20 (3)		0.615	0.367	
0.4	1 : 30 (1)	0.615	0.290		
0.4	1 : 30 (2)	0.636	0.324		
0.4	1 : 30 (3)	0.595	0.316		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลรีดิวซ์ ที่เวลา 60 นาที

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการ เจือจาง 10 เท่า	ค่าการ เจือจาง 30 เท่า	ค่าการ เจือจาง 40 เท่า
0.1	1 : 10 (1)		0.433	0.311
0.1	1 : 10 (2)		0.485	0.318
0.1	1 : 10 (3)		0.442	0.305
0.1	1 : 20 (1)		0.365	
0.1	1 : 20 (2)		0.349	
0.1	1 : 20 (3)		0.342	
0.1	1 : 30 (1)	0.585		
0.1	1 : 30 (2)	0.515		
0.1	1 : 30 (3)	0.536		
0.2	1 : 10 (1)		0.670	0.415
0.2	1 : 10 (2)		0.636	0.436
0.2	1 : 10 (3)		0.619	0.420
0.2	1 : 20 (1)	0.780	0.301	
0.2	1 : 20 (2)	0.838	0.301	
0.2	1 : 20 (3)	0.813	0.250	
0.2	1 : 30 (1)	0.542		
0.2	1 : 30 (2)	0.540		
0.2	1 : 30 (3)	0.535		
0.4	1 : 10 (1)		0.345	0.295
0.4	1 : 10 (2)		0.347	0.286
0.4	1 : 10 (3)		0.353	0.252
0.4	1 : 20 (1)	0.729	0.225	
0.4	1 : 20 (2)	0.714	0.200	
0.4	1 : 20 (3)	0.730	0.208	
0.4	1 : 30 (1)	0.493		
0.4	1 : 30 (2)	0.471		
0.4	1 : 30 (3)	0.433		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลรีดิวซ์ ที่เวลา 90 นาที

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการ เจือจาง 10 เท่า	ค่าการ เจือจาง 20 เท่า	ค่าการ เจือจาง 30 เท่า
0.1	1 : 10 (1)			0.545
0.1	1 : 10 (2)			0.542
0.1	1 : 10 (3)			0.555
0.1	1 : 20 (1)			0.340
0.1	1 : 20 (2)			0.358
0.1	1 : 20 (3)			0.344
0.1	1 : 30 (1)	0.669		0.337
0.1	1 : 30 (2)	0.673		0.313
0.1	1 : 30 (3)	0.648		0.321
0.2	1 : 10 (1)			0.654
0.2	1 : 10 (2)			0.658
0.2	1 : 10 (3)			0.662
0.2	1 : 20 (1)			0.343
0.2	1 : 20 (2)			0.364
0.2	1 : 20 (3)			0.336
0.2	1 : 30 (1)	0.617	0.341	
0.2	1 : 30 (2)	0.633	0.339	
0.2	1 : 30 (3)	0.613	0.320	
0.4	1 : 10 (1)			0.555
0.4	1 : 10 (2)			0.553
0.4	1 : 10 (3)			0.565
0.4	1 : 20 (1)	0.738		0.244
0.4	1 : 20 (2)	0.715		0.277
0.4	1 : 20 (3)	0.691		0.268
0.4	1 : 30 (1)	0.520	0.261	
0.4	1 : 30 (2)	0.547	0.269	
0.4	1 : 30 (3)	0.570	0.204	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลรีดิวซ์ ที่เวลา 120 นาที

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการ เจือจาง 10 เท่า	ค่าการ เจือจาง 20 เท่า	ค่าการ เจือจาง 30 เท่า
0.1	1 : 10 (1)			0.517
0.1	1 : 10 (2)			0.524
0.1	1 : 10 (3)			0.545
0.1	1 : 20 (1)			0.454
0.1	1 : 20 (2)			0.412
0.1	1 : 20 (3)			0.437
0.1	1 : 30 (1)	0.719	0.436	
0.1	1 : 30 (2)	0.728	0.425	
0.1	1 : 30 (3)	0.711	0.427	
0.2	1 : 10 (1)			0.759
0.2	1 : 10 (2)			0.720
0.2	1 : 10 (3)			0.774
0.2	1 : 20 (1)			0.343
0.2	1 : 20 (2)			0.364
0.2	1 : 20 (3)			0.336
0.2	1 : 30 (1)	0.670	0.396	
0.2	1 : 30 (2)	0.672	0.393	
0.2	1 : 30 (3)	0.673	0.397	
0.4	1 : 10 (1)			0.670
0.4	1 : 10 (2)			0.701
0.4	1 : 10 (3)			0.746
0.4	1 : 20 (1)	0.836		0.308
0.4	1 : 20 (2)	0.883		0.317
0.4	1 : 20 (3)	0.873		0.314
0.4	1 : 30 (1)	0.570	0.290	
0.4	1 : 30 (2)	0.568	0.285	
0.4	1 : 30 (3)	0.577	0.281	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงค่าน้ำตาลทั้งหมด ที่สภาวะต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วนตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1 : 10	1 : 20	1 : 30
0.1	60	33.87	24.57	14.06
		35.13	26.67	15.53
		35.47	26.37	15.93
	90	33.10	26.90	14.30
		31.75	26.25	13.37
		33.00	28.00	13.63
	120	37.73	29.45	19.13
		38.67	31.90	19.90
		39.73	29.45	19.90
0.2	60	43.40	19.87	11.67
		44.13	18.10	13.43
		41.33	19.30	12.90
	90	44.15	26.50	14.73
		44.10	27.95	14.07
		44.90	28.35	14.40
	120	46.20	20.75	18.67
		48.33	21.60	19.63
		46.47	20.30	17.30
0.4	60	19.67	17.17	15.27
		17.67	17.60	15.30
		17.87	17.17	15.70
	90	38.40	14.75	10.40
		33.07	12.50	12.20
		32.07	13.40	10.43
	120	34.40	20.10	10.25
		34.25	20.33	10.60
		35.70	20.50	9.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 แสดงค่าน้ำตาลรีดิวซ์ ที่สภาวะต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรคลอริก (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วนตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1 : 10	1 : 20	1 : 30
0.1	60	13.03	10.98	5.87
		14.59	10.50	5.16
		13.30	10.29	5.37
	90	16.39	10.23	6.71
		16.30	10.77	6.75
		16.70	10.35	6.50
	120	15.55	13.66	7.21
		15.76	12.39	7.30
		16.39	13.15	7.13
0.2	60	20.15	7.82	5.43
		19.13	8.40	5.41
		18.62	8.15	5.36
	90	19.67	10.32	6.19
		19.79	10.95	6.35
		19.91	10.11	6.15
	120	22.83	11.07	6.72
		21.66	11.18	6.74
		23.28	12.57	6.75
0.4	60	10.38	7.31	4.93
		10.43	7.16	4.72
		10.62	7.32	4.34
	90	16.70	7.40	5.21
		16.63	7.17	5.48
		17.00	6.93	5.72
	120	20.15	9.27	5.72
		21.09	9.54	5.70
		22.44	9.45	5.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้