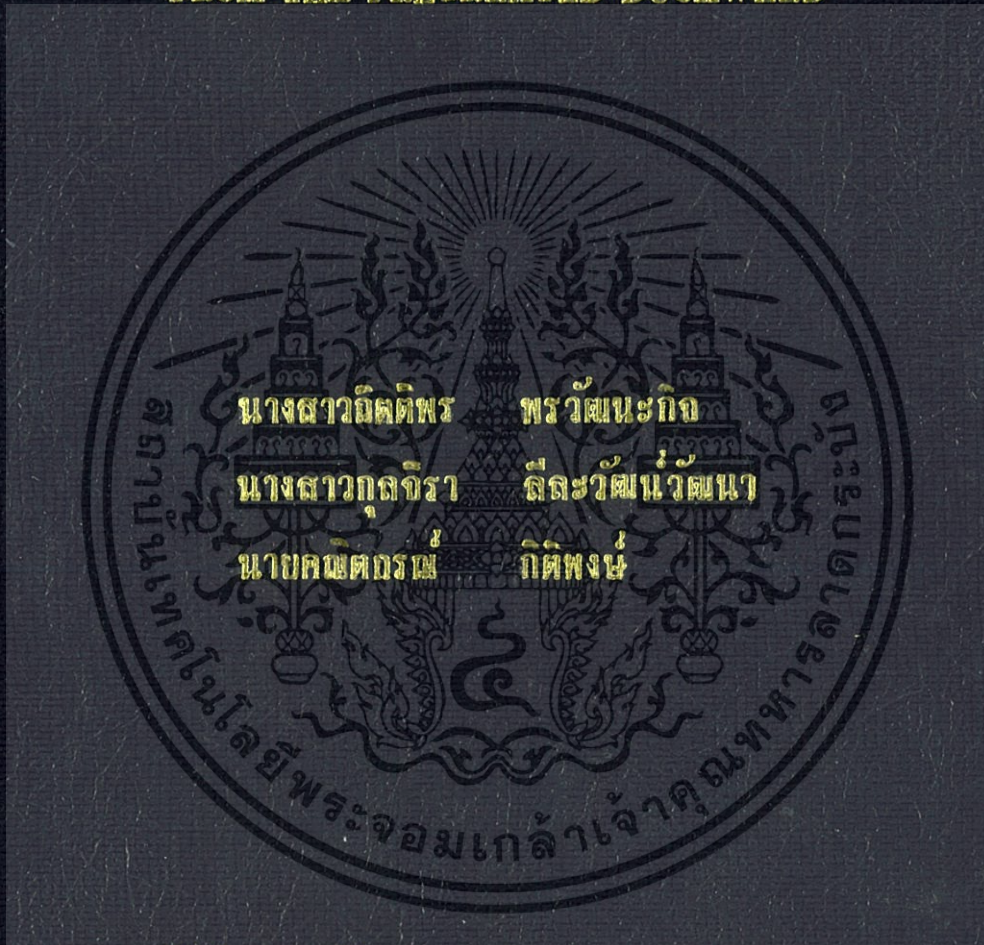


การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด  
จากหน่อเป็ดที่ผ่านการปรับสภาพ

PRODUCTION OF REDUCING SUGAR BY ACID HYDROLYSIS  
FROM THE PRETREATED DUCKWEED



โครงการพิเศษเป็นแผนงานหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด  
จากเหน็บเปิดที่ผ่านการปรับสภาพ

**PRODUCTION OF REDUCING SUGAR BY ACID HYDROLYSIS  
FROM THE PRETREATED DUCKWEED**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PRODUCTION OF REDUCING SUGAR BY ACID HYDROLYSIS  
FROM THE PRETREATED DUCKWEED**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด  
จากแห่นเป็ดที่ผ่านการปรับสภาพ  
PRODUCTION OF REDUCING SUGAR BY ACID HYDROLYSIS  
FROM THE PRETREATED DUCKWEED




**ชื่อนักศึกษา** นางสาวกิตติพร พรวัฒนะกิจ รหัสนักศึกษา 54051045  
นางสาวกุลจิรา ลีละวัฒน์วัฒนา รหัสนักศึกษา 54051046  
นายคณิตกรณ์ กิตติพงษ์ รหัสนักศึกษา 54051048

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีสิ่งแวดล้อม

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด จากแห่นเป็ดที่ผ่านการปรับสภาพ PRODUCTION OF REDUCING SUGAR BY ACID HYDROLYSIS FROM THE PRETREATED DUCKWEED
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกิตติพร พรวัฒนะกิจ รหัสนักศึกษา 54051045 นางสาวกุลจิรา สีละวัฒน์วัฒนา รหัสนักศึกษา 54051046 นายคณิตกรณ์ กิตติพงษ์ รหัสนักศึกษา 54051048
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากแห่นเป็ดที่ผ่านการปรับสภาพโดยวิธีการไฮโดรไลซิสด้วยกรด จากการศึกษาพบว่าแห่นที่ใช้มีปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินเท่ากับ 38.92, 14.62 และ 14.55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำมาปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน คือ 5%, 10% และ 15% พบว่า การปรับสภาพแห่นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ทำให้แห่นที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 32.59 และ 54.37 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณลิกนินมีค่าลดลงเป็น 7.37 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผนังเซลล์ของแห่นโดยเกิดเป็นรูพรุนทำให้มีช่องว่างเพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวขั้นต้นได้เท่ากับ 17.86 มิลลิกรัมต่อกรัมแห่นแห้ง เมื่อนำแห่นเป็ดที่ผ่านการปรับสภาพมาทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรด 2 ชนิด คือ กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.02, 0.08, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ พบว่าการไฮโดรไลซิสแห่นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 189.00 มิลลิกรัมต่อกรัมแห่นแห้ง และเกิดสารประกอบเฟอร์ฟูรัลเท่ากับ 0.0186 กรัมต่อลิตร

**คำสำคัญ :** น้ำตาลรีดิวซ์ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เฟอร์ฟูรัล

<b>Title</b>	Production of Reducing Sugar by Acid Hydrolysis from The Pretreated Duckweed		
<b>Student</b>	Miss Kittiporn	Pornwatthanakit	ID. 54051045
	Miss Kunchira	Lilawatwatthana	ID. 54051046
	Mr. Kanitkorn	Kitipong	ID. 54051048
<b>Degree</b>	Bachelor of Science		
<b>Major Program</b>	Environmental Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2014		
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Usarat Thawornchaisit		

### ABSTRACT

The production of reducing sugar from chemical pretreated duckweed by acid hydrolysis was investigated. Duckweed used in study contained 38.92% hemicelluloses, 14.62% celluloses and 14.55% lignin. A chemical pretreatment process using 5%, 10% and 15% (w/w) of HCl and NaOH were applied. The results show that after the 10% (w/w) NaOH at 121°C for 25 minutes pretreatment, duckweed composes of 32.59% cellulose, 54.37% hemicellulose and 7.37% lignin. In addition, porous cell wall were observed in the alkaline pretreated samples. Prehydrolysate contains reducing sugar of 17.86 mg/g dry weight. The pretreated duckweed was then hydrolyzed with hydrochloric acid and sulfuric acid at four different concentrations: 0.02, 0.08, 0.2 and 0.4 M. The highest reducing sugar of 189 mg/g dry weight and of were obtained when the duckweed was hydrolyzed with 0.4 M HCl at 120 °c for 60 minutes. At this condition, the hydrolysate contained furfural at 0.0186 g/l.

**Keywords :** reducing sugar, cellulose, hemicellulose, lignin, furfural

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สำเร็จลุล่วงได้ ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องและให้ความอนุเคราะห์กับโครงการพิเศษ ดังนี้ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้กรุณาสละเวลาให้ความรู้และคำแนะนำแนวทางตลอดการทำโครงการพิเศษ และขอขอบพระคุณอาจารย์จรยา คงฤทธิ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตรและจัดการทรัพยากร หลักสูตรสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้ในเรื่องของการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อย

ขอขอบพระคุณพี่นักวิทย์ประจำสาขาวิชาเคมีที่ช่วยจัดหาและคำแนะนำการใช้อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ รุ่นพี่และเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้อันเป็นที่รัก ผู้ที่ให้กำลังใจและโอกาส การศึกษาจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการพิเศษนี้จะประ โยชน์ต่อที่ทำการศึกษาต่อได้ บ้างตามสมควร หากมีข้อเสนอแนะประการใดเพื่อปรับปรุงผลงานให้ดีขึ้น ทางคณะผู้จัดทำขอน้อมรับข้อเสนอแนะและคำติชม ด้วยความยินดีและขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
<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 วัสดุติกโนเซลลูโลส	3
2.1.1 เซลลูโลส	4
2.1.2 เฮมิเซลลูโลส	6
2.1.3 ลิกนิน	7
2.2 การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากวัสดุติกโนเซลลูโลส	8
2.2.1 การปรับสภาพวัสดุติกโนเซลลูโลส	9
2.2.2 การไฮโดรไลซิส	14
2.3 แหน	17
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของแหน	17
2.3.2 การป้องกันและกำจัด	17
2.3.3 ประโยชน์ของแหน	17
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	22
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	22
3.1.1 อุปกรณ์	22
3.1.2 สารเคมี	22
3.2 การเตรียมตัวอย่าง	23
3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแหวน	23
3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย	24
3.4.1 การศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพแหวนด้วยกรดและด่าง ที่ความเข้มข้นต่างๆ	24
3.4.2 การศึกษาผลของวิธีการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ	25
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	26
4.1 ลักษณะของแหวนที่ใช้ในการศึกษา	26
4.2 ผลจากวิธีการปรับสภาพแหวนด้วยกรดและด่างที่ความเข้มข้นต่างๆ	27
4.2.1 องค์ประกอบเอื้อใยของแหวนที่ผ่านการปรับสภาพ	27
4.2.2 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของแหวนที่ผ่านการปรับสภาพ	30
4.2.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวขั้นต้น (prehydrolysate)	31
4.3 ผลจากการไฮโดรไลซิสแหวนด้วยกรด	32
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	35
5.1 สรุปผลการทดลอง	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	36
<b>ภาคผนวก ก</b>	40
<b>ภาคผนวก ข</b>	49

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณของเซลล์โลส เฮมิเซลล์โลส และลิกนิน ในส่วนที่เหลือใช้ทางการเกษตรทั่วไปและของเสีย	4
4.1 ปริมาณองค์ประกอบเยื่อใยของແນ	27



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส	3
2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส	5
2.3 แสดงหน่วยของเซลโลไบโอสที่ต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน	5
2.4 แสดงพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของกลูโคส และระหว่างสายของพอลิเมอร์	5
2.5 แสดงสูตรโครงสร้างน้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส	6
2.6 โครงสร้างของลิกนิน	7
2.7 การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากวัสดุลิกโนเซลลูโลส	8
2.8 แสดงกระบวนการผลิตเซลลูโลซิกลูคานอลจากพืชชีวมวลแบบครบวงจร	9
2.9 วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส	10
2.10 สรุปกรรมวิธีต่างๆในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส	11
2.11 แสดงปฏิกิริยาการเกิดกรดไฮโดรไลซิสด้วยกรด	15
2.12 แสดงโครงสร้างทางเคมี ก. เฟอร์ฟูรัล บ. ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล	15
3.1 แผนภาพแสดงกรอบการดำเนินงานวิจัย	24
4.1 ลักษณะแผนสดที่ใช้ศึกษา	26
4.2 ลักษณะตัวอย่างแห้งที่ใช้ในการศึกษา	26
4.3 ปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ของแห้งก่อนปรับสภาพ และปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์	29
4.4 โครงสร้างของแหวนเป็ดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	30
4.5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวขั้นต้น (prehydrolysate) ที่ได้จากการปรับสภาพแหวน ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ เทียบกับการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น	31
4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณเฟอร์ฟูรัลในไฮโดรไลเสท (hydrolysate) ที่ได้จากการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ	33

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การลดลงของปริมาณสำรองประเภทเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้หลายๆประเทศมีการค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทน “ไบโอเอทานอล” ซึ่งเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีโอกาสเติบโตสูงเห็นได้จากอัตราการใช้(ล้านลิตรต่อวัน)-กำลังการผลิต(ลิตรต่อชั่วโมง)ของไบโอเอทานอลเฉลี่ยต่ำกว่า 50%ในช่วงปี 2550-2555 ก่อนปรับตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในปี 2556 โดยล่าสุดเดือนมี.ค. 2557 กำลังการผลิตไบโอเอทานอลเฉลี่ยอยู่ที่ 74% อีกทั้งความต้องการใช้เอทานอลมีแนวโน้มสูงขึ้นมากจากเดิมในปี 2555 ความต้องการใช้เอทานอลอยู่ที่ 1.4 ล้านลิตรต่อวัน และในปี 2556 ปรับมาเป็น 2.6 ล้านลิตรต่อวัน (ฝ่ายวิจัย บมจ. ธนาคารกรุงศรีอยุธยา, 2557) ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมจะใช้วัตถุดิบจำพวกแป้งและน้ำตาลเป็นหลัก ที่สำคัญได้แก่ อ้อย มันสำปะหลัง มันฝรั่ง และข้าวโพด ซึ่งพืชดังกล่าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ส่งผลให้เกิดความกังวลในเรื่องความมั่นคงทางอาหารทั้งในด้านปริมาณและราคา เนื่องจากต้องนำผลผลิตบางส่วนมาใช้ในการผลิตเอทานอล (Ge, Wang and Mou, 2011; Papong and Malakul, 2010; Zhang *et al*, 2010) ด้วยเหตุนี้การผลิตเอทานอลจากวัสดุกลไกโนเซลลูโลสจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญมากขึ้นในอนาคตตามการคาดการณ์ของสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (International Energy Agency) การผลิตเอทานอลจากวัสดุกลไกโนเซลลูโลสทำได้โดยนำวัสดุกลไกโนเซลลูโลสหรือพืชต่างๆไป ซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์ มาผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดลิกนินและลดโครงสร้างที่เป็นผลึกของเซลลูโลสลง จะได้เส้นใยเซลลูโลสซึ่งเมื่อนำไปย่อยด้วยกรดหรือเอนไซม์จะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ที่สามารถนำไปหมักเป็นเอทานอลได้

แห่น (Duckweed) เป็นพืชลอยน้ำขนาดเล็กจัดอยู่ในวงศ์ Lemnaceae เจริญเติบโตได้ดีตลอดปีและแพร่พันธุ์ได้รวดเร็วในน้ำนิ่ง เช่น หนอง บึง หรือสระน้ำทั่วไปที่มีธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุอุดมสมบูรณ์ มีระยะเวลาการทวีคูณ (Doubling time) เพียง 2-7 วัน เนื่องจากเป็นพืชที่เจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้รวดเร็ว อาจทำให้เกิดปัญหาหมอกพิษทางน้ำได้ Chen *et al.* (2012) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเอทานอลจากแห่น *Landoltia punctate* ซึ่งเป็นแห่นที่พบมากในประเทศจีน จากการศึกษาพบว่าแห่นดังกล่าวสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้ ในขณะที่การใช้ประโยชน์ของแห่นในประเทศไทยยังมีไม่มากเท่าที่ควร โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากแห่นเป็ด ซึ่งเป็นแห่นที่พบมากในประเทศไทย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดจากแห่นเป็ดที่ผ่านการปรับสภาพ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาคือ แห่นเป็ด
2. ศึกษาปริมาณองค์ประกอบเยื่อได้แก่ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนินด้วยวิธี Detergent method และศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของแห่นด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
3. กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ
 

ปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรต้น) คือ

  - ชนิดของสารปรับสภาพได้แก่ น้ำกลั่น กรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์
  - ความเข้มข้นของสารปรับสภาพได้แก่ ความเข้มข้นที่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตัวแปรตาม ได้แก่
  - ส่วนที่เป็นของแข็ง: วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเยื่อด้วยวิธี Detergent method และศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
  - ส่วนที่เป็นของเหลว: วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี 3,5-Dinitrosalicylic acid Method
4. กระบวนการไฮโดรไลซิส
 

ปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรต้น) คือ

  - ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการย่อย ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก
  - ความเข้มข้นของสารได้แก่ 0.02, 0.08, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ ตัวแปรตาม ได้แก่
  - ส่วนที่เป็นของเหลว: วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี 3,5-Dinitrosalicylic acid Method และปริมาณเฟอร์ฟูรัลด้วยสารละลายรีเอเจนต์สแตนดาร์ด-แอนิสีน-กรดแอสซิติค

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความเป็นไปได้ของการใช้แห่นเป็ดเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์
2. เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์และเพิ่มคุณค่าให้แก่วัชพืชน้ำมากขึ้น

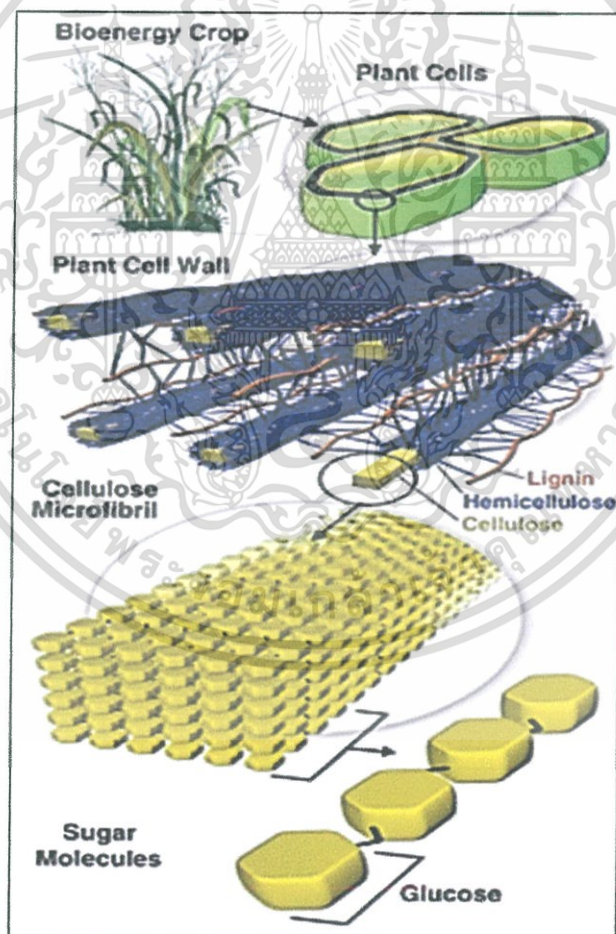
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลส หมายถึงชีวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและ สารประกอบอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 40-60% (นคร, 2553) พบมากในผนังเซลล์ของพืชได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน เศษวัสดุจากการเกษตรเช่น ชังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และพวกฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากบ้านเรือนรวมถึงมูลสัตว์ต่างๆ (อรุณี, 2555) องค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส

(ที่มา: [http://www.ostc.thaiembdc.org/news\\_us/news\\_photo/genome.jpg](http://www.ostc.thaiembdc.org/news_us/news_photo/genome.jpg))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในส่วนที่เหลือใช้ทางการเกษตรทั่วไป และของเสีย

วัสดุลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
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
กระดาษ	85-99	0	0-15
ฟางข้าวสาลี	30	50	15
ของเสียที่แยกประเภท	60	20	20
ใบไม้	15-20	80-85	0
ฝ้าย	80-95	5-20	0
หนังสือพิมพ์	40-55	25-40	18-30
กระดาษของเสียจากเยื่อเคมี	60-70	10-20	5-10
ของแข็งน้ำเสียเบื้องต้น	8-15	NA	24-29
ของเสียสุกร	6.0	28	NA
ปุ๋ยคอก	1.6-4.7	1.4-3.3	2.7-5.7
หญ้าชายฝั่งเบอร์มิวดา	25	35.7	6.4
หญ้าสวิทซ์	45	31.4	12.0

NA – not available

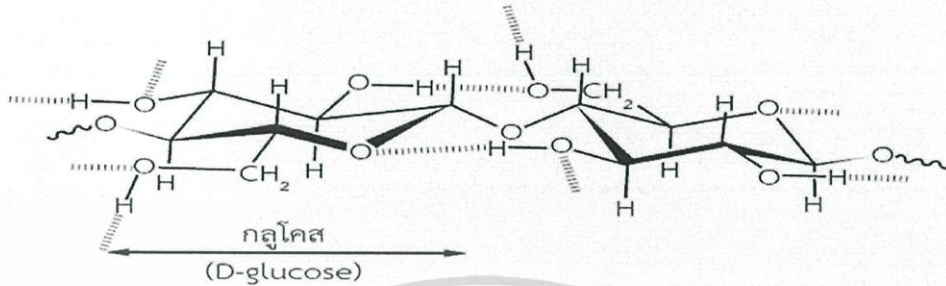
ที่มา: Sun and Cheng (2002)

### 2.1.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุด ประมาณ 45% ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในธรรมชาติ ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส มีลักษณะเป็นลูกโซ่ของดี-กลูโคส (D-glucose) เรียงตัวเกาะกันแบบ  $\beta$ -1,4-glycosidic bond ต่อกันเป็นสายยาวตรงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีความยาวต่างกันไป มีระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization; DP) ประมาณ 500-10,000 ขึ้นกับชนิดของพืชโดยมีหน่วยซ้ำๆ เรียกว่าเซลโลไบโอส (cellobiose) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน่วยโครงสร้าง (building block) ของเซลลูโลส และทุกๆ หน่วยที่สองของกลูโคสที่ต่อกันในโมเลกุลของเซลลูโลสจะหมุนได้ 180 องศา ทำให้สายเซลลูโลสเกิด

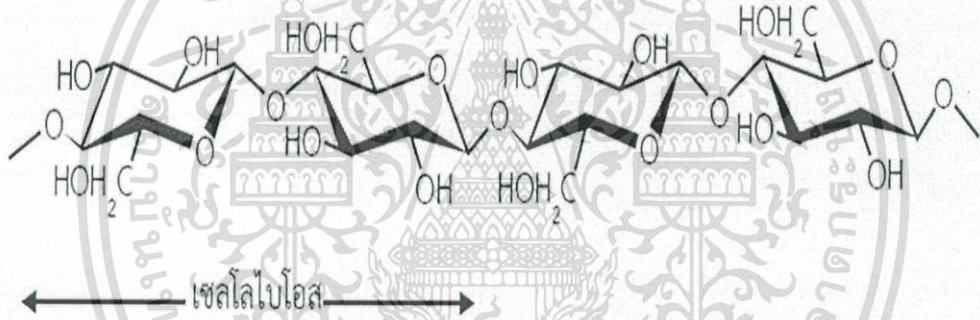
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลใน โมเลกุลของกลูโคส และระหว่างสายของพอลิเมอร์  
ดังรูปที่ 2.4 เซลลูโลสอิสระพบรวมอยู่กับเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพนโตแซนกันัม แทนนิน ไชมัน และ  
สารที่ทำให้เกิดสี เป็นต้น



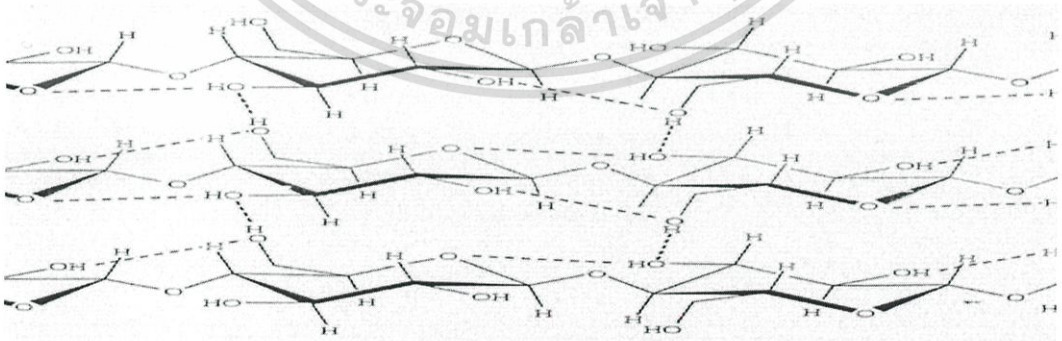
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส

(ที่มา: <http://www.slideshare.net/toney2010/9789740328322>)



รูปที่ 2.3 แสดงหน่วยของเซลโลไบโอสที่ต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน

(ที่มา: <http://www.slideshare.net/toney2010/9789740328322> )



รูปที่ 2.4 แสดงพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลใน โมเลกุลของกลูโคส และระหว่างสายของพอลิเมอร์

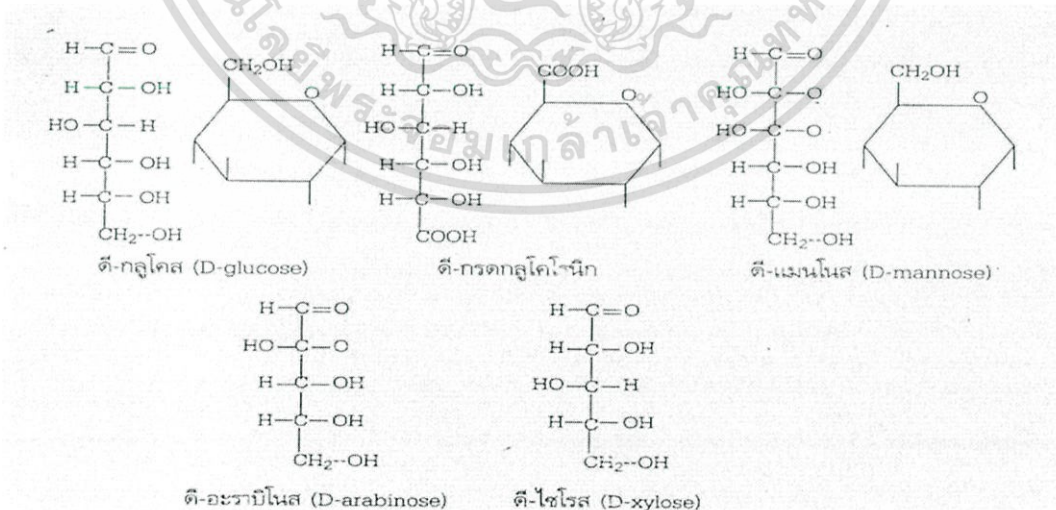
(ที่มา: นคร, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาโดยจะจับกับพวก O-, N- และ S- สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก การที่จะแยกองค์ประกอบเหล่านี้ออกจากกันได้จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการทางเคมีเข้ามาช่วย เซลลูโลสมักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัวและมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพจึงจำเป็นต้องมีการนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบให้เหมาะต่อการนำไปย่อยให้เป็นน้ำตาลด้วยการใช้กรดหรือเอนไซม์ แล้วเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป

### 2.1.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์พืช มีระดับการเกิดพอลิเมอร์ (degree of polymerization; DP) ต่ำกว่าเซลลูโลส คือ ประมาณ 50-300 มีโครงสร้างที่เป็นสายกิ่งมาก ในขณะที่เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) เส้นตรง ซึ่งจะแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละชนิด เฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ไม่เป็นผลึก (noncrystalline) โดยธรรมชาติจะมีโครงสร้างเป็นแบบ amorphous ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานกลุ่มเส้นใยเซลลูโลสร่วมกับลิกนินและเพกตินประกอบเป็นผนังเซลล์ทำให้เซลล์มีความแข็งแรงและคงรูปอยู่ได้ โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดคือ ไซโลส (xylose), อะราบิโนส (arabinose), แมนโนส (mannose), กาแลคโตส (galactose), และกรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงสูตร โครงสร้างน้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส

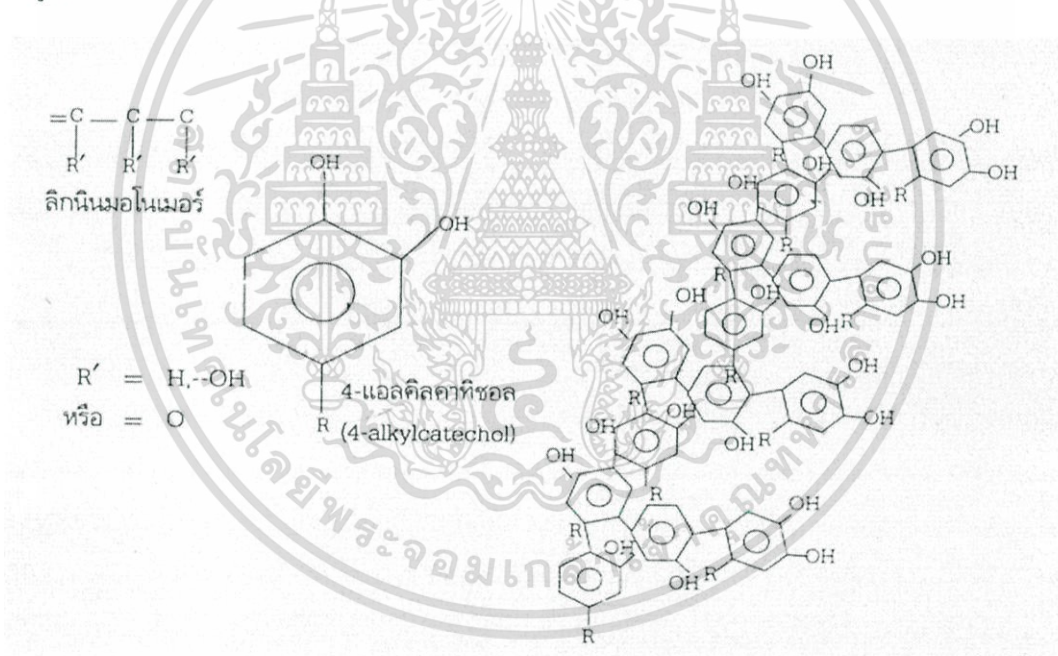
(ที่มา: นคร, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฮมิเซลลูโลสที่พบในธรรมชาติจะแบ่งออกออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่พบในพวกไม้เนื้อแข็ง จะประกอบไปด้วยเฮมิเซลลูโลสชนิดกลูคูโรโนไซแลน และกลูโคแมนแนนในปริมาณร้อยละ 15-35 และ 2-5 โดยน้ำหนักตามลำดับ กลุ่มที่พบในไม้เนื้ออ่อนจะมีส่วนของเฮมิเซลลูโลสชนิดกาแลกโทกลูโคแมนแนน และอะราบีโนไซแลนในปริมาณร้อยละ 12-20 และ 5-14 โดยน้ำหนักตามลำดับ

### 2.1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลสและพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติโดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเธอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์ โครงสร้างของลิกนิน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของลิกนิน

(ที่มา: นคร, 2553)

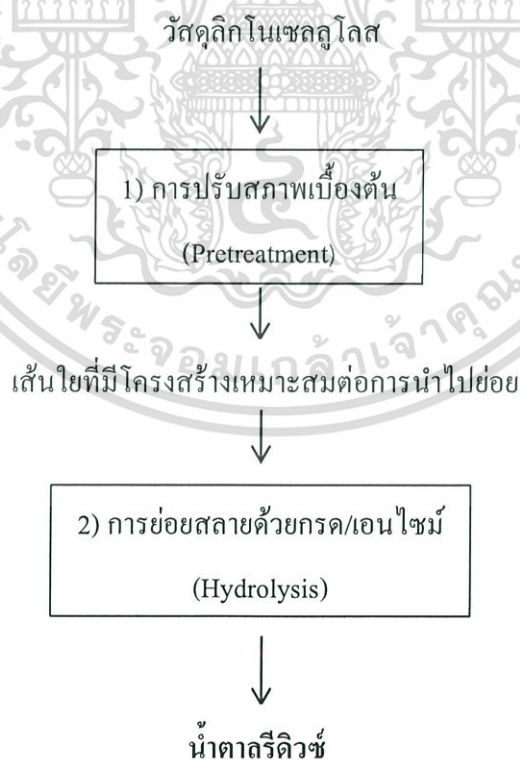
การที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องใช้ในการปรับสภาพวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้ก่อน และป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนิน รวมทั้งให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป

## 2.2 การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากวัสดุลิกโนเซลลูโลส

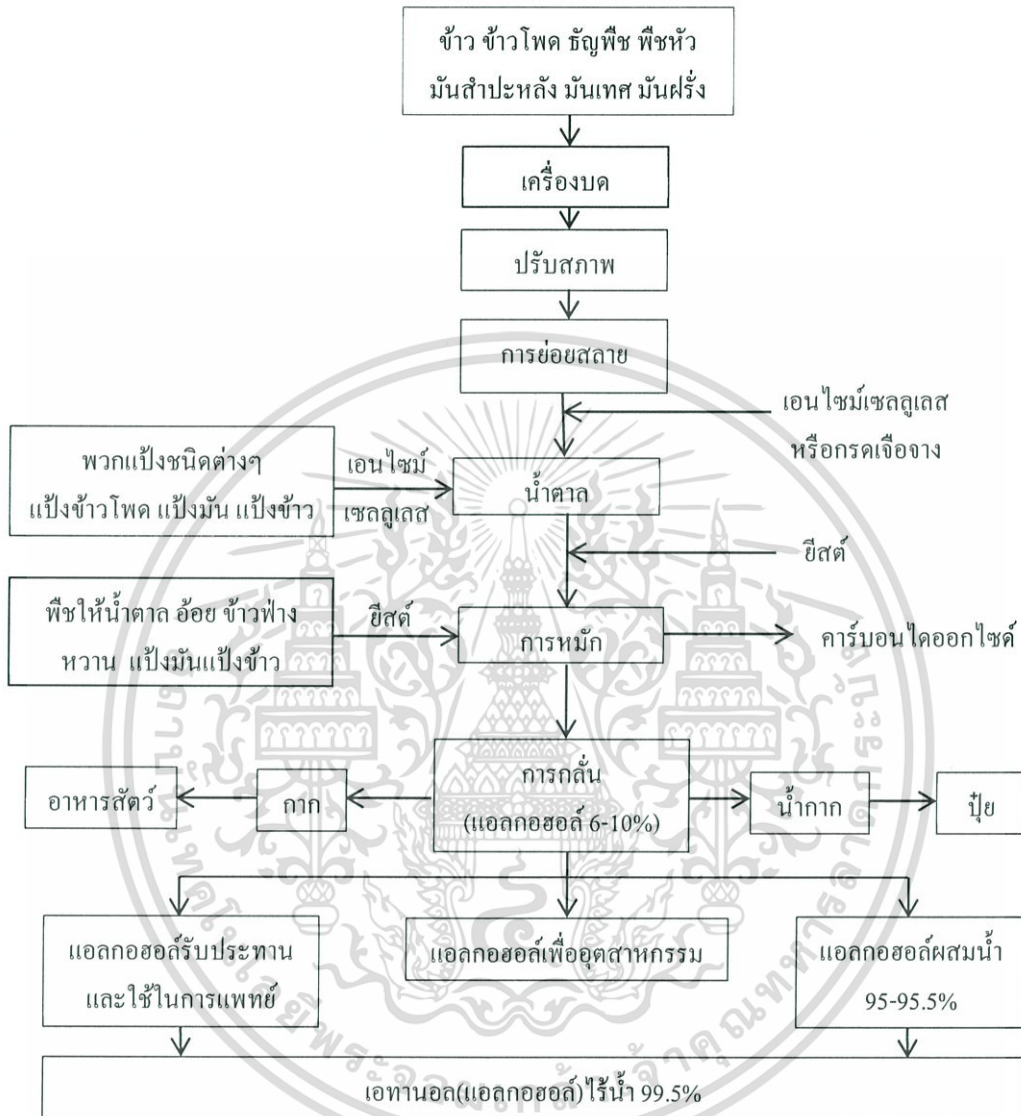
น้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) คือ น้ำตาลที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือคีโตน (ketone) เป็นอิสระอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาล และถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายด้วยตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) อย่างอ่อน ตัวอย่างของน้ำตาลกลุ่มนี้ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ทุกชนิด เช่น น้ำตาลกลูโคส (glucose) น้ำตาลกาแล็กโทส (galactose) น้ำตาลฟรักโทส (fructose) และน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) บางชนิด เช่น น้ำตาลแล็กโทส (lactose) น้ำตาลมอลโทส (maltose) ซึ่งน้ำตาลรีดิวซ์สามารถผลิตได้จากวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่มีองค์ประกอบสำคัญคือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ตัวอย่างของวัสดุลิกโนเซลลูโลสได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เศษขยะ และพืชพลังงานต่างๆ ทั้งยังมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องที่จะนำวัสดุลิกโนเซลลูโลสเหล่านี้มาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อเข้าสู่กระบวนการหมักเป็นเอทานอลต่อไป การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากวัสดุลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักคือ 1) ปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส 2) การไฮโดรไลซิสด้วยกรดหรือเอนไซม์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากวัสดุลิกโนเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากวัสดุลิกโนเซลลูโลสสามารถเข้าสู่กระบวนการหมักและกลั่นเพื่อให้ได้เอทานอลต่อไปดังรูปที่ 2.8



