



**การศึกษาการผลิตไซโลสจากทะลายปาล์มเปล่า**  
**Study of Xylose Production from Oil Palm Empty Fruit Bunch**

**ปิยะนุช เปี้ยคง**  
**Piyanut Piakong**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา**  
**วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี**  
**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**  
**Master of Engineering in Chemical Engineering**  
**Prince of Songkla University**

**2557**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

ชื่อวิทยานิพนธ์      การศึกษาการผลิตไซโลสจากทะลายปาล์มเปล่า  
 ชื่อผู้เขียน          นางสาวปิยะนุช เปียคง  
 ภาควิชา                วิศวกรรมเคมี

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชญานุช แสงวิเชียร)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จอมภพ แวศักดิ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจมาศ เขียรศิลป์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. งาม แยมแสงสังข์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชญานุช แสงวิเชียร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้  
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเองและขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ .....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชญานุช แสงวิเชียร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ .....

(นางสาว ปิยะนุช เปี้ยคง)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน  
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....

(นางสาว ปิยะนุช เป็ยคง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการผลิตไซโลสจากทะเลลายปาล์มเปล่า
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปิยะนุช เปียคง
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

ทะเลลายปาล์มเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน) ที่ถูกนำมาใช้เป็นทางเลือกในการผลิตน้ำตาลไซโลส ซึ่ง สามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไซลิตอล มีความน่าสนใจเพิ่มมากขึ้นเกี่ยวกับการใช้ลิกโนเซลลูโลสเพื่อใช้ในกระบวนการทางชีวภาพเกี่ยวกับเชื้อเพลิงและสารเคมี ซึ่ง วัสดุเหล่านี้จะมีต้นทุนที่ต่ำและเป็นแหล่งของน้ำตาล ใน การศึกษานี้จะแยกองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในทะเลลายปาล์ม โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับสภาพ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยด้วย กรดและให้ความร้อนด้วยเครื่อง Autoclave เพื่อผลิตไซโลสรวมถึงน้ำตาลกลูโคสและกรดอะซิติก ด้วย องค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินเท่ากับ 20.71, 49.95 และ 9.33% (w/w) ตามลำดับ ในการศึกษาการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรด ซัลฟิวริก และน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการปรับสภาพเพื่อให้ได้น้ำตาลไซโลสที่มากที่สุด พบว่าทะเลลายปาล์มที่ได้จากการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5% (w/v) ด้วย เครื่อง Autoclave ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที มีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสมากที่สุด 33.85% และมีเซลลูโลสเท่ากับ 52.43% และลิกนินเท่ากับ 4.82% โดยภายใต้สภาวะที่ทะเลลายปาล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10% (w/v) ย่อยด้วยกรดกรดซัลฟิวริกเจือจาง 10% (v/v) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ได้ น้ำตาลไซโลสปริมาณสูงสุดคือ 40.08 g/L และ สำหรับสภาวะที่ให้น้ำตาลกลูโคสสูงสุดคือ ทะเลลายปาล์มผ่าน การปรับสภาพด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10% (w/v) ย่อยด้วยกรดกรดซัลฟิวริกเจือจาง 6% (v/v) ให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ได้น้ำตาลกลูโคสปริมาณสูงสุดคือ 16.25 g/L

<b>Thesis Title</b>	Study of xylose production from oil palm empty fruit bunch
<b>Author</b>	Miss Piyanut Piakong
<b>Major Program</b>	Chemical Engineering
<b>Academic Year</b>	2014

### **ABSTRACT**

Oil palm empty fruit bunch (OPEFB) is a lignocellulosic (cellulose, hemicelluloses and lignin) material and is industrial waste from palm oil industry. It is a potential source of xylose which can be used as a raw material for production of xylitol. The increasing interest on the use of lignocellulosic waste for bioconversion to fuels and chemicals are justifiable as these materials are renewable, low cost and widespread sources of sugars. In this study, the fractionation of chemical components; cellulose, hemicellulose, and lignin of OPEFB by separation hydrolysis were investigated to find the optimal conditions for pretreatment. The optimal condition for the hydrolysis preparation was also investigated by using autoclave for xylose production and determination of chemical compounds, content of sugar and the structure of pretreated hydrolysis were investigated. The chemical contents of OPEFB raw materials were consisting of hemicellulose, cellulose and lignin at 20.71, 49.95 and 9.33 % respectively. The effect of sodium hydroxide, sulfuric acid and water pretreatment followed by the optimization of the pretreatment process were investigated in order to obtain high amount of xylose. The results showed that the chemical content of hemicelluloses (33.85%wt), cellulose (52.43%wt) and lignin (4.82%wt) were obtained when the samples were pretreated with sodium hydroxide. The maximum value of xylose of 40.08 g/L was obtained by using alkali pretreatment (5% w/v NaOH) and using sulfuric acid 6% (v/v), 121°C as and 20 min as the hydrolysis condition. The maximum value of glucose of 16.25 g/L was obtained by using 10% (w/v) NaOH followed by hydrolysis using 6% sulfuric acid, 121°C reaction temperature and 20 min reaction time.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(14)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ปาล์มน้ำมัน	5
2.2 วัสดุเศษเหลือจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน	12
2.3 องค์ประกอบของเซลล์พืช	15
2.4 โครงสร้างของน้ำตาลที่พบในทะลายปาล์ม	22
2.5 การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)	26
2.6 กระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion)	31
2.7 การปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment)	32
2.8 หม้ออัดความดันไอน้ำแรงสูง (Autoclave)	36
2.9 High Performance Liquid Chromatography (HPLC)	37
2.10 ก๊าซโครมาโตกราฟี (GC)	37
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุ	43
3.2 อุปกรณ์	43

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง	44
กิจกรรมที่ 1 ขั้นตอนในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส	44
กิจกรรมที่ 2 ขั้นตอนในการปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment)	48
กิจกรรมที่ 3 การวิเคราะห์หาเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน	52
กิจกรรมที่ 4 ขั้นตอนในการย่อย (Hydrolysis)	54
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล	
4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของทะเลสาบปาล์ม	56
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส	58
4.3 ผลของน้ำหมักหลังจากการปรับสภาพ	64
4.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบของทะเลสาบปาล์ม	65
4.5 ผลของน้ำตาลไซโลส น้ำตาลกลูโคส และกรดอะซิติก	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลวิจัย	78
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์และการเตรียมสาร	87
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐาน	97
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบ	99
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	111
ประวัติผู้เขียน	118



### รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของทะลายปาล์ม Components in oil palm empty fruit bunch	14
2	ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในทะลายปาล์มเปล่า Cellulose hemicellulose and lignin contents in oil palm empty fruit bunch	22
3	ชนิดของกรดที่จะทำการทดลอง Types of acid for experiments	45
4	ช่วงของอุณหภูมิที่จะใช้ในการทดลอง Range of temperature for experiments	45
5	ช่วงของเวลาที่จะใช้ในการทดลอง Range of time for experiments	46
6	ช่วงของความเข้มข้นกรดที่จะใช้ในการทดลอง Range of acid concentration for experiments	46
7	ปริมาณทะลายปาล์มที่จะใช้ในการทดลอง Amount of OPEFB for experiments	47
8	เครื่องมือที่จะใช้ในการทดลอง Equipment for experiments	47
9	การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยน้ำ กรด และด่าง ที่ความเข้มข้นต่างๆ Different Physiochemical Methods pretreatment with water, sulfuric acid and sodium hydroxide solution at various conditions	54
10	องค์ประกอบของทะลายปาล์มที่ไม่มีการปรับสภาพ Component in untreated OPEFB	56

### รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
11	ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในทะลายปาล์มเปล่าและพืชอื่นๆ Cellulose hemicellulose and lignin contents in oil palm empty fruit bunch and others crop	58
12	ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสโดยใช้กรดที่แตกต่างกันในการไฮโดรไลซิส The results of xylose with various acid for hydrolysis	
13	ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various reaction time	59
14	ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various reaction time	60
15	ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของความเข้มข้นกรดที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various concentration acid	61
16	ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various amount of OPEFB	62

### รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
17	ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนต่างกันที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various equipment for hydrolysis	63
18	ผลการทดลองแสดงน้ำหลังที่หายไปหลังการปรับสภาพ The results of weight lose after pretreatment OPEFB	64
19	องค์ประกอบในทะลายปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ปรับสภาพด้วยน้ำกรดและต่าง Component in OPEFB after pretreated by chemical methods and untreated	66
20	องค์ประกอบในทะลายปาล์มเปล่า Table 19 Component in OPEFB	67
21	น้ำตาลไซโลสที่ได้จากไฮโดรไลซิสที่กรดความเข้มข้นต่างๆ The results of xylose with diluted sulfuric acid solution at various conditions	72
22	น้ำตาลกลูโคสที่ได้จากไฮโดรไลซิสที่กรดความเข้มข้นต่างๆ The results of glucose with diluted sulfuric acid solution at various condition	73
23	กรดอะซิติกที่ได้จากไฮโดรไลซิสที่กรดความเข้มข้นต่างๆ The results of acetic acid with diluted sulfuric acid solution at various conditions	76
ก-2	ผลการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย $H_2SO_4$	90
ค-1	ข้อมูลผลของน้ำหนักหลังการปรับสภาพวัตถุดิบ	99
ค-2	ข้อมูลองค์ประกอบ (Cellulose) ของวัตถุดิบ	100
ค-3	ข้อมูลองค์ประกอบ (Hemicellulose) ของวัตถุดิบ	101
ค-4	ข้อมูลองค์ประกอบ (Lignin) ของวัตถุดิบ	102

## รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ค-5	ข้อมูลผลของการข่อยน้ำตาลไซโลสด้วย 2% กรดซัลฟิวริก	103
ค-6	ข้อมูลผลของการข่อยน้ำตาลไซโลสด้วย 6% กรดซัลฟิวริก	104
ค-7	ข้อมูลผลของการข่อยน้ำตาลไซโลสด้วย 10% กรดซัลฟิวริก	105
ค-8	ข้อมูลผลของการข่อยน้ำตาลกลูโคสด้วย 2% กรดซัลฟิวริก	106
ค-9	ข้อมูลผลของการข่อยน้ำตาลกลูโคสด้วย 6% กรดซัลฟิวริก	107
ค-10	ข้อมูลผลของการข่อยน้ำตาลกลูโคสด้วย 10% กรดซัลฟิวริก	108
ค-11	ข้อมูลผลของการข่อยกรดอะซิติคด้วย 2% กรดซัลฟิวริก	109
ค-12	ข้อมูลผลของการข่อยกรดอะซิติคด้วย 6% กรดซัลฟิวริก	119

## รายการภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
1	<p>น้ำมันปาล์มในประเทศ</p> <p>Palm oil in Thailand</p>	7
2	<p>ทะลายปาล์มเปล่า</p> <p>Oil palm empty fruit bunch</p>	14
3	<p>เส้นใยจากทะลายปาล์มเปล่า</p> <p>Fiber of oil palm empty fruit bunch</p>	15
4	<p>องค์ประกอบของผนังเซลล์พืช</p> <p>Cell wall compositions</p>	16
5	<p>โครงสร้างของเซลลูโลส</p> <p>The structure of cellulose</p>	18
6	<p>โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส</p> <p>The structure of cellulose molecules</p>	18
7	<p>โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส</p> <p>The structure of hemicellulose</p>	20
8	<p>โครงสร้างของลิกนิน</p> <p>The structure of lignin</p>	21
9	<p>โครงสร้างของกลูโคส</p> <p>The structure of glucose</p>	23
10	<p>โครงสร้างของไซโตส</p> <p>The structure of xylose</p>	24
11	<p>โครงสร้างของไซลิตอล</p> <p>The structure of xylitol</p>	25

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	กลไกการย่อยโครงสร้างของแป้งด้วยกรด Mechanism of acid hydrolysis of starch	29
13	กลไกการย่อยโครงสร้างของแป้งด้วยกรด Mechanism of acid catalyzed hydrolysis of $\beta$ 1-4 glucan	30
14	การย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสด้วยด่าง Alkali hydrolysis of cellulose	31
15	ผลของการปรับสภาพ The result of pretreatment	32
16	วิธีการปรับสภาพ The methods of pretreatment conditions	36
17	ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบ 1-step 1-Step pretreatment method	48
18	ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบวิธีการแช่ Soaking pretreatment method	49
19	ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบการใช้ความร้อน Thermal pretreatment method	50
20	ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบ 2-step 2-Step pretreatment method	51
21	วิธีวิเคราะห์ปริมาณเฮมิเซลลูโลส Hemicellulose method	52
22	วิธีวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน Cellulose and lignin method	53

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	องค์ประกอบของทะเลสาบป่าล้ม Components in OPEFB	70
24	กลไกปฏิกิริยาในการเกิด ethyl-dioxy Mechanism of ethyl-dioxy	75
25	สรุปผล Discussion	81
ก-4	สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์เครื่อง GC สำหรับวิเคราะห์กรดอะซิติก	96
ข-1	กราฟมาตรฐานของน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสจากเครื่อง HPLC	97
ข-2	กราฟมาตรฐานของกรดอะซิติกจากเครื่อง GC	98

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีศักยภาพในการผลิตปาล์มน้ำมัน ซึ่งปาล์มน้ำมันเป็นไม้ยืนต้นที่อยู่ในตระกูล Palmae และมีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* สำหรับประเทศไทยปาล์มน้ำมันได้กลายเป็นพืชที่มีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ปาล์มน้ำมันจะเป็นพืชอุตสาหกรรมที่จำเป็นและได้มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยที่ปาล์มน้ำมันนั้นจะมีระยะเวลาในการเจริญเติบโตประมาณ 3 ปี จึงจะสามารถให้ผลปาล์มน้ำมันที่สามารถนำไปสกัดเอาน้ำมันปาล์มออกจากผลและทะเลาะปาล์มได้และในปัจจุบันประเทศไทยได้หันมาใช้พลังงานทดแทนจากพืชเพื่อช่วยลดการใช้ น้ำมันปิโตรเลียม โดยพลังงานทดแทนที่นิยมใช้คือไบโอดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลนั้นส่วนใหญ่จะใช้ปาล์มน้ำมันมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต ทำให้ไบโอดีเซลนั้นเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญในอันดับต้นๆ โดยพลังงานจะมีศักยภาพสูงที่ไม่แตกต่างจากน้ำมันปิโตรเลียมมากนักและที่สำคัญก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่ามาก ซึ่งในกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมันนั้นจะได้น้ำมันปาล์มดิบอยู่ที่ประมาณ 18-22% ซึ่งจะถูกนำไปแปรรูปไปเป็นน้ำมันสำหรับบริโภคหรือใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ส่วนของเหลือประมาณ 78-82% ซึ่งได้แก่ ทะลายเปล่า เส้นใยปาล์ม เปลือกของผลปาล์ม กากสัลดจ์ รวมถึงน้ำที่อยู่ในทะเลาะปาล์มก็จะถูกนำมาใช้ประโยชน์ โดย ทะลายเปล่าและกากสัลดจ์จะถูกนำไปใช้ผลิตปุ๋ยอินทรีย์ เส้นใยเปลือกผลปาล์มและกะลาจะใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลและในส่วนที่เป็นของเหลวในทะเลาะจะแปรรูปเป็นโมลาส ซึ่งการที่นำของที่เหลือเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไปจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของทะเลาะปาล์มให้มีค่าสูงมากขึ้นและมีผลทำให้ราคาของปาล์มน้ำมันนั้นมีเสถียรภาพมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามการที่ผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น แต่ผลที่ตามมาคือวัชคุที่เหลือจากกระบวนการผลิตก็จะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มนั้นจะมีวัชคุที่เหลือจะอยู่รูปของแข็งได้แก่ทะเลาะปาล์มเปล่า (empty fruit bunches) เส้นใยปาล์ม (palm pericarp fiber) ส่วนที่เป็นกากเนื้อผลปาล์ม (palm



kernel cake) กะลาปาล์ม (palm shell) กากตะกอนสลัดจ์ (sludge) และส่วนที่เป็นของเหลวก็คือ น้ำทิ้ง (palm oil mill effluent, POME)

ทะลายเปล่า (oil palm empty fruit bunch: OPEFB) เป็นส่วนของทะลายที่สกัดผลปาล์มออกแล้วในอดีตทะลายเปล่ามีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมมาก เนื่องจากเป็นที่วางไข่ของด้วงแรดซึ่งเป็นแมลงที่กัดกินยอดปาล์มและมะพร้าว ดังนั้นโรงงานจะต้องเผาทะลายเปล่า ซึ่งทำได้ยากเนื่องจากมีความชื้นสูง แต่ปัจจุบันได้มีการใช้ทะลายเปล่าเป็นวัสดุในการเพาะเห็ดบ้างแต่ก็ยังไม่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามยังสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าได้มากกว่าการเพาะเห็ดเนื่องจากในส่วนของทะลายปาล์มเปล่าจะมีเส้นใยที่เหนียวที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนเส้นใยจากเปลือกมะพร้าวได้และนอกจากนั้นทะลายเปล่ายังมีปริมาณธาตุอาหารสูง ซึ่งสามารถนำไปเป็นวัสดุในการผลิตปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพสูง ทะลายปาล์มเปล่าที่เป็นวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมันยังประกอบด้วยส่วนที่เป็น Glucose, Xylose, Lignin, Ash และอื่นๆอีกมากมาย ที่สำคัญเนื่องจากในทะลายปาล์มเปล่ามีไซโลสเป็นองค์ประกอบซึ่งประโยชน์เป็นอย่างมากในกระบวนการในอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการผลิตน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคส โดยเน้นปรับสภาพทะลายปาล์มด้วยกรดและเบส แล้วทำการไฮโดรไลซิสโดยใช้เครื่อง autoclave และเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะศึกษาน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสจากทะลายปาล์มเปล่าโดยการจะใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอย่างคุ้มค่าให้ได้มากที่สุดซึ่งทะลายปาล์มเปล่าที่เป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีราคาที่ถูกหรือแทบไม่มีราคา (จะสามารถช่วยลดปริมาณของขยะที่ต้องบำบัดของชุมชนและโรงงาน) และยังเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมากโดยเฉพาะในโรงงานที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล โดยในปัจจุบันนั้นยังมีการนำทะลายปาล์มเปล่ามาใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อยที่เห็นได้ชัดมีเพียงการนำมาเป็นวัสดุในการเพาะเห็ดหรือเป็นปุ๋ยเท่านั้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการผลิตไซโลสจากทะเลสาบปาล์มเปล่า
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการในการผลิตไซโลสเพื่อให้ได้ผลผลิตมากที่สุด
3. เปรียบเทียบน้ำตาลไซโลสที่ได้จากการไฮโดรไลซิสทะเลสาบปาล์มที่ไม่ปรับสภาพกับที่ปรับสภาพด้วยกรด ต่าง และน้ำ

## 1.3 ขอบเขตวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้ในการไฮโดรไลซิส
2. ศึกษาผลของการปรับสภาพทะเลสาบปาล์มและศึกษาสภาวะที่เหมาะสม โดยจะแบ่งการปรับสภาพออกเป็น 2 วิธี คือ

### 2.1 การปรับสภาพด้วยวิธีการแช่

- 2.1.1 การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkali pretreatment) เลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับสภาพ
- 2.1.2 การปรับสภาพด้วยกรด (Acid pretreatment) เลือกใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ในการปรับสภาพ
- 2.1.3 การปรับสภาพด้วยกรด (Acid pretreatment) ร่วมกับการปรับสภาพด้วยกรด (Acid pretreatment)
- 2.1.4 การปรับสภาพด้วยน้ำ

### 2.2 การปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนมาเกี่ยวข้อง ทำการปรับสภาพในเครื่อง autoclave

- 2.2.1 การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkali pretreatment) เลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับสภาพ
- 2.2.2 การปรับสภาพด้วยกรด (Acid pretreatment) เลือกใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ในการปรับสภาพ
- 2.2.3 การปรับสภาพด้วยกรด (Acid pretreatment) ร่วมกับการปรับสภาพด้วยกรด (Acid pretreatment)

#### 2.2.4 การปรับสภาพด้วยน้ำ

3. วิเคราะห์องค์ประกอบ (hemicelluloses, cellulose, lignin) ของทะลายปาล์มไม่ปรับสภาพ และทะลายปาล์มที่มีการปรับสภาพในข้อ 2
4. เปรียบเทียบน้ำตาลไซโลสที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ของทะลายปาล์มไม่ปรับสภาพและ ทะลายปาล์มที่มีการปรับสภาพในข้อ 2

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำงานวิจัย

1. ทำให้ทราบสถานะที่เหมาะสมในการผลิตไซโลสจากทะลายปาล์มเปล่า
2. นำเอาส่วนของทะลายเปล่าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์
3. ทำให้ได้ไซโลสเพื่อนำไปผลิตเป็นไซลิตอลลต่อไป
4. ช่วยลดขยะในชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปาล์มน้ำมัน

ชื่อสามัญ ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) น้ำมันปาล์ม (crude palm oil) เรียกว่า CPO

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific name): *Elaeis guineensis* Jacq.