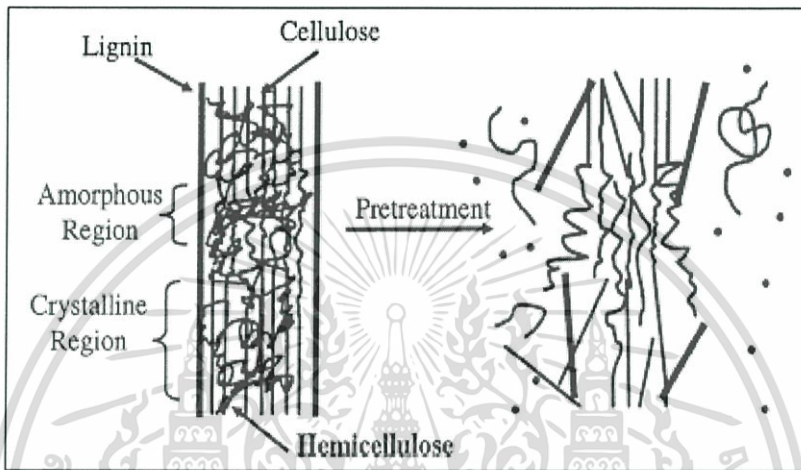
รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลจากพืชชีวมวลแบบครบวงจร  
(ที่มา: ชันนันท และเฉลิม, 2555)

### 2.2.1 การปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Pretreatment)

การเปลี่ยนเซลลูโลสจากวัสดุลิกโนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาล ต้องอาศัยการทำงานของเอนไซม์หรือกรดที่ใช้ในการย่อย แต่ในกระบวนการย่อยมักถูกขัดขวางโดยปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีหลายประการเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยเซลลูโลสลดลง ด้วยเหตุนี้จึงต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลสให้เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยก่อน โดยอาศัยกระบวนการที่เรียกว่า การปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการปรับสภาพคือการเปลี่ยนหรือกำจัดโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆที่เป็นสิ่งกีดขวางต่อกระบวนการย่อยเซลลูโลส ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยดีขึ้นและได้ผลของน้ำตาลที่ใช้ในการหมักเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการปรับสภาพจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส วัตถุประสงค์ของกระบวนการปรับสภาพคือ กำจัดลิกนินหรือเฮมิเซลลูโลสออก ลดโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มความเป็นรูพรุนของวัตถุดิบ ดังรูปที่ 2.9

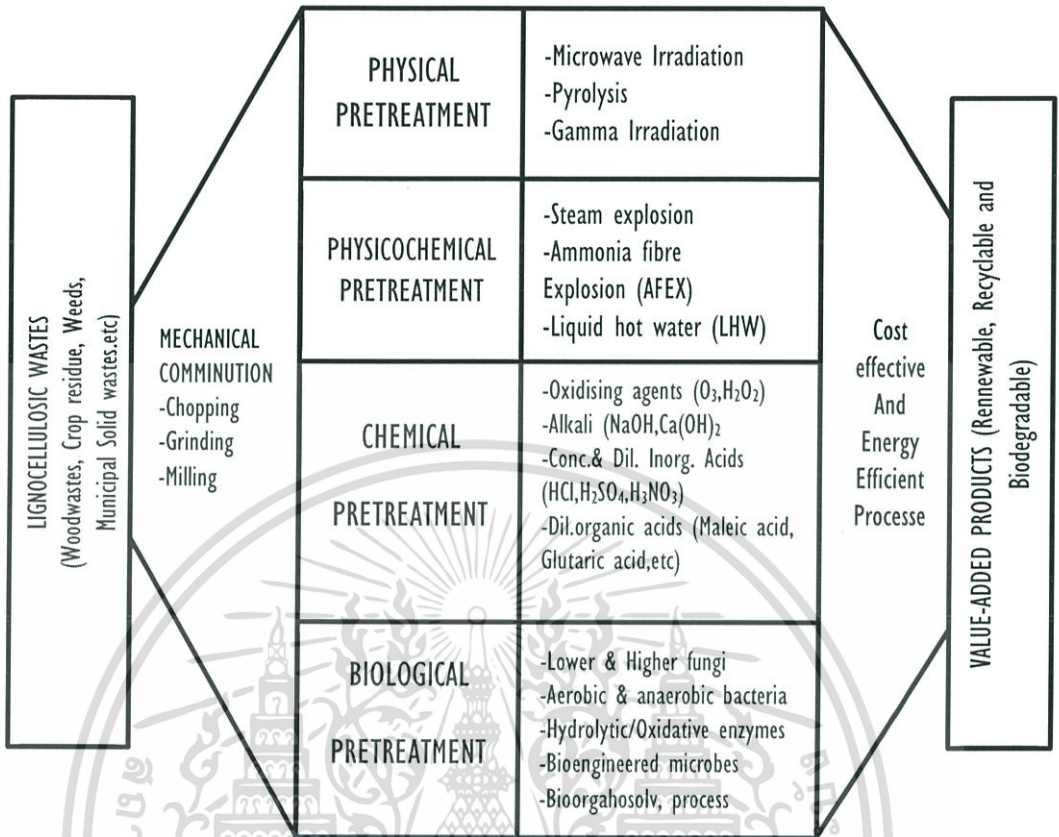


รูปที่ 2.9 วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพวัสดุลิกนินเซลลูโลส  
(ที่มา: ภูมิหทัย และประมุข, 2554)

การปรับสภาพวัสดุลิกนินเซลลูโลสมี 5 วิธีด้วยกัน (Y.S. Mtui, 2009) ได้แก่

1. การปรับสภาพเชิงกล
2. การปรับสภาพทางกายภาพ
3. การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี
4. การปรับสภาพทางเคมี
5. การปรับสภาพทางชีวภาพ

แต่ละวิธีก็จะมีเทคนิคแตกต่างกันออกไปสามารถสรุปภาพรวมได้ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สรุปกรรมวิธีต่างๆในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส (ที่มา: อรุณี, 2555)

**2.2.1.1 การปรับสภาพเชิงกล (Mechanical Pretreatment)**

เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบหรือเพิ่มพื้นที่เพื่อให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ข้างในถูกย่อยสลายได้มากขึ้น โดยการหั่น การสับ การทุบ หรือการบดด้วยลูกบอลหรือลูกกลิ้งจัดว่าเป็นวิธีการที่ให้ผลสำเร็จเป็นอย่างดี มีต้นทุนต่ำ และยังช่วยลดปริมาณการใช้เอนไซม์ในการช่วยย่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้เปลี่ยนไปเป็นกลูโคสและไซลเลนในขั้นตอนต่อไป

**2.2.1.2 การปรับสภาพทางกายภาพ (Physical pretreatment)**

การเพิ่มอุณหภูมิและการแผ่รังสีเป็นวิธีการทางกายภาพที่ประสบผลสำเร็จมากที่สุดวิธีหนึ่ง วิธีการที่เรียกว่า Thermogravimetric treatment โดยเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1100 เคลวินภายใต้สภาวะทั้งที่มีก๊าซเฉื่อยและตัวออกซิเดนต์สามารถทำให้เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินย่อยสลายได้ดี ส่วนวิธีการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) พวกเปลือกถั่วชนิดต่างๆ ฟางข้าวหรือ พวกขี้เลื่อยที่อุณหภูมิ 600-1200 เคลวิน ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพวกถ่าน ของเหลวและก๊าซ

มากกว่าวิธีธรรมดาทั่วไป 55% สำหรับการแผ่รังสีด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 700 W ด้วยเวลาต่างๆ กัน พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักของวัตถุดิบไปบ้าง เนื่องจากมีการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แต่ทำให้อัตราการย่อยสลายโดยใช้ค่าร่วมด้วยเพิ่มขึ้นมาก นอกจากนี้การใช้รังสีแกมมาขนาด 500 kGy ทำให้โครงสร้างของฟางข้าวสาเลที่ป็นเป็นผงขนาด 140 mesh แยกตัวให้ผลผลิตน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นอีก 13.40%

### 2.2.1.3 การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับทางเคมี (Physicochemical pretreatment)

การรวมกันระหว่างวิธี chemical และ physical treatment มีส่วนสำคัญในการละลายน้ำของเฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่ถูกแปลงโครงสร้างแล้วเป็นผลทำให้การแตกตัวของเซลลูโลสในขั้นตอน hydrolysis เพิ่มขึ้น ตัวอย่างการปรับสภาพด้วยวิธีกายภาพร่วมกับทางเคมี (สุภาวดี, 2557) ได้แก่

1) การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion) ซึ่งมวลที่ผ่านการหั่นและบดแล้วจะถูกปรับสภาพต่อด้วยไอน้ำอิมพัลส์ที่ความดันสูง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยส่วนใหญ่จะควบคุมอุณหภูมิที่ 160-260 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.69-4.83 เมกะพาสกาล (MPa) วั้ระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลงให้เหลือเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและการเปลี่ยนรูปลิกนินเนื่องจากอุณหภูมิสูง และเป็นการเพิ่มศักยภาพในการย่อยเซลลูโลสด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดด้วยไอน้ำ ได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ และขนาดของชิ้นชีวมวล ข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้ คือ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบดด้วยเครื่องจักรเพียงอย่างเดียว มีความคุ้มค่าเมื่อใช้ในการปรับสภาพไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แต่มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ การทำลายส่วนประกอบของไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชและก่อให้เกิดสารองค์ประกอบที่อาจไปขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมักต่อไป

2) การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion, AFEX) เป็นการทำให้ชีวมวลสัมผัสกับแอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิและความดันสูงในระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยมีตัวแปร 4 ตัวสำคัญ ในการปรับสภาวะของกระบวนการนี้ให้มีประสิทธิผลได้แก่ ภาะบรรทุกแอมโมเนีย ภาะบรรทุกน้ำ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปกระบวนการ AFEX จะใช้แอมโมเนียเหลวปริมาณ 1-2 กิโลกรัมแอมโมเนียต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้ง ที่อุณหภูมิ 60-120 องศาเซลเซียส และความดัน 1.72-2.06 MPa เป็นเวลา 30 นาที กระบวนการนี้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้ปรับสภาพชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูง เช่น หน้สือพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(มีลิกนิน 18-30 %) เศษไม้ (มีลิกนิน 25-35 %) นอกจากนี้พบว่ากระบวนการ AFEX มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการระเบิดด้วยไอน้ำ

#### 2.2.1.4 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment)

สารเคมีตั้งแต่ พวก oxidizing agents พวกกรดต่างๆไปจนกระทั่งด่างหรือเกลือสามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ และสามารถทำลายได้ความดันและอุณหภูมิปกติได้ (สุภาวดี, 2557) ตัวอย่างเช่น

1) การปรับสภาพด้วยโอโซน (ozono-lysis) โอโซนสามารถย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสได้ เช่น ฟางข้าวสาลี ชานอ้อย หล้า พืชถั่ว ไม้สน เป็นต้น ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิเดนต์ที่ละลายน้ำได้ สามารถเข้าไปแตกโครงสร้างของลิกนินและปลดปล่อยสารประกอบที่ละลายน้ำได้ มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย เช่น กรดอะซิติก ประสิทธิภาพการย่อยสลายชีวมวลด้วยเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยโอโซน ข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้ คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน ไม่ผลิตสารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป และปฏิกิริยาสามารถดำเนินภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันห้องได้ อย่างไรก็ตามต้องใช้โอโซนปริมาณมากในกระบวนการปรับสภาพทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง

2) การปรับสภาพด้วยกรด (acid hydrolysis) กรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเดิมเคยใช้กรดเข้มข้นในการย่อยลิกโนเซลลูโลส แต่เนื่องจากกรดเข้มข้นเหล่านี้มีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องใช้ถึงปฏิกิริยาที่ทนทานต่อการกัดกร่อนและมีค่าใช้จ่ายในการคืนสภาพของกรดนั้นสูงมาก ดังนั้นจึงใช้การเจือจางกรดในการปรับสภาพและพบว่าเมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ การปรับสภาพด้วยการเจือจางกรดแบ่งเป็น 2 ชนิด คือการเจือจางกรดที่อุณหภูมิสูง (> 160 องศาเซลเซียส) และการเจือจางกรดที่อุณหภูมิต่ำ (< 160 องศาเซลเซียส) ถึงแม้ว่าการปรับสภาพด้วยกรดจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องค่าใช้จ่ายพบว่าค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี นอกจากนี้จำเป็นต้องปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนหลังจากทำการปรับสภาพ เพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป การใช้ด่างเจือจางในวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลส จะมีผลทำให้เกิดอาการบวมภายในโครงสร้างของวัตถุดิบ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและเพิ่มความเป็นรูพรุนของวัตถุดิบ โดยการเพิ่มความเป็นรูพรุนนั้นจำเป็นต้องกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันภายในโครงสร้าง ทำให้ลดความเป็นโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส และลดระดับความเป็นโพลีเมอร์ขนาดใหญ่ สามารถแยกสายโครงสร้างระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต อีกทั้งยังเป็นการทำลายโครงสร้างของลิกนินอีกด้วย (ณัฐธิดา, 2553)

3) การปรับสภาพด้วยด่าง (alkaline hydrolysis) โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาวเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการปรับสภาพด้วยด่าง ซึ่งด่างเหล่านี้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกโครงสร้างของลิกนินและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส การปรับสภาพด้วยด่างเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับสภาพด้วยกรด นันทิกา และคณะ (2554) พบว่าเมื่อปรับสภาพฟางข้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังปรับสภาพฟางข้าวจะมีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น 2 เท่า และปริมาณลิกนินลดลง 3 เท่าของเริ่มต้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อปรับสภาพธูปฤๅษีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถแยกสกัดลิกนินออกมาได้ (จักรพงษ์ และคณะ, 2555)

4) การกำจัดลิกนินโดยการออกซิเดชัน (oxidative delignification) การปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในขั้นต่อไปได้

#### 2.2.1.5 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

เป็นการปรับสภาพโดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรา รวมทั้งเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์เหล่านี้ เชื้อราทั้งชนิดที่เป็น white-rot, brown-rod และชนิดที่เป็น soft-rot สามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ โดย brown-rod มีบทบาทสำคัญในการย่อยพวกเซลลูโลส ในขณะที่ white-rot และ soft-rot จะเข้าย่อยสลายพวกลิกนินและเฮมิเซลลูโลส จากการทดลองเมื่อไม่นานมานี้ เมื่อนำลิกโนเซลลูโลสมาหมักกับเชื้อราเหล่านี้ที่อุณหภูมิ 25-35°C เป็นเวลา 3-22 วัน พบว่าไฮโลเซลลูโลสและลิกนินถูกย่อยสลายไปได้มากถึง 45-75% และ 65-80 % ตามลำดับ

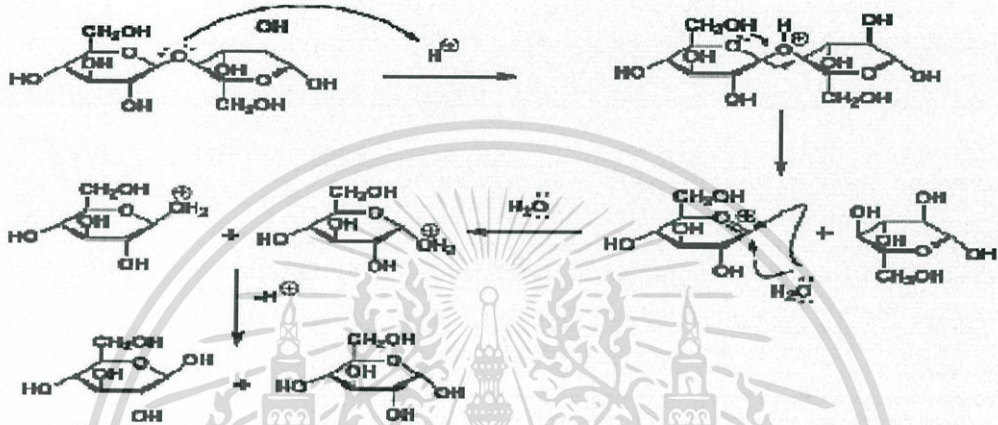
#### 2.2.2 การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การย่อยสลาย คือการย่อยเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และย่อยเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม จะได้น้ำตาลไซโลส แมนโนส อะราบิโนส และกลูโคส ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ซึ่งการย่อยสลายจะทำให้สายพอลิเมอร์ทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำให้สั้นลงกลายเป็นน้ำตาลอิสระก่อนที่จะนำไปหมักเป็นเอทานอล ซึ่งในการย่อยสลายมี 2 กระบวนการหลักๆ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเกิดปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์

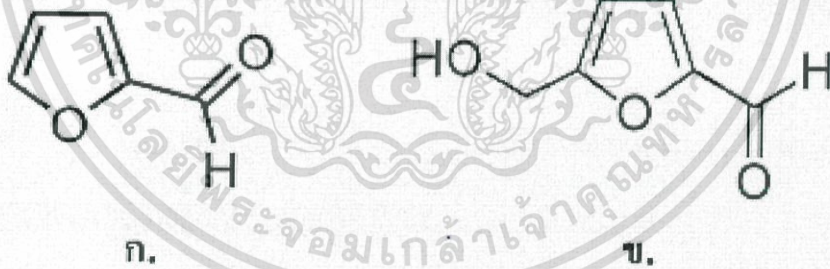
##### 2.2.2.1 การย่อยสลายด้วยกรด (Acid hydrolysis)

การย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกรดจะทำให้พันธะเบตา (1,4) ของกลูโคสในโครงสร้างแตกออกแล้วเกิดเป็นน้ำตาล ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งนิยมใช้กรดเจือจางภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง หรืออาจจะเพิ่มความเข้มข้นของกรดขึ้นเพื่อลดอุณหภูมิและความดันให้ต่ำลงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยกรดเจือจาง จะต้องนำไปทำปฏิกิริยาสะเทินก่อนกระบวนการหมัก การย่อยวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยกรด นอกจากจะได้น้ำตาลแล้วยังพบสารพิษเกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายของเซลลูโลสไปเป็นกลูโคส และเฮมิเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลไซโลส, แมนโนส, กาแลคโทส, กลูโคส และอะราบิโนส เป็นต้น เมื่ออยู่ในภาวะที่มีอุณหภูมิและความดันสูง กลูโคส

และไซโลสจะถูกละลายและกำจัดน้ำออกเกิดเป็นอนุพันธ์ฟิวรานเช่น เฟอร์ฟูรัล(furfural) และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (hydroxymethylfurfural, HMF) ดังรูปที่ 2.12 ที่สามารถย่อยสลายต่อได้เป็นกรดฟอร์มิก (formic acid) และในกรณีของ HMF เมื่อย่อยสลายแล้วจะได้กรดเลวูลินิก (levulinic acid) ส่วนลิกนินเมื่อเกิดการย่อยสลายแล้วจะเกิดสารประกอบฟีนอลิกและกรดอื่นๆขึ้น (นวลจันทร์ และคณะ, 2554)ซึ่งสารเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการลดสารพิษก่อนการหมัก เพื่อช่วยให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.11 แสดงปฏิกิริยาการเกิดการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (ที่มา: ชัยนันท์ และเฉลิม, 2555)



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างทางเคมี ก. เฟอร์ฟูรัล ข. ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (ที่มา: ชัยนันท์ และเฉลิม, 2555)

2.2.2.2 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (enzyme hydrolysis)

เป็นการใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายสายของเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาล โดยเอนไซม์เซลลูเลส ปกติแล้วปฏิกิริยานี้จะเกิดภายในอุณหภูมिर่างกาย ในการย่อยสลายจึงต้องใช้เอนไซม์หลายชนิด สาเหตุที่ต้องใช้หลายชนิด เนื่องจากเอนไซม์นั้นมีความจำเพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยาสูง เช่น เอนไซม์ endocellulase จะย่อยเซลลูโลสโครงสร้างผลึกให้เป็นเซลลูโลสสายโซ่สั้น ส่วนเอนไซม์ exocellulase จะย่อยเซลลูโลสสายโซ่ให้เป็นเซลลูบิโอส และ  $\beta$ -glucosidase จะย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์บิโอสให้เป็นกลูโคส และขั้นตอนการทำปฏิกิริยาต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง ใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ pH 5 โดยไม่เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในอนาคตรอยสลายนี้น่าจะเป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากให้ปริมาณน้ำตาลที่สูงจึงเหมาะแก่การหมักเอทานอล

## ปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิส

### 1. อุณหภูมิ

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่สำคัญ คืออุณหภูมิ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดได้ต้องอาศัยความร้อนเพื่อทำให้น้ำเข้าทำลายพันธะของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสคือ 180 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสคือ 250 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะมีผลทำให้น้ำตาลที่ไฮโดรไลซิสออกมาได้ถูกทำลายไป แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะมีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสมีปริมาณน้อยมาก (นันทิกา และคณะ, 2554)

### 2. ความดัน

ความดันที่ใช้จะแปรผันตามอุณหภูมิที่ให้กับเครื่องปฏิกรณ์ ความดันมีผลคือถ้าความดันมีค่าสูงขึ้นจะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดได้ดีขึ้น แต่สามารถเพิ่มความดันได้ถึงช่วง 35-40 บาร์ เท่านั้น ซึ่งความดันนี้เกิดขณะที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าอยู่ในช่วง 242 ถึง 250 องศาเซลเซียส เพราะถ้าเพิ่มความดันมากกว่านี้จะมีผลทำให้น้ำตาลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสถูกทำลาย

### 3. ความเข้มข้นของสารละลายกรด

ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต้องอาศัยสารละลายกรดเจือจางเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้นและเกิดได้มากขึ้น เนื่องจากถ้าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยและช้ากว่าการมีตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้สารละลายกรดเจือจางที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ความเข้มข้นของสารละลายกรดที่ควรใช้คือ 0.5 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรเท่านั้น ถ้าใช้มากกว่านี้อาจจะกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ได้ และมีผลทำลายน้ำตาลที่ได้อีกด้วย กรดที่นิยมใช้เช่น กรดอะซิติก กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น

### 4. เวลา

ถ้าเพิ่มเวลาในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้มากขึ้น ปริมาณน้ำตาลที่ได้ออกมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็จะมากตามไปด้วย เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถูกทำลายพันธะมากขึ้น

## 5.พื้นที่ผิว

ขนาดของวัสดุที่เป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีผลต่อปริมาณน้ำตาลที่ได้ เนื่องจากขนาดของวัสดุยิ่งเล็กก็ยิ่งมีผลทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้น และปริมาณน้ำตาลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

### 2.3 แหน

ชื่อสามัญ แหนเป็ด (Duckweed)

ชื่อวงศ์ Lemnaceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Lemna minor* L.

ชื่ออื่น แหนเล็ก (กลาง)

#### 2.3.1 ลักษณะทั่วไปของแหน

มักพบเป็นแพลอยที่ผิวน้ำ ลักษณะเป็นแผ่น ใบมีขนาดเล็ก และรากเห็นเป็นเส้นยาวตรงไม่แตกแขนง 1 เส้น ใบอาจอยู่เดี่ยวๆ หรือเชื่อมกันเป็นกระจุก 2-5 ใบ สีเขียวอ่อนถึงสีม่วงแกมแดง รูปใบไม่สมมาตร รูปไข่กลับ หรือรูปไข่แกมขอบขนาน กว้าง 0.7-2.8 เซนติเมตร ยาว 1.2-4.8 มิลลิเมตร เส้นใบ 3 เส้น ดอกขนาดเล็กมาก ออกเป็นช่อในถุงที่ขอบใบ ประกอบด้วยดอกเพศผู้ 2 ดอก และดอกเพศเมีย 1 ดอก ผลขนาดเล็ก รูปร่างค่อนข้างรี

#### 2.3.2 การป้องกันและกำจัด

แหนเป็นวัชพืชที่มีประโยชน์มากกว่าโทษ ส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ หรือการปล่อยปลากินพืชในจำนวนที่เหมาะสมกับขนาดพื้นที่หรืออัตราการขยายพันธุ์ของแหนในพื้นที่นั้น

#### 2.3.3 ประโยชน์ของแหน

*Lemna minor* L. แหนเล็ก หรือเรียกโดยทั่วไปว่าแหนเป็ดเล็กจัดเป็นวัชพืชที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีนประมาณ 20-40 % เส้นใยประมาณ 4-6 % และยังเป็นพืชที่มีกรดไขมันอิสระอยู่อย่างสมบูรณ์ นิยมนำไปตากแห้งทำเป็นปุ๋ย เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์หรือผสมในอาหารของสัตว์เช่น อาหารของเป็ด ห่าน ปลา ไก่ นกกระทา และสุกร เป็นต้น เนื่องจากแหนเป็ดเล็กเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้รวดเร็วจึงมีผู้ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้บำบัดน้ำเสีย เช่น การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเป็ด พบว่าในระยะเวลา 100 วัน สามารถดูดซับค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ได้สูงสุดถึง 49.10% ดังนั้นจึงนิยมนำแหนเป็ดเล็กมาใช้เป็นอาหารโปรตีนราคาถูกสำหรับเลี้ยงเป็ดเทศ นอกจากนี้มีการศึกษาประสิทธิภาพของแหนในการดูดซับโลหะหนักจำพวกตะกั่วและแคดเมียม ของแหนเป็ดเล็กจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่าที่ค่า pH 3.5 สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด 11.834 มิลลิกรัมต่อกรัมแหนเป็ด และมีจุดอิ่มตัวในการ

ดูดซับที่ 20 นาที ส่วนแควมเปียมพบว่าค่า pH 4 แหนเป็ดเล็กสามารถดูดซับได้สูงสุด 6.779 มิลลิกรัมต่อกรัมแหนเป็ด และมีจุดอิ่มตัวในการดูดซับที่ 3 นาที

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**จักรพงษ์ และคณะ (2555)** ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยลำต้นรูปฤๅษีด้วยกรดเพื่อการผลิตเอทานอล โดยปรับสภาพลำต้นรูปฤๅษีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 นาทีเพื่อกำจัดลิกนิน พบว่า Kappa number มีค่าเท่ากับ 3.55 ลิกนินลดลง 0.67 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห่ จากนั้นนำมาย่อยด้วยกรด บัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1-10 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราส่วนลำต้นรูปฤๅษีต่อกรด 1 : 20 น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 0-10 ชั่วโมง พบว่าสภาวะที่ให้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดคือ การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ได้น้ำตาลรีดิวซ์ 3.62 กรัมต่อลิตร

**ฐิติมา และคณะ (2554)** ได้ศึกษาการปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อการผลิตเอทานอล โดยกล่าวว่าการปรับสภาพต้นข้าวโพดมีความสำคัญมากต่อการผลิตเอทานอลจากต้นข้าวโพด เนื่องจากต้นข้าวโพดมีองค์ประกอบของลิกนินซึ่งเป็นตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ จึงต้องกำจัดลิกนินออกก่อน ซึ่งทำการทดลองโดยนำข้าวโพดที่บดละเอียดมาปรับสภาพด้วยไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 100-300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปรับสภาพต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส พบว่าการปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร น่าจะมีความเหมาะสมที่สุดในการนำต้นข้าวโพดไปผลิตเอทานอล เนื่องจากให้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มมากที่สุดโดยเพิ่มจาก 49.23 เป็น 75.60 เปอร์เซ็นต์

**นันทิกา และคณะ (2554)** ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากซางข้าวฟ่างหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ซางข้าวฟ่างหวานเมื่อนำมาลดขนาดจนเป็นผงละเอียดจะมีองค์ประกอบสำคัญได้แก่ เฮมิเซลลูโลส 25.42 เซลลูโลส 58.23 และลิกนิน 14.95 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห่ ทำการปรับสภาพซางข้าวฟ่างหวานด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น 90.37 และมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส และลิกนินลดลงเป็น 5.97 และ 3.56 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห่ จากนั้นนำซางข้าวฟ่างหวานที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากซางข้าวฟ่างหวานคือใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 21.44 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 72.34 นาที และใช้สัดส่วนของซางข้าวฟ่างหวานต่อสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 1 : 19.3 กรัมต่อมิลลิตรจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 34.97 เปอร์เซ็นต์กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**นุจริย์ และอนงค์นาฏ (2555)** ศึกษาการสกัดน้ำตาลกลูโคสจากใบอ้อยด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส โดยใช้สารเคมีในการศึกษา 2 ชนิดคือ กรดซัลฟิวริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการใช้กรดในการไฮโดรไลซิสจะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากกว่าการใช้ด่างในการไฮโดรไลซิส ซึ่งปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงที่สุดที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดมีมากถึง 109.6 กรัมต่อลิตร

**บุษกร (2555)** ศึกษาการผลิตเอทานอลจากฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง ปัจจัยที่ศึกษาคือเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพด้วยไอน้ำ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก สามารถลดปริมาณลิกนินได้สูงถึงร้อยละ 47.43 และเหลือปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าวร้อยละ 53.59

**เบญจวรรณ และกฤษณเวช (2557)** ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุดและเกิดเป็นเฟอร์ฟูรัลน้อยที่สุด จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดชนิดต่างๆ โดยวัตถุดิบที่ใช้คือ ชานอ้อย พบว่า กรดที่เหมาะสมกับการไฮโดรไลซ์คือ กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ความเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที จะทำให้ได้ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดคือ 3.6649 กรัมต่อลิตร และมีปริมาณเฟอร์ฟูรัล 1.4709 มิลลิกรัมต่อลิตร

**พิชญ์สินี และคณะ (2556)** ศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวด้วยด่างสองชนิดคือ สารละลายแอมโมเนีย และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดลิกนินได้ร้อยละ 38.6 และ 77.2 ตามลำดับ และเมื่อนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพไปย่อยด้วยเอนไซม์เชิงซ้อน ผลที่ได้คือเอนไซม์จะย่อยสลายเซลลูโลสและไซแทนได้ดีขึ้น สามารถผลิตน้ำตาลได้เพิ่มขึ้นเป็น 3.5 และ 0.3 เท่า เมื่อปรับสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนียและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ตามลำดับ

**รัชพล (2554)** ศึกษาการเตรียมไฮโดรไลสจากผักตบชวาโดยการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับการปรับสภาพทางเคมี ในการปรับสภาพเพื่อแยกลิกนินออกจากผักตบชวาใช้ 3 วิธีที่แตกต่างกัน คือแช่ด้วยน้ำเปล่า แช่สารละลายด่าง และแช่สารละลายกรด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถกำจัดลิกนินและไม่ทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูญเสียไป คือสภาวะที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงเป็นวิธีปรับสภาพที่ดีที่สุดพบว่าได้เซลลูโลสร้อยละ 47.38 โดยน้ำหนัก และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 23.16 โดยน้ำหนักและปริมาณลิกนินเหลืออยู่เพียงร้อยละ 3.71 โดยน้ำหนัก

**วิรัชรอง (2547)** ศึกษาการผลิตเฟอร์ฟูรัลจากแกลบโดยไฮโดรไลสควบคู่กับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริก แต่ลดอัตราส่วนของกรดซัลฟิวริกต่อแกลบ จะทำให้ได้ร้อยละผลได้เฟอร์ฟูรัลเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเฟอร์ฟูรลจากแกลบคือใช้อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 160 บาร์ ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริก 5 อัตราส่วนของกรดซัลฟิวริกต่อแกลบ 5:1 และอัตราการป้อนเข้าคาร์บอนไดออกไซด์ 5 กรัมต่อนาที จะให้ร้อยละผลได้เฟอร์ฟูรลสูงถึง 17.71

**Alvira et al. (2009)** ใบบีโอทานอลที่ผลิตได้จากวัชวลิกโนเซลลูโลสมีข้อได้เปรียบทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมมากกว่า เมื่อเทียบกับเอทานอลที่ผลิตได้จากวัตถุดิบจำพวกแป้งและน้ำตาล อย่างไรก็ตามโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบหลักในวัชวลิกโนเซลลูโลสก็ยังเป็นอุปสรรคต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส และเอมิเซลลูโลส ให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล ทำให้ต้องมีการปรับสภาพวัชวลิกโนเซลลูโลสก่อนการย่อย ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักในการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยด้วยเอนไซม์

**Chen et al. (2012)** ศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเอทานอลจากเหาน *Landoltia punctata* โดยทำการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ pectinase ปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณของเอนไซม์ อุณหภูมิ และเวลาในการปรับสภาพ พบว่าเมื่อใช้เอนไซม์ pectinase ปริมาณ 26.54 หน่วยต่อกรัม เหาน ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 300 นาที ในการปรับสภาพจะให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดถึง  $218.64 \pm 3.10$  มิลลิกรัมต่อกรัมเหานแห้ง ซึ่งเมื่อเทียบกับเหานก่อนปรับสภาพพบว่าปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น 142 เปอร์เซ็นต์ และทำการทดลองต่อ โดยการหมักน้ำตาลที่ได้พบว่ามีปริมาณเอทานอลเกิดขึ้นเท่ากับ  $30.8 \pm 0.8$  กรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการหมัก 90.04 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราผลได้เท่ากับ 2.20 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

**Lenihan et al. (2010)** ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยเปลือกมันฝรั่งด้วยกรดฟอสฟอริกเจือจาง ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิระหว่าง 35-200 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของกรดระหว่าง 2.5-10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปรับสภาพเปลือกมันฝรั่งด้วยกรดฟอสฟอริก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดถึง 55.2 กรัมต่อ 100 กรัมของเปลือกมันฝรั่งแห้ง แสดงให้เห็นว่าเปลือกมันฝรั่งสามารถใช้เป็นตัวเลือกในการผลิตน้ำตาลเพื่อสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำ และยังให้ผลผลิตเป็นน้ำตาลในอัตราที่สูง