วงศ์ (Family): Palmae หรือ Recaceae

จีนัส (Genus): *Elaeis*

สปีชีส์ (Species): *guineensis*

#### 2.1.1 ประวัติและถิ่นกำเนิดของปาล์มน้ำมันการปลูกปาล์มน้ำมันในประเทศไทย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีอายุยืนยาว แพร่กระจายพันธุ์ปลูกอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา ประกอบด้วยปาล์มน้ำมัน 2 ชนิดคือ *Elaeis oleifera* ให้ผลผลิตและน้ำมันน้อย แต่ต้านทานโรค มักใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ และ *Elaeis guineensis* Jacq. ซึ่งปัจจุบันปลูกเพื่อการค้า ลักษณะของปาล์มน้ำมัน *E.guineensis* ให้ผลผลิตต่อทะลายสูง ให้น้ำมันสูง เริ่มนำมาปลูกในประเทศอินโดนีเซีย ประมาณ ปี พ.ศ. 2391 ภายในสวนพฤกษชาติโบกอร์ เมืองชวา จากนั้นแพร่กระจายเข้ามาปลูกในประเทศมาเลเซียและพัฒนาการปลูกเป็นเชิงอุตสาหกรรม

ในประเทศไทย พระยาประดิพัทธ์ภูบาล นำเข้ามาปลูกเป็นไม้ประดับที่สถานียทดลองยาง คอหงส์ จังหวัดสงขลาประมาณปี พ.ศ. 2472 คนไทยภาคกลางเรียกว่า “มะพร้าวหัวลิง” คนไทยภาคใต้จังหวัดปัตตานีเรียกว่า “หมากมัน” ต่อมาหม่อมเจ้าอมรสมานลักษณ์ กิติยากร ริเริ่มปลูกเป็นเชิงการค้าที่ตำบลบ้านปรก อำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา เนื้อที่ประมาณ 1,000 ไร่ แต่มีปัญหาในช่วงสงครามโลก ครั้งที่ 2 จึงเลิกกิจการไป ต่อมาปี พ.ศ. 2511 นายสุวรรณ รื่นยศ อธิบดีกรมประชาสัมพันธ์ ได้มีโครงการส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่นิคมสร้างตนเองพัฒนาภาคใต้ อำเภอควนกาหลง จังหวัดสตูล โดยให้สมาชิกปลูกรายละ 16 ไร่ พื้นที่ประมาณ 20,000 ไร่ และในปีเดียวกันนี้มีการปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อการค้าโดยบริษัทอุตสาหกรรมน้ำมันและสวนปาล์มจำกัด (บริษัทนิวน้ำมันปาล์ม จำกัด) ที่ตำบลปลายพระยา อำเภออ่าวลึก จังหวัดกระบี่ พื้นที่ประมาณ 20,000 ไร่ (ปัจจุบันเป็นอำเภอปลายพระยา จังหวัดกระบี่) ปี พ.ศ. 2518 กรมส่งเสริม

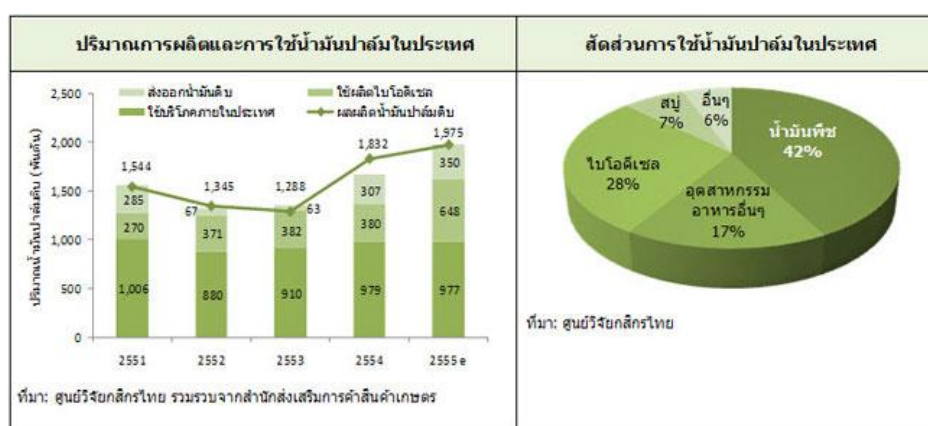
สหกรณ์ขยายโครงการส่งเสริมปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่นิคมสหกรณ์ท่าแซะและนิคมสหกรณ์หลังสวน จังหวัดชุมพร และสหกรณ์นิคมอ่าวลึก จังหวัดกระบี่ นับเป็นจุดเริ่มต้นการพัฒนาการปลูกปาล์มน้ำมันเชิงการค้า จนถึงปัจจุบัน (กรมส่งเสริมการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2552)

### 2.1.2 การปลูกปาล์มน้ำมันและผลิตน้ำตาลในประเทศไทย

สำหรับพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันของประเทศไทย ปัจจุบันได้ขยายตัวอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด จนกลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง โดยมีพื้นที่ปลูกทั้งประเทศประมาณ 4.5 ล้านไร่ ผลผลิตผลปาล์มสด 12.24 ล้านตัน ผลิตเป็นน้ำมันปาล์มดิบได้ 2.08 ล้านตัน ซึ่งมีมูลค่าของปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์มไม่ต่ำกว่า 92,000 ล้านบาท และแหล่งผลิตที่สำคัญ คือ ภาคใต้ ซึ่งมีพื้นที่ปลูกคิดเป็น 86 ของประเทศ โดยจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกสูงสุดได้แก่ จังหวัดสุราษฎร์ธานี (24%) รองลงมาได้แก่กระบี่ (23%) ชุมพร (19%) และนครศรีธรรมราช (5%) ตามลำดับ ยุทธศาสตร์แผนพัฒนาอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและน้ำมันปาล์ม (ปี 2551-2555) คณะกรรมการนโยบายปาล์มแห่งชาติ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ได้ตั้งเป้าหมายการพัฒนาว่าจะพัฒนาอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มทั้งระบบสำหรับเป็นอาหาร ผลิตภัณฑ์ต่างๆ วิตามินรวมทั้งพลังงาน และจะขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันให้ได้ปีละ 500,000 ไร่ รวม 2,500,000 ไร่ และพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทดแทนสวนปาล์มเก่าปีละ 100,000 ไร่ รวม 500,000 ไร่ โดยหนึ่งในแนวทางการพัฒนากล่าวถึงการบริหารจัดการปาล์มน้ำมันเพื่อให้เกิด การสมดุลในระบบการผลิต การตลาดและผู้บริโภค เพื่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้เกี่ยวข้องทั้งระบบและป้องกันการลักลอบนำน้ำมัน ปาล์มดิบจาก ประเทศเพื่อนบ้าน แต่ ณ วันนี้ปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันออกสู่ตลาดลดลง ก่อให้เกิดปัญหาขาดแคลนผลปาล์มและน้ำมันปาล์มดิบ กระทบกับโรงงานอุตสาหกรรมและผู้บริโภคเพราะราคาปาล์มน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มปรับตัวสูงขึ้นมาก (กรมส่งเสริมการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2552)