**Rebecca et al. (2007)** ศึกษาการเปรียบเทียบการปรับสภาพก้านฝ้ายด้วยวิธีทางเคมีต่างๆ เพื่อการผลิตเป็นเอทานอล สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการปรับสภาพคือกรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโอโซน พบว่าเมื่อปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้เซลลูโลสเปลี่ยนไปเป็นกลูโคสได้น้อยเมื่อนำก้านฝ้ายที่ปรับสภาพแล้วเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิส ในขณะที่เมื่อปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์อัตราการเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลกลูโคสจะมีมากถึงร้อยละ 60.8 และในส่วนของโอโซนพบว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิกนิน ไซเลน และกลูแคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wen *et al.* (2004) ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากปุยคอกด้วยการไฮโดรไลซิส โดยทำการปรับสภาพปุยคอกด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเฮมิเซลลูโลสจะถูกละลายอย่างสมบูรณ์ กลายเป็นน้ำตาลอะราบิโนส กาแลคโตส และไซโลส ทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง แต่ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเพิ่มมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เตาเผา (Muffle furnace) รุ่น Centroller P320 บริษัท Nabertherm
2. ตู้อบ (Oven) รุ่น UN55 บริษัท Memmert
3. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Gencsys105uv-vis บริษัท Thermo Scientific
4. เครื่องชั่งชนิดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204/01 บริษัท Mettler Toledo
5. เครื่องย่อย (Reflux) รุ่น BE6 250ml บริษัท FALC instrument
6. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)
7. โถดูดความชื้น (Desiccator)
8. เตาให้ความร้อน (Hotplate)
9. ตู้ดูดควัน (Hood)
10. ตะแกรงร่อน
11. เทอร์โมมิเตอร์
12. ปรอทวัดอุณหภูมิเครื่องแก้วและพลาสติก

#### 3.1.2 สารเคมี

1. กลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ), AR grade, Carlo Erba
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), AR grade, Carlo Erba
3. โพแทสเซียมโซเดียมทราเทรต ( $KNaC_4H_4O_6$ ), AR grade, Carlo Erba
4. กรดไดไนโตรซาลิซิลิก (3,5-dinitrosalicylic), AR grade, Carlo Erba
5. โซเดียมทอลูริลซัลเฟต, ( $NaC_{12}H_{25}SO_4$ ), AR grade, Carlo Erba
6. ไดโซเดียมเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิเตต (EDTA), AR grade, Carlo Erba
7. โซเดียมบอเรตเดคาไฮเดรต ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ), AR grade, Carlo Erba
8. แอนไฮดรัสไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $Na_2HPO_4$  anhydrous), AR grade, Rankem
9. ไตรเอทิลีนไกลคอล ( $C_6H_{14}O_4$ ), AR grade, Acros
10. แอนไฮดรัสโซเดียมซัลไฟต์ ( $Na_2SO_3$  anhydrous), AR grade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. อะซิโตน ( $C_3H_6O$ ), AR grade, Carlo Erba
12. กรดซัลฟิวริก 96% ( $H_2SO_4$ ), AR grade, Carlo Erba
13. เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB), AR grade, Acros
14. กรดไฮโดรคลอริก 37% (HCl), AR grade, Carlo Erba
15. แอนิลีน 99%
16. สแตนนัสคลอไรด์ ( $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ ), AR grade, Carlo Erba
17. เอทานอล 95%
18. กรดอะซิติกเข้มข้น

### 3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ແหนเป็ดທີ່ใช้ในการศึกษาได้ทำการเก็บตัวอย่างจากบริเวณคูน้ำริมทางรถไฟฝั่งชอย  
 หนองกรุง1 การเตรียมตัวอย่างทำโดยนำແหนเป็ดมาล้างด้วยน้ำเปล่าให้สะอาด ตากแดดให้แห้ง และ  
 บั่นด้วยเครื่องบั่นให้ละเอียด นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาวาง  
 ทิ้งไว้ในเคซิเคเตอร์จนเย็น จากนั้นนำตัวอย่างไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เก็บตัวอย่างใน  
 ถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดและใส่ไว้ในเคซิเคเตอร์เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของແหน

ทำการศึกษสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของແหนในหัวข้อ 3.2 ดังต่อไปนี้

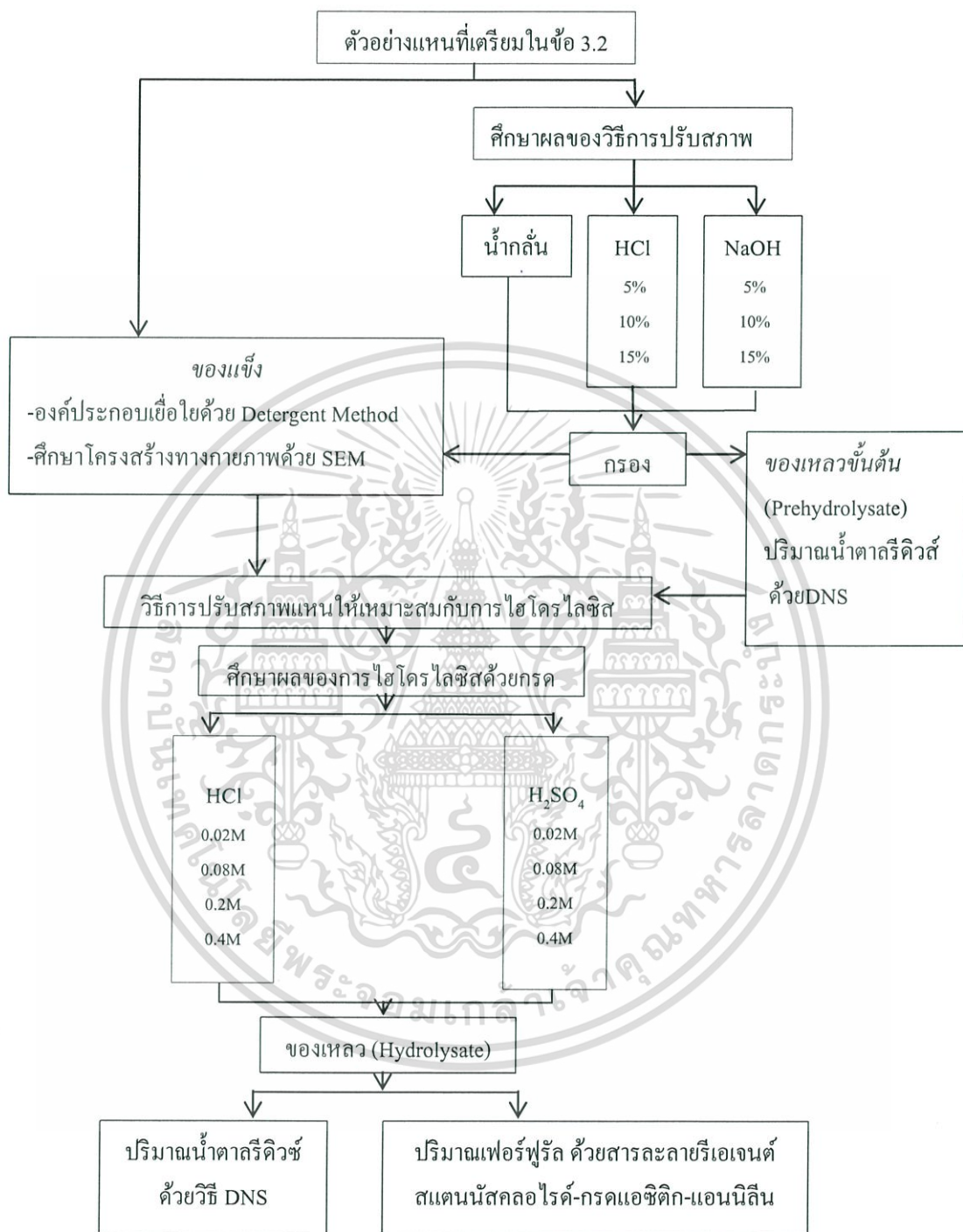
-เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธี Detergent ตาม Van Soest (1959) รายละเอียด  
 วิธีการดังแสดงในภาคผนวก ก

-น้ำตาลรีดิวส์ ด้วยวิธี 3,5-Dinitrosalicylic acid Method (DNS) ตาม Miller (1959)  
 รายละเอียดวิธีการดังแสดงในภาคผนวก ก

-โครงสร้างทางกายภาพ ด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM)

### 3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงกรอบการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพแห้งด้วยกรดและต่างที่ความเข้มข้นต่างๆ

1. ชั่งตัวอย่างแห้งจากหัวข้อ 3.2 ประมาณ 20 กรัม ใส่ลงขวดดูเรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการปรับสภาพโดยการเติมน้ำกลั่น ในอัตราส่วนของแห้งต่อปริมาตรของสารปรับสภาพ เท่ากับ 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร
3. นำไปนึ่งฆ่าเชื้อแบบลดความดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำไปปั่นเหวี่ยงแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน
5. นำส่วนที่เป็นของเหลวขั้นต้น (prehydrolysate) ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS
6. นำส่วนที่เป็นของแข็งไปล้างด้วยน้ำกลั่นให้ได้ค่า pH เท่ากับ 7 และนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำแห้งที่ปรับสภาพไปวิเคราะห์องค์ประกอบเยื่อใย (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ด้วยวิธี Detergent method และศึกษาโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM)
7. ทำซ้ำ โดยเปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพในข้อ 2 จากน้ำกลั่นเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5% 10% 15% และกรดไฮโดรคลอริก 5% 10% 15% ตามลำดับ

#### 3.4.2 การศึกษาผลของวิธีการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ

แห้งที่ผ่านการปรับสภาพในหัวข้อ 3.4.1 จะนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรด โดยมีรายละเอียดวิธีการดังนี้

1. ชั่งแห้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการปรับสภาพที่เหมาะสมตามหัวข้อ 3.4.1 ประมาณ 1 กรัม ใส่ลงขวดคูแรน
2. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในอัตราส่วนของแห้งต่อสารละลายกรด 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร
3. นำไปนึ่งฆ่าเชื้อแบบลดความดัน (autoclave) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนของแข็งกับไฮโดรไลสเอทออกจากกัน
4. นำไฮโดรไลสเอท (Hydrolysate) ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS และปริมาณเฟอร์ฟูรัลด้วยสารละลายรีเอเจนต์สแตนนัสคลอไรด์-แอนิลีน-กรดแอสติค
5. ทำซ้ำ 3 ครั้ง
6. ทำซ้ำแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในข้อ 2 จากความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ เป็น 0.08, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ ตามลำดับ
7. ทำซ้ำแต่เปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการย่อยเป็นกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0.02, 0.08, 0.2, 0.4 โมลาร์ ตามลำดับ

## บทที่ 4

# ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากแหล่งเปิดที่เก็บรวบรวมจากคูน้าแห่งหนึ่ง รวมทั้งศึกษาผลของวิธีการปรับสภาพแห้งด้วยกรดและต่างที่ความเข้มข้นต่างๆ และผลของการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ ได้ผลการศึกษาดังนี้

### 4.1 ลักษณะของแห้งที่ใช้ในการศึกษา

แห้งที่ใช้ในการศึกษาทำการเก็บตัวอย่างรวบรวมจากคูน้าที่มีความกว้างประมาณ 2 เมตร และยาวตลอดแนวรางรถไฟ แห้งที่เก็บได้มีลักษณะเล็ก ใบอาจเป็นใบเดี่ยวหรือเชื่อมติดกันเป็นกระจุก 2-4 ใบ ใต้ใบมีรากขนาดเล็ก (รูปที่ 4.1) เมื่อผ่านการเตรียมตัวอย่างจะได้แห้งที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะแห้งสดที่ใช้ศึกษา



รูปที่ 4.2 ลักษณะตัวอย่างแห้งที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบย่อยของແຫນພວ່າปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบย่อยของແຫນ

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อน้ำหนักแห้ง
เฮมิเซลลูโลส	38.92±10.76
เซลลูโลส	14.34±1.25
ลิกนิน	14.55±1.26
เถ้า	1.11±0.15

## 4.2 ผลจากวิธีการปรับสภาพແຫນด้วยกรดและด่างที่ความเข้มข้นต่างๆ

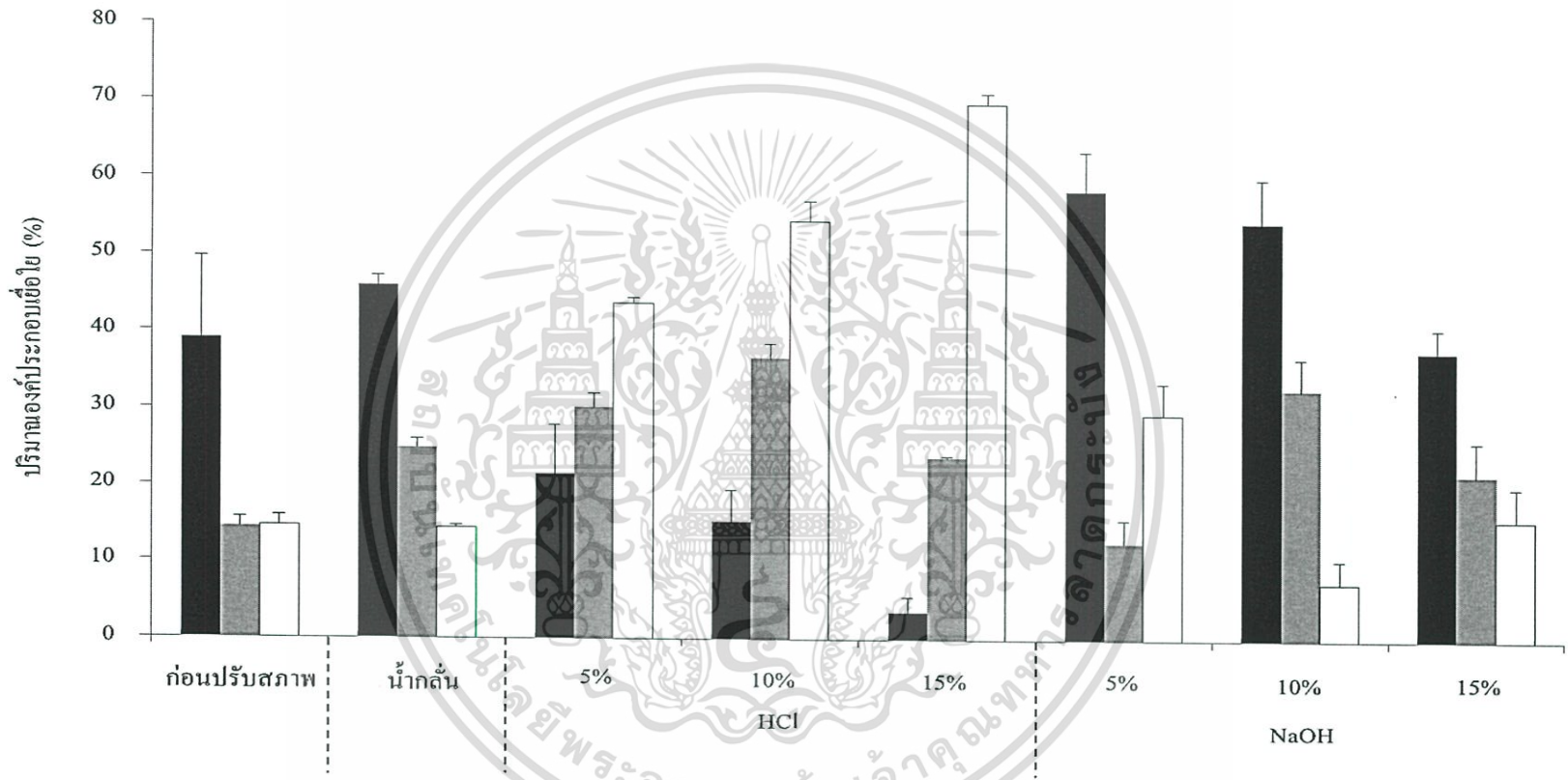
### 4.2.1 องค์ประกอบย่อยของແຫນที่ผ่านการปรับสภาพ

จากการนำແຫນไปปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำແຫນที่ผ่านการปรับสภาพมาวิเคราะห์องค์ประกอบย่อย ได้แก่ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เทียบกับແຫນก่อนปรับสภาพ และແຫນที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น พร้อมกับศึกษาโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) พบว่าปริมาณองค์ประกอบย่อยของແຫນก่อนปรับสภาพ และແຫນที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นมีความคล้ายคลึงกัน (รูปที่ 4.3) โดยในແຫนก่อนปรับสภาพมีปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินเท่ากับ 38.92±10.76, 14.34±1.25, 14.55±1.26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ในขณะที่ແຫนเมื่อปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นจะมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เท่ากับ 45.83±1.38, 24.83±1.11, 14.22±0.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าແຫນที่ผ่านการปรับสภาพมีองค์ประกอบย่อยที่ต่างไปเมื่อเทียบกับແຫนก่อนปรับสภาพและແຫนที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นกล่าวคือ เมื่อปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปริมาณเฮมิเซลลูโลสจะมีแนวโน้มลดลง เซลลูโลสและลิกนินจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการปรับสภาพมีผลต่อองค์ประกอบย่อยของແຫນ โดยปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีค่าลดลงจาก (21.42±6.38 เป็น 15.15±4.23 และ 3.51±1.98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดเป็น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wen *et al.* (2004) ที่ได้ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากบักขี้โพธิ์โดยการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกพบว่า หลังการปรับสภาพเฮมิเซลลูโลสจะเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์เป็นน้ำตาลอะราบินโนส กาแลคโตส และไซโลส ทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง Brodeur