### 2.1.3 อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันไทย ปี 2557

ปาล์มน้ำมัน นับว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ปัจจุบัน ไทยมีจำนวนเกษตรกรผู้ปลูกปาล์มน้ำมันมากกว่า 1.28 แสนครัวเรือน มีพื้นที่เพาะปลูก และพื้นที่ให้ผลผลิตประมาณ 4.28 และ 3.98 ล้านไร่ ตามลำดับ สามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ปีละ 1.9 ล้านตัน ซึ่งช่วยสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรประมาณ 6 หมื่นล้านบาทต่อปี ทั้งนี้ การผลิตน้ำมันปาล์มดิบของไทยในปี 2555 มีแนวโน้มขยายตัว 5-7 จากปีก่อนหน้า ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากที่ภาครัฐได้มีการดำเนินยุทธศาสตร์ปาล์มน้ำมันในช่วงปี 2555-2557 เพื่อเร่งผลักดันให้เกษตรกรขยายพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มผลผลิต และผลิตภาพการผลิตน้ำมันปาล์มดิบเพื่อรองรับกับยุทธศาสตร์ พลังงานทดแทน และลดความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นต่อความมั่นคงทาง ด้านอาหารของประเทศ ประกอบกับราคาผลปาล์มดิบในช่วง 4 ปีที่ผ่านมาปรับตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากเดิมที่มีราคาเฉลี่ยกิโลกรัมละ 4 บาทในปี 2552 ปรับขึ้นเป็นกิโลกรัมละ 6 บาทในปี 2555 และในปี 2557 (อัปเดตเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2557) ผลปาล์มทะลายกิโลกรัมละ 4.40-4.70 บาท ผลปาล์มร่วงกิโลกรัมละ 5.00-6.60 บาท จึงเป็นแรงจูงใจที่ทำให้เกษตรกรขยายพื้นที่การเพาะปลูก (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย ธนาคารกสิกรรมไทย, 2551)



ภาพที่ 1 น้ำมันปาล์มในประเทศ

Figure 1 Palm oil in Thailand

ที่มา: <http://www.ksme care.com/Article/82/28155/ธุรกิจปาล์มน้ำมันหลังก้าวเข้าสู่AEC>

ส่วนทางด้านของปริมาณผลผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศ ส่วนใหญ่กว่า 80 ผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการใช้ภายในประเทศ โดยการใช้ น้ำมัน ปาล์มสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ

- ใช้เพื่อการบริโภค ทั้งในรูปแบบของน้ำมันพืชที่ใช้ในการประกอบอาหาร และใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ เช่น ขนมขบเคี้ยว บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป นมข้นหวาน ครีมและเนยเทียม ทั้งนี้ น้ำมันปาล์มนับว่าเป็นน้ำมันพืชที่มีการใช้บริโภคมากที่สุดในประเทศ คิดเป็น 65 ของมูลค่าตลาดน้ำมันพืชทั้งหมด เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีราคาที่ค่อนข้างถูกหากเทียบกับน้ำมันพืชประเภทอื่น ประกอบกับคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประกอบอาหารประเภททอด และไม่ทำให้อาหารมีกลิ่นหืน จึงทำให้คนส่วนใหญ่นิยมเลือกบริโภคน้ำมันปาล์ม
- ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน ที่เรียกว่าไบโอดีเซล เพื่อช่วยลดการใช้ น้ำมันดีเซลเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานให้กับประเทศ ช่วยลดปัญหาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เป็นที่น่าสังเกตว่าในช่วงตั้งแต่ปี 2551 เป็นต้นมา สัดส่วนการใช้ น้ำมันปาล์มในภาคพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จาก 21 ในปี 2551 เพิ่มขึ้นเป็น 28 ในปี 2554 และสำหรับในปี 2555 คาดว่า การใช้ น้ำมันปาล์มในภาคพลังงานจะยังคงมีสัดส่วนสูงถึง 35-40 ของการใช้ น้ำมันปาล์มทั้งหมด
- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ เช่น สบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์เคมีภัณฑ์ต่างๆ และอาหารสัตว์

#### 2.1.4 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์และการนำไปใช้ประโยชน์ของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน ( Oil palm) เป็นพืชน้ำมัน ( oil crop) ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ( *Elaeis guineensis*) ซึ่งปาล์มน้ำมันออกผลเป็นทะลาย ทะลายหนึ่งมีผลปาล์ม 1,000-2,000 ผล และมีน้ำหนักทะลายละ 10-15 กิโลกรัม ผลปาล์มน้ำมันมีลักษณะเป็นรูปรีหรือรูปไข่ มีขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร มีน้ำหนักผลละ 10-15 กรัม เปลือกฝวนอกของผลปาล์มเป็นสีเขียวหรือดำเมื่อผลอ่อน และเปลี่ยนเป็นสีส้มแดงเมื่อผลแก่และสุก (เรวัต เลิศฤทัยโยธิน, 2541)

ราก เกิดขึ้นตรงฐาน โคนของลำต้นเป็นระบบรากฝอย (Fibrous root system) รากของปาล์ม น้ำมันส่วนใหญ่จะกระจายอยู่บริเวณผิวดินลึกไม่เกิน 45 เซนติเมตร มีความหนาแน่นมากในบริเวณ โคนและระยะ 1.5 ถึง 2.0 เมตรจากลำต้น

**ลำต้น** จุดเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมันมีจุดเดียวคือตายอด ในระยะแรกลำต้นจะเจริญเติบโตด้านกว้าง จนมีขนาดเต็มที่ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 3 ปี ได้เป็นลำต้นใต้ดิน (Bole) จากนั้นเป็นการเจริญเติบโตด้านความสูงเป็นลำต้นเหนือดิน (Trunk) ที่มีกาบใบห่อหุ้มอยู่ กาบใบติดอยู่กับลำต้นอย่างน้อย 12 ปี ดังนั้นต้นปาล์มน้ำมันที่มีอายุไม่เกิน 12 ปี จะมีใบคลุมถึงโคนต้น หากอายุมากขึ้น กาบใบบริเวณโคนต้นจะทยอยร่วง

**ใบ** ใบของปาล์มน้ำมันประกอบด้วยก้านใบที่อาจมีความยาวถึง 7.5 เมตร สามารถประเภทของใบเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนปลายเป็นส่วนที่รองรับใบย่อย จำนวน 250 ถึง 300 ใบ และส่วนก้านที่ติดกับลำต้น ซึ่งเป็นส่วนที่มีหนามแข็ง ในระยะแรกใบจะเจริญเป็นเนื้อเยื่อต่างๆ ห่อหุ้มตายอด ซึ่งมีจำนวน 45 ถึง 50 ใบ แต่ละใบจะห่อหุ้มตายอดเป็นระยะเวลาประมาณ 2 ปี ต่อมาจะมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว จนกลายเป็นใบที่แหลมเหมือนหอก

**ช่อดอกและดอก** ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชผสมข้าม มีดอกเพศเมียและดอกเพศผู้แยกช่อดอกภายในต้นเดียวกัน (monoecious) ที่ตำแหน่งของทางใบมีตาดอก 1 ตา อาจจะพัฒนาเป็นช่อดอกเพศผู้หรือเพศเมีย บางครั้งจะพบว่ามีช่อดอกกะเทยซึ่งมีทั้งดอกเพศผู้และเพศเมียอยู่ร่วมกัน การบานของดอกปาล์มน้ำมันแต่ละดอกจะบานไม่พร้อมกัน การพัฒนาจากระยะตาดอกจนถึงดอกบานพร้อมที่จะรับการผสม (anthesis) ใช้เวลาประมาณ 33-34 เดือน การเปลี่ยนเพศของตาดอก (sex differentiation) จะเกิดขึ้นในช่วง 20 เดือนก่อนดอกบาน ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ช่อดอกจะพัฒนาเป็นช่อดอกเพศเมียเป็นส่วนใหญ่ การผสมเกสรมีลมและแมลงเป็นพาหะ โดยเฉพาะด้วงงวงปาล์มน้ำมัน (*Elaeidobius kamerunicus*) เป็นแมลงที่ช่วยผสมเกสรที่สำคัญ