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*et al.* (2011) ได้ศึกษาวิธีการปรับสภาพทางเคมีโดยใช้วัสดุชีวมวลเป็นวัตถุดิบ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้กรดเป็นสารปรับสภาพจะทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากว่ากรดสามารถเข้าไปทำลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสภายในเซลล์พืชได้ ในขณะที่ปริมาณเซลลูโลสจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น  $30.21 \pm 1.71$  และ  $36.59 \pm 1.75$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารปรับสภาพตามลำดับ เนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลสที่ลดลงทำให้ลดตัวขัดขวางในการทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส แต่ในทางกลับกันเมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 15% ปริมาณเซลลูโลสจะมีค่าลดลงเป็น  $23.70 \pm 0.20$  เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่สูงขึ้นนั้นสามารถไปทำลายโครงสร้างของเซลลูโลสได้มากขึ้น ปริมาณเซลลูโลสจึงลดลง อย่างไรก็ตามพบว่ากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณลิกนินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของบุญกร (2555) ที่ทำการศึกษการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำ พบว่าลิกนินมีปริมาณมากขึ้นสาเหตุเนื่องมาจากลิกนินที่ตรวจวัดได้มีทั้งลิกนินแท้และลิกนินเทียม ซึ่งลิกนินเทียมจะเกิดจากการควบแน่นซ้ำของน้ำตาลหรือน้ำตาลที่เสื่อมสภาพ และสารแทรกตัวอื่นๆ (Extractives)

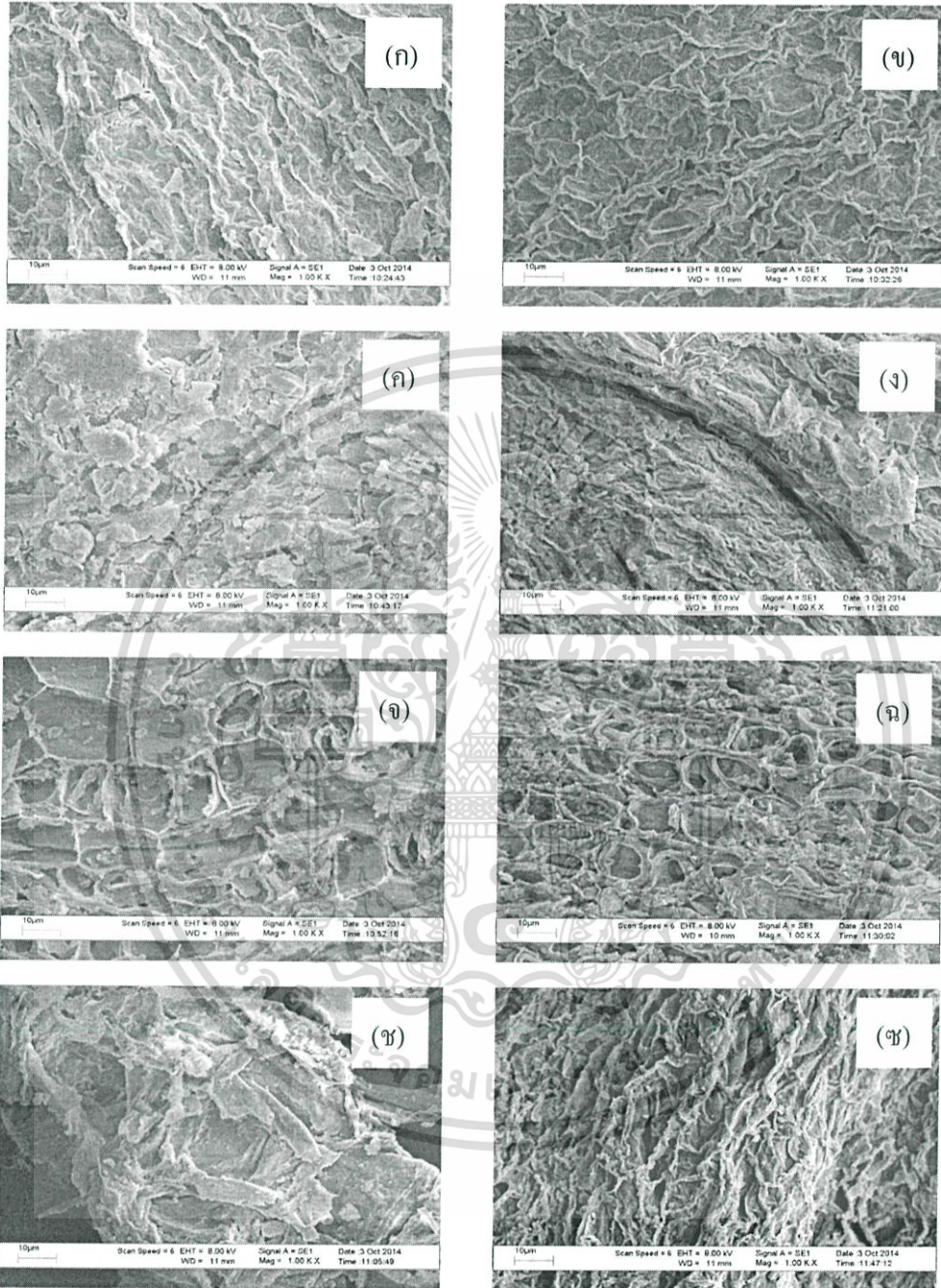
เมื่อพิจารณาผลการปรับสภาพแทนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน (รูปที่ 4.3) พบว่าแทนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีองค์ประกอบเยื่อใยที่แตกต่างไปจากแทนก่อนปรับสภาพ แทนที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น และแทนที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก โดยลิกนินที่ได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนันทิกาและคณะ (2554) ที่ได้ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากฟางข้าวพบว่าเมื่อปรับสภาพโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10% จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินมากที่สุด และการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารในการปรับสภาพจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Saponification ไปทำลายพันธะระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต และจากการถูกทำลายพันธะนี้เองจึงทำให้โครงสร้างของลิกนินถูกทำลายลงไปด้วย เป็นผลทำให้ปริมาณของลิกนินลดลง (Zheng *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตามการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มได้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงกว่าเมื่อเทียบกับแทนก่อนปรับสภาพ แทนที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น และปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เฮมิเซลลูโลสจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีฤทธิ์กัดกร่อนเส้นใย มีความสามารถในการลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และยังสามารถทำลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสด้วย (วรารักษ์ และคณะ, 2556)



รูปที่ 4.3 ปริมาณเฮมิเซลลูโลส(■) เซลลูโลส(■) และลิกนิน(□) ของแหนก่อนปรับสภาพ แหนที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น และแหนที่ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.2 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเหนื่อที่ผ่านการปรับสภาพ

การปรับสภาพมีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเหนื่อดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของเหนื่อเปิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง(SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ก) ก่อนปรับสภาพ (ข) ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น (ค), (จ), (ช) ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 5% 10% และ 15% ตามลำดับ (ง), (ฉ), (ซ) ปรับสภาพด้วยโซเดียมไซเตรอิก 5% 10% และ 15% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าแห่นเปิดก่อนการปรับสภาพจะมีลักษณะพื้นผิวที่มีเส้นใยเกาะเกี่ยวกันเป็นแผ่นใหญ่จับตัวกันอย่างหนาแน่น (รูปที่ 4.4 ก) ซึ่งเมื่อเทียบกับแห่นเปิดที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นพบว่าลักษณะโครงสร้างมีความคล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าน้ำไม่ได้มีผลในการช่วยเพิ่มหรือลดความพรุนของพื้นที่ผิวของแห่นได้ เมื่อพิจารณาแห่นเปิดที่ปรับสภาพด้วยกรดและด่างพบว่าพื้นผิวของแห่นมีลักษณะ โครงสร้างเปลี่ยนไปโดยเมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารปรับสภาพ จะทำให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นจาก 5% (รูปที่ 4.4 ค) เป็น 10% (รูปที่ 4.4 จ) และ 15% (รูปที่ 4.4 ช) ทำให้มีการแยกของเส้นใยอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นการแตกของโครงสร้างได้อย่างชัดเจนและมากขึ้น การปรับสภาพโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ผลในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือพื้นผิวมีความขรุขระมาก การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดช่องว่าง มีรูพรุนมากขึ้น (รูป 4.4 ง,ฉ,ช) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของฐิติมาและคณะ(2554) ที่ได้ทำการปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เจือจางพบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้วัสดุดิบมีสภาพพร้อมต่อการผลิตเอทานอล เนื่องจากโครงสร้างของข้าวโพดเกิดการเปิดตัวออกมากขึ้น และมีความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้นด้วย

4.2.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวขั้นต้น (prehydrolysate)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของของเหลวที่กรองได้หลังปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นดังนี้คือ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับน้ำกลั่นได้ผลดังรูปที่ 4.5



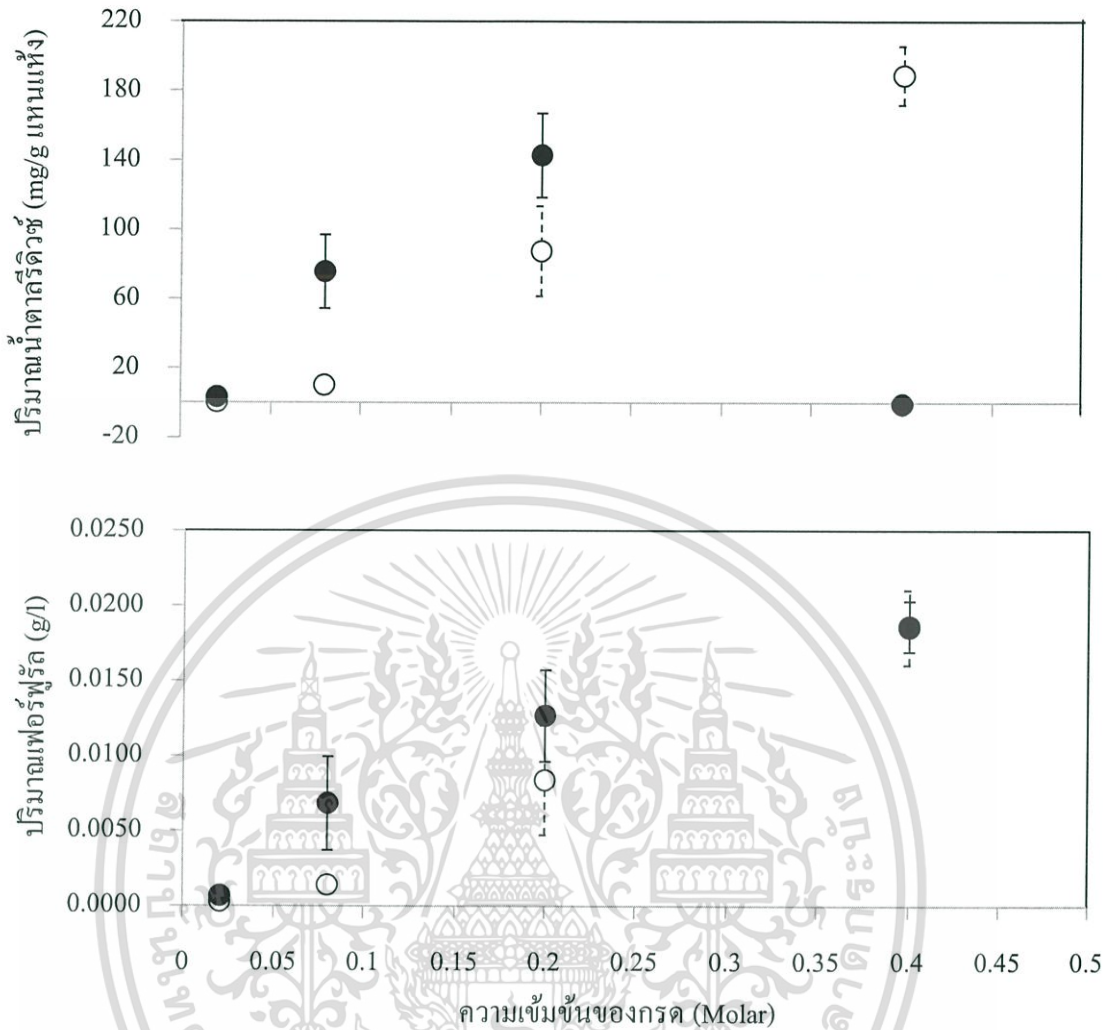
รูปที่ 4.5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวขั้นต้น (prehydrolysate) ที่ได้จากการปรับสภาพแห่นด้วยกรดไฮโดรคลอริก (○) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (●) ที่ความเข้มข้นต่างๆ เทียบกับการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น

จากรูปที่ 4.5 พบว่า prehydrolysate ของແຫ່ທີ່ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ prehydrolysate ของແຫ່ທີ່ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในกระบวนการปรับสภาพ เหมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลส (ชชนันท์ และเฉลิม, 2555) ดังนั้นเมื่อใช้กรดในการปรับสภาพ กรดจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของเหมิเซลลูโลสให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งจะเปลี่ยนให้กลายเป็นสารประกอบเฟอร์ฟูรัลได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun and Cheng (2005) ศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆกัน พบว่าหลังการปรับสภาพปริมาณน้ำตาลอะราบิโนส กาแลกโตส และไซโลส ซึ่งน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดเป็นส่วนประกอบของเหมิเซลลูโลส จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในการปรับสภาพด้วยกรดจะย่อยสลายเหมิเซลลูโลสได้ดี ในทางกลับกันพบว่า prehydrolysate ของແຫ່ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่า prehydrolysate ของແຫ່ที่ปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น ทั้งนี้เป็นการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสบู่ (Saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเหมิเซลลูโลสกับกลีซิน ทำให้กลีซินหลุดออกจากโครงสร้าง ฐพูนของวัตถุดิบจึงเพิ่มขึ้น วัตถุดิบเกิดการพองตัวส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น ระดับขั้นของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of Polymerization) และความเป็นผลึกของเซลลูโลสลดลง เกิดเป็นน้ำตาลกลูโคสได้ง่ายขึ้น (ฐิตินา และคณะ, 2554)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเยื่อใย ได้แก่ เหมิเซลลูโลส เซลลูโลส และกลีซิน รวมทั้งศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของແຫ່ และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของ Prehydrolysate พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้ແຫ່มีปริมาณกลีซินลดลง โครงสร้างทางกายภาพมีความขรุขระมากขึ้น อีกทั้งยังได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวขั้นต้นที่อาจนำไปใช้ร่วมกับไฮโดรไลสเทสในการผลิตเอทานอลได้ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการปรับสภาพແຫ່ เบ็ดเพื่อใช้ในการไฮโดรไลซิสต่อไป

#### 4.3 ผลจากการไฮโดรไลซิสແຫ່ด้วยกรด

ແຫ່ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10% จะถูกนำมาไฮโดรไลซิสหรือย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆดังนี้คือ 0.02, 0.08, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ นำของเหลวที่ได้จากการย่อย (hydrolysate) มาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณเฟอร์ฟูรัล ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณเฟอรูลในไฮโดรไลเสท (hydrolysate) ที่ได้จากการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก (○) และกรดซัลฟิวริก (●) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 พบว่า hydrolysate ของแห่นที่ย่อยด้วยกรด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยแห่นด้วยกรดซัลฟิวริกจะมีปริมาณสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดไฮโดรคลอริกที่ทุกความเข้มข้น ยกเว้นที่ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยแห่นด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าลดลงมากเท่ากับ  $-0.72 \pm 0.45$  มิลลิกรัมต่อกรัมแห่นแห้ง ในขณะที่การย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ก็มีค่าเพิ่มขึ้นถึง  $189.00 \pm 16.97$  มิลลิกรัมต่อกรัมแห่นแห้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของนันทิกา และคณะ (2554) ที่ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากขางข้าวฟ่างหวานโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 6.70-24.55 โมลาร์ พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้นจาก 6.70-15.63 โมลาร์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น

กรดซัลฟิวริกมากกว่า 15.63 โมลาร์ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปจะทำลายโครงสร้างของน้ำตาลรีดิวซ์เกิดสารประกอบที่เป็นพิษเช่น เฟอร์ฟูรัล จึงทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟิวริกจะส่งผลให้สารละลายมีปริมาณเฟอร์ฟูรัลเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ เบญจวรรณ และกฤษณเวช (2557) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปจะทำลายโครงสร้างของน้ำตาลรีดิวซ์เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ฟูรัล โดยกรดจะทำหน้าที่เป็นตัวดึงโมเลกุลของไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากโมเลกุลของน้ำตาลได้สารประกอบเฟอร์ฟูรัล อย่างไรก็ตาม ปริมาณเฟอร์ฟูรัลที่เกิดขึ้นนี้จะไม่ส่งผลต่อกระบวนการหมักเป็นเอทานอลในอนาคต ดังกล่าวไว้ในงานวิจัยของ Nigam (2001) พบว่าความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรัล 0.27 กรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อผลได้และอัตราผลผลิตเอทานอล แต่เมื่อความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรัลมากถึง 1.5 กรัมต่อลิตร จะส่งผลต่อผลได้และอัตราผลผลิตเอทานอล โดยจะไปยับยั้งการหายใจและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากแทนเป็ดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าเมื่อปรับสภาพแทนเป็ดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10% จะทำให้แทนที่ผ่านการปรับสภาพมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการย่อย โดยแทนที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณลิกนินจะลดลงเทียบกับปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินของแทนก่อนปรับสภาพ นอกจากนี้แทนมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น ทำให้ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสกรดสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสเพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลได้มากขึ้น
2. ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากแทนเป็ด จะขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการย่อยหรือการไฮโดรไลซิส พบว่ากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.4 M จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด 189.00 มิลลิกรัมต่อกรัมแทนแห้ง และเกิดเฟอร์ฟูรัล 0.0186 กรัมต่อลิตร

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ไม่ควรเว้นช่วงความเข้มข้นของกรดที่ใช้ศึกษาในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสมากเกินไป
2. ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากแทนเป็ด เช่น อุณหภูมิ เวลา กรดชนิดอื่นๆ เป็นต้น
3. ควรศึกษาแทนชนิดอื่นเพิ่มเติมเช่น จอกแทน ไข่ น้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่จะผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้มากที่สุด
4. ควรศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการหมักน้ำตาลรีดิวซ์ที่เตรียมได้เป็นเอทานอล พร้อมทั้งเปรียบเทียบวิธีการ ปัจจัยที่เหมาะสมในการหมักและวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมัก

## เอกสารอ้างอิง

- จักรพงษ์ สั้งโชติ, นงรักษ์ เขียนปัญญา, พุทธชาติ ประค่านอก และวิภาดา ผลเจริญ. 2555. การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการย่อยลำต้นรูปทึบด้วยกรดเพื่อการผลิตเอทานอล. ปรินูญานินพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ชัชพันธ์ นินาสวงษ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2555. การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 40(4): 1073-1088.
- จิตติมา คำไชยใหญ่, สมบูรณ์ อนันตลาโกชัย และศุภรินทร์ ไชยกกลางเมือง. 2554. การปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางเพื่อผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ณัฐธิดา จันทอม. 2553. การวิเคราะห์ปัจจัยของการแปลงไม้ให้เป็นกลูโคสโดยการทำปฏิกิริยาดังกรดเจือจางและการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นคร ทิพย์าวงศ์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
- นวลจันทร์ ช้องสาย, ถักขณา เหล่าไพบูลย์ และพัฒนา เหล่าไพบูลย์. 2554. การไฮโดรไลซิสวัสดุลิกโนเซลลูโลสเพื่อใช้ในการหมักเอทานอล. วิทยาศาสตร์. 65(2): 75-82.
- นันทิกา คล้ายชม, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และอนุสิทธิ์ ชนะพิมพ์เมธา. 2554. การผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์จากขางข้าวฟ่างหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด. วิศวกรรมสาร มก. 75 (มกราคม – มีนาคม): 91-102.
- นุจรีย์ เตารัตน์ และอนงค์นาฏ ดวงภักดี. 2555. การสกัดน้ำตาลกลูโคสจากใบอ้อย. ปรินูญานินพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2555.
- บุษกร คงสมอรรถ. 2555. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2555.