**ทะลาย** ประกอบด้วย ก้านทะลาย ช่อดอกทะลายย่อย และผล ในแต่ละทะลายมีปริมาณผล 45-70% ทะลายปาล์มน้ำมันเมื่อสุกแก่เต็มที่ มีน้ำหนักประมาณ 1-60 กิโลกรัม แปรไปตามอายุของปาล์มน้ำมัน และปัจจัยสิ่งแวดล้อมแบบการปลูกเป็นการค้าต้องการทะลายที่มีน้ำหนัก 10-25 กิโลกรัม จำนวนทะลายต่อต้นก็มีความแตกต่างกัน

**ผล** ผลปาล์มน้ำมันไม่มีก้านผล (sessile drup) รูปร่างมีหลายแบบ ตั้งแต่รูปรียาวแหลมจนถึงรูปไข่หรือรูปยาวรี ความยาวผลอยู่ระหว่าง 2-5 เซนติเมตร น้ำหนักผลมีตั้งแต่ 3 กรัม จนถึงประมาณ 30 กรัม ประกอบด้วยผิวเปลือกนอก (exocarp) ชั้นเปลือกนอก (mesocarp) เป็นเนื้อเยื่อเส้นใย สีส้มแดงเมื่อสุกและมีน้ำมันอยู่ในชั้นนี้



**เมล็ด** เมล็ดของปาล์มน้ำมันมีลักษณะแข็ง ประกอบด้วย กะลา (endocarp) และเนื้อใน ซึ่งเจริญมาจากไข่ 1-3 อัน บางครั้งพบ 4 อัน ขนาดของเมล็ดขึ้นอยู่กับความหนาของกะลาและขนาดของเนื้อใน บนกะลาจะมีช่องสำหรับงอก (germ pore) 3 ช่อง ในกะลานั้นประกอบด้วยอาหารต้นอ่อน (endosperm) หรือเนื้อใน สีขาวอมเทาซึ่งมีน้ำมันสะสมอยู่ และมีเยื่อ (testa) สีน้ำตาลแก่หุ้มอยู่

การใช้ประโยชน์จากปาล์มน้ำมันส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดได้แก่ส่วนของผล ซึ่งทำหน้าที่เก็บน้ำมันไว้นั่นเอง ปาล์มน้ำมันสามารถที่จะนำมาแปรรูปเป็นสินค้าอุตสาหกรรมต่างๆเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย เช่นใบปาล์มน้ำมัน ในสวนปาล์มน้ำมันเมื่อมีการแต่งทางใบ สามารถสับย่อยทางใบและนำไปเลี้ยงสัตว์จำพวกวัว ควาย และม้าได้ โดยทางใบเป็นแหล่งของเส้นใย และวิตามินอีที่สำคัญ อีกทั้งใช้เป็นวัตถุดิบคลุมดินหรือบำรุงดิน ใบปาล์มน้ำมันแห้งเมื่อใช้คลุมดินจะช่วยรักษาความชื้นและป้องกันวัชพืชด้วย ในขณะที่เดียวกันก็จะกลายเป็นอาหารของจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งบางพวกสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ทำให้ไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้นอันเป็นผลดีแก่ปาล์มน้ำมัน

**การใช้ในทางอุตสาหกรรม** ประโยชน์ที่สำคัญของปาล์มน้ำมันก็คือ เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมผลิตน้ำมัน โดยในการผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันโดยตรงนั้นจะมีผลพลอยได้เกิดขึ้นหลายอย่างที่สำคัญได้แก่ทะลายปาล์มเปล่าของปาล์มน้ำมันนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร)

Crude Palm Oil (CPO) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสกัดผลปาล์มสด (Fresh Fruit Bunch) เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบมีลักษณะขุ่นสีส้มขุ่นในสถานะที่อุณหภูมิปกติ

คุณสมบัติ: ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์ม เพื่อที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องอื่นๆ

Crude Palm Kernel Oil (KO) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดเมล็ดในปาล์ม (Kernel) เพื่อให้ได้น้ำมันเมล็ดในปาล์ม มีลักษณะกึ่งของเหลว สีเหลืองอมน้ำตาล

คุณสมบัติ: ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการกลั่นน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องอื่นๆ

RKO RBD palm Kernel Oil เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (KO) เพื่อให้ได้น้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์มีลักษณะกึ่งของเหลวสีเหลืองอ่อนที่อุณหภูมิปกติ

คุณสมบัติ : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น นมข้นหวาน ไอศกรีม เนยขาว ฯลฯ

RBD Palm Oil (RPO) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มีลักษณะกึ่งของเหลวสีเหลืองอ่อนที่อุณหภูมิปกติ

คุณสมบัติ : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมการผลิตขนมปังสำเร็จรูป เนยเทียม ไอศกรีม นมข้นหวาน

RBD Palm Oil (ROL) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกไขปาล์มบริสุทธิ์ออกจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (RPO) เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มโอเลอิน มีลักษณะใส สีเหลือง ฉ อุณหภูมิปกติ และไม่มีสิ่งเจือปน

คุณสมบัติ : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารที่เกี่ยวข้องกับการทอดทุกชนิด เช่น ขนมขบเคี้ยว อาหารทอดสำเร็จรูป รวมถึงการนำไปใช้ประกอบอาหารภายในครัวเรือน

RBD Palm Stearin เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกไขปาล์มบริสุทธิ์ออกจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เพื่อให้ได้ปาล์มบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่อุณหภูมิปกติ

คุณสมบัติ : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเนยเทียม เนยขาว ครีม ฉาบหน้าขนม รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตสบู่ โอลีโอเคมีคอล

Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) เพื่อให้ได้กรดไขมันปาล์มมีลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาลอ่อนที่อุณหภูมิปกติ

คุณสมบัติ : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ อุตสาหกรรมโอลีโอเคมีคอล การผลิตวิตามินอี รวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล

Palm Kernel Fatty Acid Distillate (KFAD) ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการกลั่นน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เพื่อให้ได้กรดไขมันเมล็ดในปาล์มมีลักษณะใสสีเหลืองที่อุณหภูมิปกติ

คุณสมบัติ : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม เพื่อผลิตสบู่ อุตสาหกรรมโอลีโอเคมีคอล รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล

Kernel Meal (KM) ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการสกัดน้ำมันออกจากเมล็ดในปาล์ม (Kernel) เพื่อให้ได้กากเมล็ดในปาล์มมีลักษณะเป็นเกล็ดละเอียดสีน้ำตาลอ่อน