- เบญจวรรณ ถวิลรักษ์ และ กฤษณเวช ทรงชนศักดิ์. 2557. การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากขานอ้อยโดยมีปริมาณเฟอร์รูลต่ำจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52, 427-433.  
กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฝ่ายวิจัย บมจ.ธนาคารกรุงศรีอยุธยา. 2557. เอทานอลแนวโน้มน่าสนใจ. หนังสือพิมพ์ข่าวสด ฉบับวันที่ 7 มิถุนายน 2557 หน้า 9.
- พิชญ์สินี วีระไวทยะ, กนก รัตนะกนกชัย, รัตติยา แวนนุกูล, จักรกฤษณ์ เตชะอภัยคุณ, อากิฮิโกะ โคซูกิ และภัทรา ผาสอน. 2556. การปรับสภาพฟางข้าวด้วยด่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์. วิทยาศาสตร์เกษตร. 44(2)พิเศษ พฤษภาคม - สิงหาคม 2556 หน้า 169-172.
- ภูมิหทัย คูประเสริฐยิ่ง และประมุข กระจุกสุขสถิต. 2554. การปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสเพื่อการผลิตเอทานอล. สรรสาระเทคโนโลยีชีวภาพ. 1(2) เดือนกันยายน 2554 หมวดสิ่งแวดลอมและพลังงาน หน้า 5.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์. 2554. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลสเสทผักตบชวาโดยหมอนึ่งไอน้ำแรงดันสูงเพื่อผลิตเอทานอล. *Veridian E-Journal SU*. 4(1): 891-900.
- วารภรณ์ มงคลเคหา, วริศรา เผือกผาสุก และวริษฐา ศูนย์ปาน. 2556. การเตรียมไฮโดรไลสจากเปลือกกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี. โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2556.
- วิรัชรอง แสงอรุณเลิศ. 2547. การผลิตเฟอร์รูลจากแกลบโดยไฮโดรไลซิสควบคู่กับการสกัดด้วยการบอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2547.
- สุภาวดี ผลประเสริฐ. 2557. การปรับสภาพวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล Pretreatment of Lignocellulose Materials for Ethanol Production. *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 22(5): 641-649.
- อรุณี ศุภสินสาธิต. 2555. พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง. *วารสารสิ่งแวดล้อม*. 16(2): 36-43.
- Alvira P., Tomás-Pejó E., Ballesteros M. and Negro M. 2009. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*. 101 (13): 4851–4861.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Brodeur G., Yau E., Badal K., Collier J., K.B. Ramachandran and Subramanian R. 2011. Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review. **Enzyme Research**. 2011: 1-17.
- Chen Q., Jin Y., Zhang G., Fang Y., Xiao Y. and Zhao H. 2012. Improving Production of Bioethanol from Duckweed (*Landoltia punctata*) by Pectinase Pretreatment. **Energies**. 5: 3019-3032.
- Ge L., Wang P., Mou H. 2011. Study on Saccharification Techniques of Seaweed Wastes for the Transformation of Ethanol. **Renewable Energy**. 36: 84-89.
- Y.S. Mtui G. 2009. Recent advances in pretreatment of lignocellulosic wastes and production of value added products. **African Journal of Biotechnology**. 8(8): 1398-1415.
- Lenihan P., Orozco A., O'Neill E., Ahmad M.N.M., Rooney D.W. and Walker G.M. 2010. Dilute acid hydrolysis of lignocellulosic biomass. **Chemical Engineering Journal**. 156: 395-403.
- Miller G.L. 1959. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**. 31(3): 426.
- Nigam J.N. 2001. Ethanol production from wheat straw hemicellulose hydrolysate by *Pichia stipites*. **Journal of Biotechnology**. 87: 17-27.
- Papong S., Malakul P. 2010. Life-cycle energy and environmental analysis of bioethanol production from cassava in Thailand. **Bioresource Technology**. 101: S112-S118.
- Rebecca S., Ye C., Ratna S., Michael B., and Jason O. 2007. A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks. **Bioresource Technology**. 98: 3000-3011.
- Sun Y., Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology**. 83: 1-11.
- Sun Y., Cheng J. 2005. Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production. **Bioresource Technology**. 96: 1599-1606.
- Van Soest P.J. 1959. Development of a Comprehensive system of Feed Analysis and its Application of Forages. **Journal of Analytical science**. 26:119-128.
- Wen Z., Liao W. and Chen S. 2004. Hydrolysis of animal manure lignocellulosics for reducing sugar production. **Bioresource Technology**. 91: 31-39.

Zhang L., Chen Q., Jin Y., Xue H., Guan J., Wang Z., and Zhao H. 2010. Energy-saving direct ethanol production from viscosity reduction mash of sweet potato at very high gravity (VHG). **Fuel Processing Technology**. 91: 1845-1850.

Zheng Y., Zhao J., Xu F., Li Y. 2014. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in energy and combustion science**. 42: 35-53.

[Online]. Available : [http://www.ostc.thaiembdc.org/news\\_us/news\\_photo/genome.jpg](http://www.ostc.thaiembdc.org/news_us/news_photo/genome.jpg)

[Online]. Available : <http://www.slideshare.net/toncy2010/9789740328322>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเยื่อใย (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน)

### ด้วยวิธี Detergent method

วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบเยื่อใยด้วย Detergent method อ้างอิงตาม Van Soest (1959) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### วิธีวิเคราะห์ Neutral Detergent Fiber (NDF)

#### สารเคมี

1. โซเดียมลอรินซัลเฟต, ( $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$ ), AR grade, Carlo Erba
2. ไตรเอทิลีนไกลคอล ( $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_4$ ), AR grade, Acros
3. แอนไฮดรอสไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  anhydrous), AR grade, Rankem
4. โซเดียมบอเรตเดคาไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), AR grade, Carlo Erba
5. ไดโซเดียมเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิเตต (EDTA), AR grade, Carlo Erba
6. อะซีโตน ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ ), AR grade, Carlo Erba
7. แอนไฮดรอสโซเดียมซัลไฟต์ ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$  anhydrous), AR grade

#### การเตรียมสาร NDF

1. ชั่งโซเดียมลอรินซัลเฟต 60 กรัม ใส่ในบีเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร
2. ใส่ลงขวดปรับปริมาตรขนาด 2 ลิตร ล้างบีเกอร์ด้วยน้ำร้อน แล้วเทใส่ขวดปรับปริมาตรเดิม
3. เติมไตรเอทิลีนไกลคอล 20 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตรเดิม พลิกขวดไปมาให้สารเข้ากัน
4. ละลายแอนไฮดรอสไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 9.12 กรัม, โซเดียมบอเรตเดคาไฮเดรต 13.62 กรัม, ไดโซเดียมเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิเตต 37.22 กรัม ในน้ำกลั่นร้อน
5. ใส่สารละลายที่ได้จากข้อ 4 ลงขวดปรับปริมาตรเดิม พลิกขวดให้สารผสมเข้ากัน
6. ปรับปริมาตรให้ถึงขีดด้วยน้ำกลั่น
7. ปรับค่าความเป็นกรดค้างให้อยู่ในช่วง 6.9-7.1

#### การวิเคราะห์หาปริมาณ NDF

1. นำ Sinter glass ขนาด 30 มิลลิลิตร (por.1) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำไปทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้น จากนั้นนำ Sinter glass ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

2. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้ง และลดขนาดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh จำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.5 กรัม เติมน้ำ NDF 50 มิลลิลิตร และ แอนไฮดรัสโซเดียมซัลไฟต์ 0.5 กรัม ลงในขวดก้นกลม ขนาด 250 มิลลิลิตร

3. ต้มให้เดือด 5-10 นาที แล้วทำการ Reflux 1 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายผ่าน Sinter glass ที่แห้งและทราบน้ำหนักที่แน่นอน ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
5. ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นร้อนอีกครั้ง โดยใช้ปริมาตรให้น้อยที่สุด
6. หยอดเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วทำการล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตน 2 ครั้ง ครั้งละ 15 มิลลิลิตร
7. เปิดเครื่องกรองสุญญากาศอีกครั้ง ดูจนหมดกลิ่นอะซิโตน
8. นำ Sinter glass ที่มีกากไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นานตลอดคืน ทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็น แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก
9. คำนวณหา %NDF

### วิธีวิเคราะห์ Acid Detergent Fiber (ADF)

#### สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก 96% ( $H_2SO_4$ ), AR grade, Carlo Erba
2. เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB), AR grade, Acros
3. อะซิโตน ( $C_3H_6O$ ), AR grade, Carlo Erba

#### การเตรียมสาร ADF

1. บีบกรดซัลฟิวริก 96% มา 27.8 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตรที่ได้เติมน้ำกลั่นไว้แล้ว 900 มิลลิลิตร
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดจะได้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 นอร์มอล
3. ผสมเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 20 กรัม ให้เข้ากับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มอล โดยใช้เครื่องปั่นกวน กวนให้สารผสมเข้ากัน
4. เทสารที่ได้ใส่เก็บไว้ในขวดสีชา

#### การวิเคราะห์หาปริมาณ ADF

1. นำ Sinter glass ขนาด 30 มิลลิลิตร (por.1) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำไปทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำ Sinter glass ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบ และบดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh และเติมน้ำ ADF ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ต้มให้เดือด 5-10 นาที แล้วทำการ Reflux 1 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายผ่าน Sinter glass ที่แห้งและทราบน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
5. ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นร้อนอีกครั้ง โดยใช้ปริมาตรให้น้อยที่สุด
6. หยดเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วทำการล้างตัวอย่างด้วย อะซิโตน 2 ครั้ง ครั้งละ 15 มิลลิลิตร
7. เปิดเครื่องกรองสุญญากาศอีกครั้ง ดูจนหมดกลิ่นอะซิโตน
8. นำ Sinter glass ที่มีกากไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นานตลอดคืน ทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็น แล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก
9. คำนวณ % ADF

### วิธีวิเคราะห์หาปริมาณ Acid Detergent Lignin (ADL)

#### สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก 96% ( $H_2SO_4$ ), AR grade, Carlo Erba

#### การเตรียมสาร ADL

1. เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. เติมกรดซัลฟิวริก 96% ลงในขวดปรับปริมาตรเดิมจำนวน 666.02 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดด้วยน้ำกลั่น
3. ค่อยๆพลิกขวดให้สารผสมกัน สารที่ได้จะร้อนมาก วางไว้รอสารเย็น
4. เมื่อสารเย็นลง ปริมาตรสารในขวดจะลดลงให้ทำการปรับปริมาตรให้ถึงขีดอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น แล้วผสมให้เข้ากัน จะได้กรดซัลฟิวริก 72%
5. เทสารที่ได้ใส่ขวดสีชา เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

#### การวิเคราะห์หาปริมาณ ADL

1. นำ Sinter glass ที่ทำการวิเคราะห์ ADF มาทำวิเคราะห์
2. เติมกรดซัลฟิวริก 72% ที่แช่เย็นลงไปครึ่ง Sinter glass คนด้วยแท่งแก้วเป็นครั้งคราว
3. เติมกรดซัลฟิวริก 72% ลงไปอีกครึ่งหนึ่งของการเติมครั้งแรก คนเป็นครั้งคราว 1 ชั่วโมง
4. ทิ้งไว้ในตู้ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง
5. นำไปกรองโดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ ล้างกากโดยใช้น้ำร้อนล้างจนหมดกรดทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัส
6. นำ Sinter glass ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตลอดคืน ทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็น แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำ Sinter glass ที่ซังน้ำหนักแล้วไปเผาที่เตาเผา อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำออกไปวางไว้ใน โถดูดความชื้น เมื่อเย็นแล้วจึงนำออกมาซังน้ำหนัก

8. กำหนดหา %ADL และ %Ash

วิธีการคำนวณปริมาณองค์ประกอบเยื่อใย

$$\% \text{NDF} = [(W_0 - W_1) / W] \times 100$$

$W_0$  = น้ำหนักSinter glass ก่อนอบ

$W_1$  = น้ำหนักSinter glass หลังอบ

$W$  = น้ำหนักตัวอย่าง

$$\% \text{ADF} = [(W_0 - W_1) / W] \times 100$$

$W_0$  = น้ำหนักSinter glass ก่อนอบ

$W_1$  = น้ำหนักSinter glass หลังอบ

$W$  = น้ำหนักตัวอย่าง

$$\% \text{ADL} = [(W_1 - W_2) / W] \times 100$$

$W_1$  = น้ำหนักSinter glass หลังอบ

$W_2$  = น้ำหนักSinter glass หลังเผา

$W$  = น้ำหนักตัวอย่าง (จากตอนADF)

$$\% \text{Ash} = [(W_4 - W_5) / W_3] \times 100$$

$W_5$  = น้ำหนักcrucible + น้ำหนักเยื่อใยหลังการเผา

$W_2$  = น้ำหนักcrucible เปล่า ก่อนนำมาใช้วิเคราะห์หา ADF

$W_3$  = น้ำหนักตัวอย่าง

$$\% \text{Hemicellulose} = \% \text{NDF} - \% \text{ADF}$$

$$\% \text{Cellulose} = \% \text{ADF} - \% \text{ADL} - \% \text{Ash}$$

$$\% \text{Lignin} = \% \text{ADL}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2 การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อ้างอิงตาม Miller (1959) ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการดังนี้

### สารเคมี

1. น้ำตาลกลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ), AR grade, Carlo Erba
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), AR grade, Carlo Erba
3. โพแทสเซียม โซเดียม ทราเทรต ( $KNaC_4H_4O_6$ ), AR grade, Carlo Erba
4. กรดไดไนโตรซาลิซิลิก (3,5-dinitrosalicylic), AR grade, Carlo Erba

### การเตรียมสาร

1. การเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
  - ชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. การเตรียมสาร 3,5 dinitrosalicylic acid 1%
  - ชั่ง DNS 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน นำไปอุ่นในอ่างน้ำร้อนจนได้สารละลายใส เติมโซเดียมโพแทสเซียมทราเทรตลงไปทีละน้อยจนครบ 30 กรัม ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร เก็บรักษาไว้ในขวดสีชา

### การเตรียมกราฟมาตรฐาน

1. นำสารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในหลอดทดลอง
2. เติม 3,5 dinitrosalicylic acid 1% ลงไป 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที
4. แช่หลอดทดลองในน้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที
5. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
6. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

### การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง
2. เติม 3,5 dinitrosalicylic acid 1% ลงไป 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที
4. แช่หลอดทดลองในน้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
6. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

### วิธีการเปลี่ยนหน่วยของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จาก mg/ml เป็น mg/g น้ำหนักแห้ง

จากการทดลองขั้นตอนการไฮโดรไลซิสแทนด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.4 M ครั้งที่ 1 โดยนำแทน 1.0075 กรัม ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.4 M ปริมาตร 30 มิลลิลิตร เมื่อย่อยเสร็จแล้วนำมากรองได้ปริมาณสารละลายกรดที่เหลือเท่ากับ 23 มิลลิลิตร นำสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยเจือจางสารละลาย 10 เท่าพบว่าได้ปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 0.80 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถคำนวณแปลงหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัมแทนแห้ง ได้ดังนี้

สารละลาย	1 ml	มีปริมาณน้ำตาล	$0.80 \times 10$	mg
ถ้าสารละลาย	23 ml	มีปริมาณน้ำตาล	$(0.80 \times 10 \times 23)/1$	mg

เทียบปริมาณน้ำตาลเป็น mg/g จะได้ว่า

แทนหนัก	1.0075 g	มีปริมาณน้ำตาล	$(0.80 \times 10 \times 23)/1$	mg
แทนหนัก	1 g	จะมีปริมาณน้ำตาล	$(0.80 \times 10 \times 23)/1.0075$	mg
			$\approx 182.63$	mg

แสดงว่า ถ้าแทนหนัก 1 กรัมแห้ง จะมีปริมาณน้ำตาล 182.63 มิลลิกรัม

### ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์ฟูรัลด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

การวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์ฟูรัลด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ อ้างอิงตามงานวิจัยของ วิรัชรอง (2547) โดยมีรายละเอียดวิธีการดังนี้

#### สารเคมี

1. แอนิซีน 99%
2. สแตนนัสคลอไรด์ ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), AR grade, Carlo Erba
3. เอทานอล 95%
4. กรดไฮโดรคลอริก 12 นอร์มอล
5. กรดอะซิติกเข้มข้น