คุณสมบัติ : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัตว์ใหญ่

## 2.2. วัสดุเศษเหลือจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน

ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มมีวัสดุเศษเหลือในรูปของแข็งได้แก่ทะลายปาล์มเปล่า (oil palm empty fruit bunches) เส้นใยปาล์ม (palm pericarp fiber) กากเนื้อผลปาล์ม (palm kernel cake) กะลาปาล์ม (palm shell) กากตะกอนสลัดจ์ (sludge) และส่วนที่เป็นของเหลวคือน้ำทิ้ง (palm oil mill effluent, POME) องค์ประกอบและการนำไปใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดวัสดุเศษเหลือจำนวนมาก ได้แก่ ทะลายเปล่า เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม กากเนื้อผลปาล์มและน้ำทิ้งซึ่งความแตกต่างของวัสดุเศษเหลือขึ้นกับคุณภาพวัตถุดิบด้วย (พูนสุข, 2553)

1. เส้นใยปาล์ม (palm pericarp fiber) เป็นส่วนเปลือกนอกของผลปาล์มใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้องได้ โดยใช้ในระดับ 10 -20 ถ้าใช้ในระดับที่สูง (40 - 60) จะทำให้การกินและการย่อยได้ของสัตว์ลดลง

2. กากเนื้อผลปาล์ม (palm kernel cake) เป็นกากที่ได้จากการสกัดน้ำมันจากเนื้อเมล็ดในปาล์มเป็นอาหารที่เหมาะสมสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องโดยเฉพาะโคนมและไก่

3. กากเมล็ดปาล์มน้ำมัน (oil palm seed meal) เป็นกากที่ได้จากการสกัดน้ำมันของเมล็ดปาล์มซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 6 ของผลปาล์มสดและมีน้ำมันอยู่สูงถึง 51% (w/w) ทำให้กากเมล็ดปาล์มน้ำมันมีทั้งกะลาและเนื้อเมล็ดรวมกันใช้เป็นอาหารของไก่กระทงได้ดี

4. กากปาล์มน้ำมัน (oil palm meal) หรือกากปาล์ม (palm cake) เป็นกากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันของปาล์มทั้งผล ประกอบด้วยเปลือกนอกกะลาและเนื้อในของเมล็ดสามารถผสมในอัตรา 50 สำหรับเลี้ยงโครุ่น หรือ 10 - 30 สำหรับเลี้ยงสัตว์กระเพาะรวม เช่น วัว ควาย นอกจากการใช้เป็นอาหารสัตว์กากปาล์มน้ำมันยังใช้เป็นสับสเตรทในการเลี้ยงเชื้อ

5. ทะลายเปล่า (oil palm empty fruit bunch: OPEFB) เป็นส่วนของทะลายที่สกัดผลปาล์มออกหมดแล้วซึ่งในอดีตทะลายเปล่าปาล์มเปล่านั้นก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมมากเนื่องจากเป็นที่วางไข่

ของคิ้วแรด ซึ่งเป็นแมลงที่กัดกินยอดปาล์มและมะพร้าว ดังนั้นโรงงานจะต้องเผาทะลายเปล่า ซึ่งทำได้ยากเนื่องจากมีความชื้นสูง แต่ปัจจุบันได้ใช้ทะลายเปล่าเป็นวัสดุในการเพาะเห็ด แต่ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าได้มากกว่าการเพาะเห็ด เนื่องจากในส่วนแกนของทะลายปาล์มเปล่าจะมีเส้นใยที่เหนียวสามารถนำมาใช้ทดแทนเส้นใยจากเปลือกมะพร้าวได้ นอกจากนี้ทะลายเปล่ายังมีปริมาณธาตุอาหารสูง ( ไนโตรเจน 1% ฟอสฟอรัส 0.7% และโพแทสเซียม 3%) ซึ่งสามารถนำไปเป็นวัสดุในการผลิตปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพได้ ในต่างประเทศมักจะนิยมใช้ทะลายเปล่าคลุมดินในสวนปาล์มน้ำมันเพราะทะลายเปล่านั้นเป็นแหล่งของอินทรีย์วัตถุที่สำคัญเมื่อสลายตัวแล้วปลดปล่อยธาตุอาหารหมุนเวียนกลับคืนสู่ดินจึงสามารถใช้ทดแทนธาตุอาหารจากปุ๋ยเคมีหรือใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมีก็ได้ ให้ดินมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับโครงสร้างดินทำให้เกาะติดกันเป็นเม็ดดิน ช่วยเพิ่มความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืช อีกทั้งยังช่วยในเรื่องปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีให้ดีขึ้นคือทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้น ส่งเสริมให้ดินมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตและยังทำให้ผลผลิตของปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ทะลายปาล์มเปล่าที่เป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมัน ยังประกอบด้วย Glucose, Xylose, Lignin, Ash และอื่นๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 เนื่องจากในทะลายปาล์มเปล่าจะมีไซโลสและกลูโคสเป็นองค์ประกอบซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรม โดยไซโลสจากทะลายปาล์มเปล่าเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส ในรูปของไซแลน ( xylan) ซึ่งจะพบมากในเปลือกของฝักและผลไม้ นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ไซลิตอลซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวและมีรสหวานคล้ายกับน้ำตาลทรายแต่จะให้พลังงานต่ำกว่า โดยไซลิตอลจะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมด้านอาหาร ยา และเครื่องสำอางนอกจากนี้ทะลายปาล์มยังประกอบด้วยซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในทางอุตสาหกรรมเช่น ไซโลสสามารถนำไปผลิตเป็นไซลิตอลได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของทะลายปาล์มเปล่า

Table 1 Components in oil palm empty fruit bunch

องค์ประกอบของทะลายปาล์มเปล่า	%
Glucan	42.85%
Xylan	24.01%
Lignin (acid insoluble)	11.70%
Ash	0.52%
Others	20.92%



ภาพที่ 2 ทะลายปาล์มเปล่า

Figure 2 Oil palm empty fruit bunch

ที่มา : [http://www.em-group.co.th/Technology\\_Biomass.html](http://www.em-group.co.th/Technology_Biomass.html)