#### การเตรียมสาร

1. แอนิซีน

-กลั่นแอนนิซีนแบบธรรมดา 1 หรือ 2 ครั้ง แล้วเก็บรักษาไว้ในขวดสีชาแช่ไว้ในตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารละลายสแตนนัสคลอไรด์เข้มข้น 20%

-ซึ่งสแตนนัสคลอไรด์ 2 กรัม ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 นอร์มอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ละลายในอ่างน้ำร้อน

3. รีเอเจนต์สแตนนัสคลอไรด์-แอนิซีน-กรดอะซิติก

-ทำการเจือจางแอนิซีน 5 มิลลิลิตร ด้วยกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายสแตนนัสคลอไรด์ความเข้มข้น 20% ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร เทใส่ขวดวัด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น

### การวิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ฟูรัล

1. นำตัวอย่างของเหลวที่กรองได้มา 2 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับเอทานอล 95% ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และรีเอเจนต์สแตนนัสคลอไรด์-แอนิซีน-กรดอะซิติก 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจะเกิดสีชมพูขึ้นดังแสดงในรูปที่ ก.1

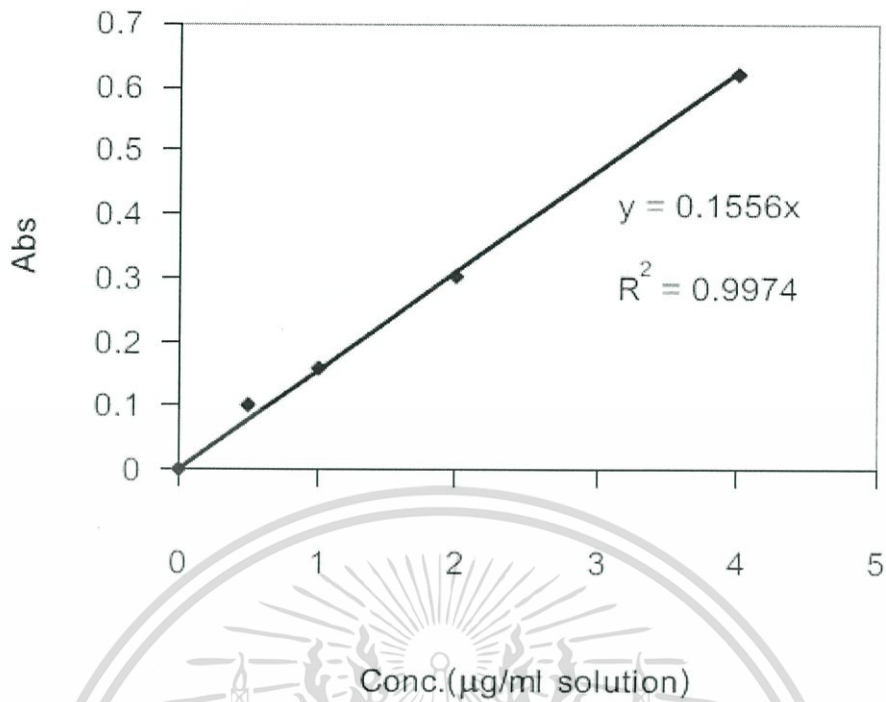
2. วางทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้สีที่เกิดมีความเสถียรขึ้น

3. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้น้ำกลั่นเป็นเซลล์อ้างอิง

4. นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปคำนวณหาปริมาณเฟอร์ฟูรัลที่สกัดได้ โดยใช้กราฟมาตรฐานรูป ก.2 ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ วิรัชรอง (2547)



รูปที่ ก.1 แสดงการเกิดสีของเฟอร์ฟูรัลเมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอล 95% และรีเอเจนต์สแตนนัสคลอไรด์-แอนิซีน-กรดอะซิติก

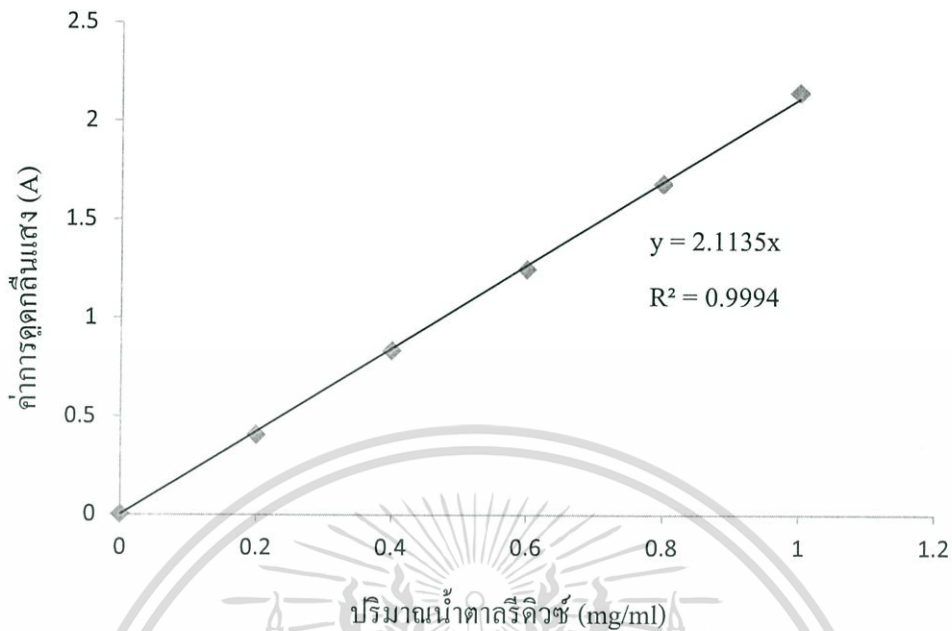


รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของเฟอร์ฟูรัลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์ฟูรัลจากกระบวนการไฮโดรไลซิส (วิรัมย์, 2547)

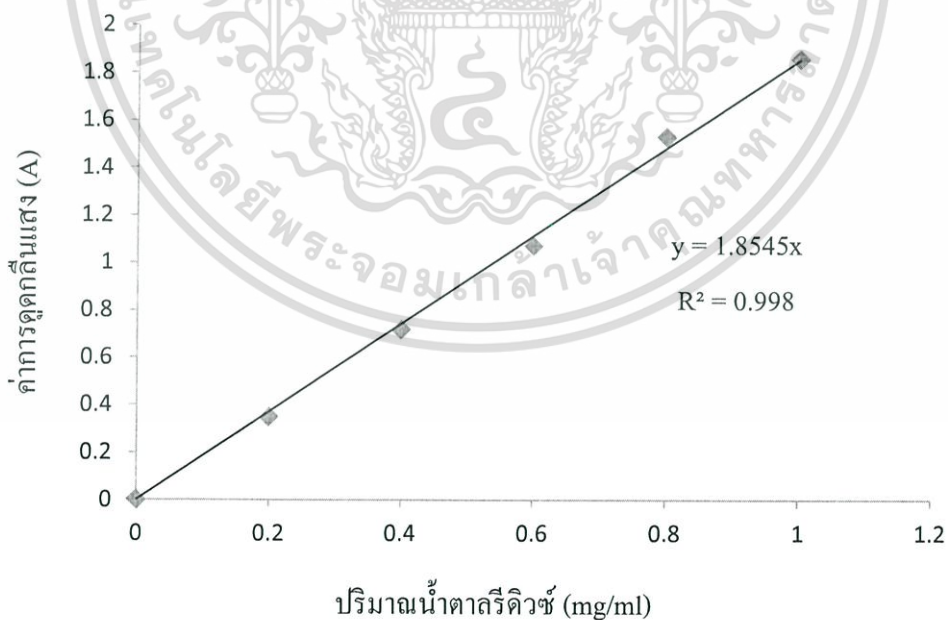
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกระบวนการปรับสภาพ



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกระบวนการไฮโดรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อใยของแห่น

สารปรับสภาพ	ครั้งที่	NDF				ADF				ADL				%ash
		น้ำหนักตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ	%NDF	น้ำหนักตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ	%ADF	น้ำหนักตัวอย่าง	น้ำหนักหลังอบ	น้ำหนักหลังเผา	%ADL	
ไม่ปรับสภาพ	1	0.5019	30.1455	30.4413	58.9360	0.5012	31.3678	31.5159	29.5491	0.5012	31.4386	31.3728	13.1285	0.9976
	2	0.5007	29.9155	30.3103	78.8496	0.5009	29.9641	30.1096	29.0477	0.5009	30.0446	29.9694	15.0130	1.0581
	3	0.5019	30.1070	30.4684	72.0064	0.5014	29.8215	29.9790	31.4120	0.5014	29.9057	29.8279	15.5166	1.2764
น้ำกลั่น	1	0.5032	31.3824	31.8132	85.6121	0.5027	30.1108	30.3043	38.4921	0.5027	30.1859	30.1169	13.7259	1.2134
	2	0.5020	31.1565	31.5957	87.4900	0.5030	31.3819	31.5906	41.4911	0.5030	31.4620	31.3891	14.4930	1.4314
	3	0.5044	29.9207	30.3522	85.5472	0.5062	29.9661	30.1745	41.1695	0.5062	30.0460	29.9729	14.4409	1.3433
HCl 5%	1	0.5015	31.3736	31.8866	102.2931	0.5017	30.0590	30.4291	73.7692	0.5017	30.2874	30.0662	44.0901	1.4351
	2	0.5006	30.1086	30.5821	94.5865	0.5013	30.1616	30.5376	75.0050	0.5013	30.3816	30.1679	42.6292	1.2567
	3	0.5034	29.9660	30.4337	92.9082	0.5039	29.9253	30.3120	76.7414	0.5039	30.1544	29.9329	43.9571	1.5082
HCl 10%	1	0.5053	29.9608	30.4904	104.8090	0.5046	29.9605	30.4371	94.4511	0.5046	30.2437	29.9770	52.8537	3.2699
	2	0.5069	29.9227	30.4882	111.5605	0.5052	29.9225	30.4016	94.8337	0.5052	30.2257	29.9351	57.5218	2.4941
	3	0.5064	31.1583	31.7208	111.0782	0.5086	31.1531	31.6247	92.7251	0.5086	31.4385	31.1695	52.8903	3.2245

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อใยของແ່ນ (ต่อ)

สารปรับสภาพ	ครั้งที่	NDF				ADF				ADL				%ash
		น้ำหนักตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ	%NDF	น้ำหนักตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ	%ADF	น้ำหนักตัวอย่าง	น้ำหนักหลังอบ	น้ำหนักหลังเผา	%ADL	
HCl 15%	1	0.5018	30.1263	30.6299	100.3587	0.5021	29.9655	30.4405	94.6027	0.5021	30.3207	29.9789	68.0741	2.6688
	2	0.5007	30.1458	30.6435	99.4008	0.5033	31.3714	31.8580	96.6819	0.5033	31.7384	31.3841	70.3954	2.5233
	3	0.5013	29.7395	30.2330	98.4440	0.5054	30.1088	30.5960	96.3989	0.5054	30.4774	30.1216	70.3997	2.5326
NaOH 5%	1	0.5113	29.9608	30.4634	98.2985	0.5029	29.9655	30.1931	45.2575	0.5029	30.1260	29.9779	29.4492	2.4657
	2	0.5041	29.9225	30.4443	103.5112	0.5009	31.3731	31.5905	43.4019	0.5009	31.5158	31.3895	25.2146	3.2741
	3	0.5105	31.1537	31.7064	108.2664	0.5037	30.1094	30.3398	45.7415	0.5037	30.2934	30.1253	33.3730	3.1566
NaOH 10%	1	0.5065	31.3762	31.8848	100.4146	0.5059	30.0873	30.2965	41.3520	0.5059	30.1335	30.0937	7.8672	1.2651
	2	0.5019	30.1086	30.5947	96.8520	0.5021	29.9195	30.1247	40.8684	0.5021	29.9805	29.9304	9.9781	2.1709
	3	0.5039	29.9653	30.4190	90.0377	0.5035	31.1468	31.3582	41.9861	0.5035	31.1727	31.1512	4.2701	0.8739
NaOH 15%	1	0.5064	30.1269	30.5277	79.1469	0.5011	29.8240	30.0160	38.3157	0.5011	29.8972	29.8305	13.3107	1.2971
	2	0.5055	30.1455	30.5255	75.1731	0.5033	29.9178	30.1121	38.6052	0.5033	30.0286	29.9253	20.5245	1.4902
	3	0.5040	29.7404	30.1123	73.7897	0.5058	30.1462	30.3402	38.3551	0.5058	30.2172	30.1532	12.6532	1.3839

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกระบวนการปรับสภาพ

ชนิดของสาร ปรับสภาพ	น้ำหนักแห้ง (g)			ปริมาตรสารละลาย ที่เหลือ (ml)			ค่าการดูดกลืนแสง (A <sub>520</sub> )			ความเข้มข้น (mg/ml)			ความเข้มข้น (mg/g แหนแห้ง)			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
น้ำกลั่น	3.0048	3.0051	3.0003	62	61	60	0.973	1.003	1.125	0.46	0.47	0.53	9.4915	9.5404	10.5989	
HCl	5%	3.0013	3.0014	3.0014	67	65	69	0.064	0.068	0.037	0.03	0.03	0.02	0.6697	0.6497	0.4598
	10%	3.0018	3.0022	3.0014	72	71	71	0.095	0.077	0.038	0.04	0.04	0.02	0.9594	0.9460	0.4731
	15%	3.0016	3.0022	3.0031	73	76	75	0.205	0.162	0.178	0.10	0.08	0.08	2.4320	2.0252	1.9979
NaOH	5%	3.0025	3.0048	3.0012	60	63	58	1.937	2.077	2.120	0.92	0.98	1.00	18.3847	20.5471	19.3256
	10%	3.0042	3.0036	3.0008	57	67	54	1.857	2.119	1.717	0.88	1.00	0.81	16.6966	22.3066	14.5761
	15%	3.0013	3.0026	3.0018	64	60	61	1.410	1.511	1.996	0.67	0.72	0.94	14.2871	14.3875	19.1019

ฟังก์ชันสมการเส้นตรง  $y = 2.1135x, r^2 = 0.9994$

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกระบวนการไฮโดรไลซิส

ชนิดสาร	น้ำหนักแห้ง (g)			ปริมาตรสารที่เหลือ (ml)			ค่าการดูดกลืนแสง ( $A_{520}$ )			ความเข้มข้น (mg/ml)					ความเข้มข้น (mg/g แหนแห้ง)			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	df	1	df	2	df	3	1	2	3
HCl (M)																		
0.02	1.0067	1.0081	1.0095	22	25	24	0.015	0.028	0.034	-	0.01	-	0.02	-	0.02	0.22	0.50	0.48
0.08	1.0019	1.0041	1.0033	21	23	23	0.771	1.191	0.599	-	0.42	-	0.64	-	0.32	8.80	14.66	7.34
0.2	1.0064	1.0048	1.0080	22	24	26	1.247	1.115	1.696	5	0.67	5	0.60	5	0.91	73.23	71.66	117.36
0.4	1.0075	1.0085	1.0077	23	28	25	1.492	1.398	1.31	10	0.80	10	0.75	10	0.71	182.63	208.23	176.14
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)																		
0.02	1.0091	1.0014	1.0055	23	26	24	0.093	0.198	0.468	-	0.05	-	0.11	-	0.25	1.14	2.86	5.97
0.08	1.0014	1.0096	1.0014	24	25	24	0.824	1.193	1.457	5	0.44	5	0.64	5	0.79	52.73	79.24	94.67
0.2	1.0027	1.0036	1.0056	20	28	24	1.242	1.136	0.965	10	0.67	10	0.61	10	0.52	133.64	170.19	124.11
0.4	1.0056	1.0041	1.0013	22	27	22	-0.066	-0.071	-0.021	-	-0.04	-	-0.04	-	-0.01	-0.88	-1.08	-0.22

ฟังก์ชันสมการเส้นตรง  $y = 1.8545x$ ,  $r^2 = 0.998$

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟอร์รูลจากกระบวนการไฮโดรไลซิส

ชนิดกรด	น้ำหนักแห้ง (g)			ปริมาตรสารที่เหลือ (ml)			ค่าการดูดกลืนแสง ( $A_{515}$ )						ความเข้มข้น (ug/ml)			ความเข้มข้น (g/l)		
	1	2	3	1	2	3	df	1	df	2	df	3	1	2	3	1	2	3
HCl (M)																		
0.02	1.0067	1.0081	1.0095	22	25	24	-	0.040	-	0.050	-	0.038	0.26	0.32	0.24	0.0003	0.0003	0.0002
0.08	1.0019	1.0041	1.0033	21	23	23	-	0.304	-	0.220	-	0.119	1.95	1.41	0.76	0.0020	0.0014	0.0008
0.2	1.0064	1.0048	1.0080	22	24	26	5	0.185	5	0.391	5	0.205	5.94	12.56	6.59	0.0059	0.0126	0.0066
0.4	1.0075	1.0085	1.0077	23	28	25	10	0.248	10	0.293	10	0.325	15.94	18.83	20.89	0.0159	0.0188	0.0209
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)																		
0.02	1.0091	1.0014	1.0055	23	26	24	-	0.162	-	0.048	-	0.085	1.04	0.31	0.55	0.0010	0.0003	0.0005
0.08	1.0014	1.0096	1.0014	24	25	24	5	0.109	5	0.303	5	0.224	3.50	9.74	7.20	0.0035	0.0097	0.0072
0.2	1.0027	1.0036	1.0056	20	28	24	5	0.292	5	0.479	5	0.411	9.38	15.39	13.21	0.0094	0.0154	0.0132
0.4	1.0056	1.0041	1.0013	22	27	22	10	0.276	10	0.273	10	0.320	17.74	17.54	20.57	0.0177	0.0175	0.0206

ฟังก์ชันสมการเส้นตรง  $y=0.1556x, r^2=0.9974$  ( วิริงรอง, 2547)