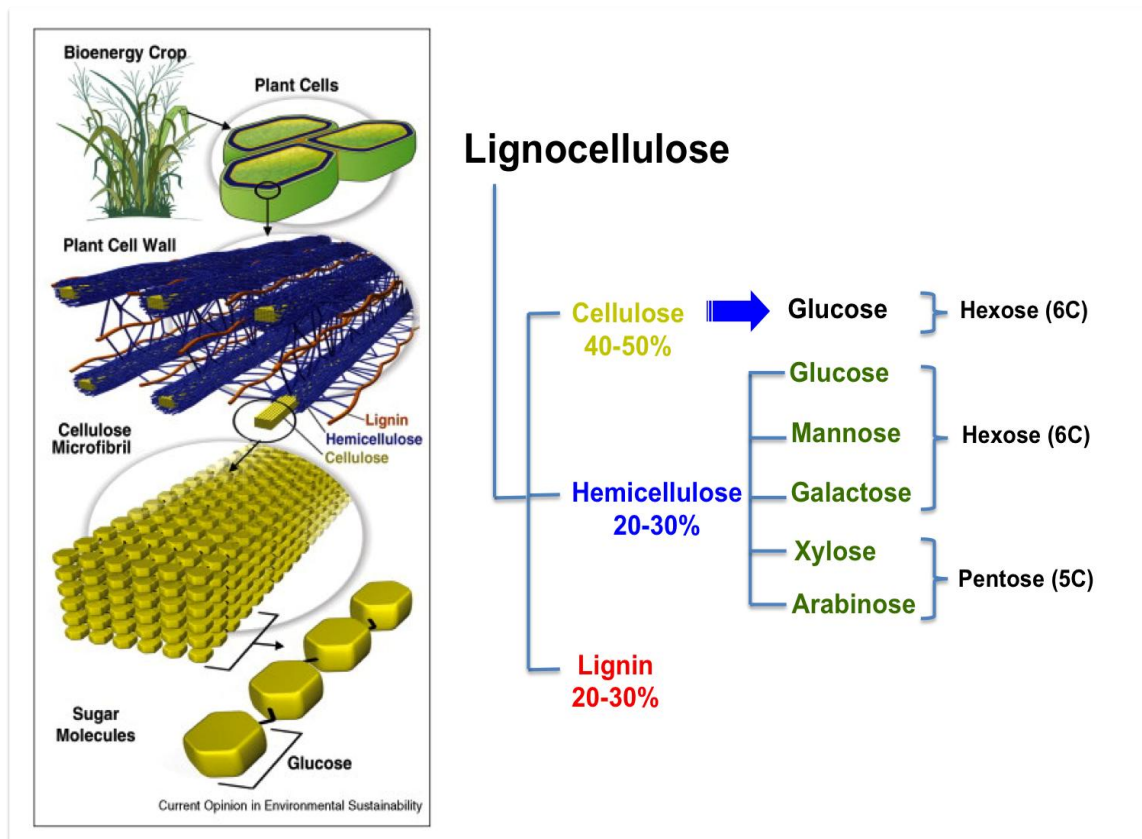
ภาพที่ 3 เส้นใยจากทะลายปาล์มเปล่า

Figure 3 Fiber of oil palm empty fruit bunch

ที่มา : <http://www.manager.co.th/Campus/ViewNews.aspx?NewsID=954000023513>

### 2.3 องค์ประกอบของเซลล์พืช

มีส่วนประกอบของผนังพืชหรือลิกโนเซลลูโลสจะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบมากในผนังเซลล์ของพืชได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งจากไม้ทั้งไม้เนื้อแข็งและเนื้ออ่อน เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรเช่น ชังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และพวก ฟางข้าว เป็นต้น ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากบ้านเรือนรวมถึงมูลสัตว์ต่างๆ



ภาพที่ 4 องค์ประกอบของผนังเซลล์พืช

Figure 4 Cell wall compositions

ที่มา: <http://omniamicrobes.wordpress.com/2012/07/26/ไบโอเอทานอล-bioethanol-พลังงานทา-2/>

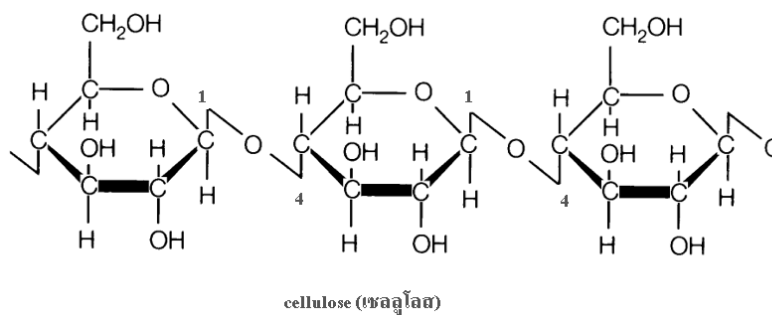
### 2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส มีสูตรโมเลกุล  $(C_6H_{10}O_5)_n$  คือสารที่เป็นโครงสร้างของพืชซึ่งเมื่อถูกย่อยสลายแล้วจะได้น้ำตาลกลูโคส พวกเอนไซม์ในร่างกายของสัตว์ไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ เซลลูโลสเป็นประโยชน์ต่อสัตว์ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาของแบคทีเรีย แห่่งคาร์โบไฮเดรตที่นิยมใช้ในอาหารสัตว์น้ำ ได้แก่ พืช และผลิตภัณฑ์จากพืช เช่น แป้ง ข้าวโพด มันสำปะหลัง ฯลฯ สัตว์น้ำมีความสามารถในการย่อยคาร์โบไฮเดรต แต่รูปแบบแตกต่างกันไป ปลาที่มี Pyloric Caeca สามารถผลิตน้ำย่อยที่สามารถย่อยคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนได้ เซลลูโลสจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากกลูโคสประมาณ 50,000 โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว แต่ละสายของสายของเซลลูโลสเรียงขนานกันไป มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสาย ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย

ที่สะสมไว้ในพืช ไม่พบในเซลล์สัตว์ เซลลูโลสไม่ละลายน้ำและร่างกายของมนุษย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ แต่ในกระเพาะของวัว ควาย ม้า และสัตว์ที่ทำมีกีบ มีแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสได้ ถึงแม้ว่าร่างกายของมนุษย์จะย่อยเซลลูโลสไม่ได้ แต่เซลลูโลสจะช่วยในการกระตุ้นลำไส้ใหญ่ให้เคลื่อนไหว เส้นใยบางชนิดสามารถดูดซับน้ำได้ดี จึงทำให้อุจจาระอ่อนนุ่ม ขับถ่ายง่าย ท้องไม่ผูก ลดโอกาสการเกิดโรคริดสีดวงทวาร เซลลูโลสเมื่อถูกย่อยจะแตกตัวออก ให้น้ำตาลกลูโคสจำนวนมาก

เซลลูโลส ( cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของเซลล์ (structural carbohydrate) ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือโมเลกุลของกลูโคส (glucose subunits) 1,000-10,000 โมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) 200,000-2,000,000 หน่วยย่อยพื้นฐาน (basic subunit) คือ เซลโลไบโอส (cellobiose) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุล ต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glucoside linkage โดยที่ไม่มีการแตกแขนง เซลลูโลสใน primary cell wall ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และอย่างน้อย 14 ,000 โมเลกุลใน secondary cell wall โดยโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า microfibril ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช ปริมาณของเซลลูโลสอาจพบน้อยมากในส่วนที่สะสมอาหารเช่นในอินทผาลัมมีเพียง 0.8% ขณะที่ในส่วนของเส้นใยฝ้าย ( cotton fibers) มีมากถึง 98% เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลเรียงตัวเป็นมัดเรียกว่า fibril โดยมีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกลูโคสที่อยู่ใกล้กันกับสายของเซลลูโลสสายหนึ่งกับเซลลูโลสอีกสายหนึ่งเชื่อมต่อกันเป็น fibril ดังแสดงในรูป นอกจากนั้นเซลลูโลสที่พบในทั้งไม้เนื้ออ่อนและเนื้อแข็งมีความทนต่อกรดได้มากกว่าเฮมิเซลลูโลส โดยเซลลูโลสจะสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ สามารถแตกตัวออกเป็นหน่วยของกลูโคสได้โดยการเตรียมทางเคมีใช้กรดเข้มข้นและอุณหภูมิสูง (ระวีวรรณ, 2538; Johnathan, 2007)

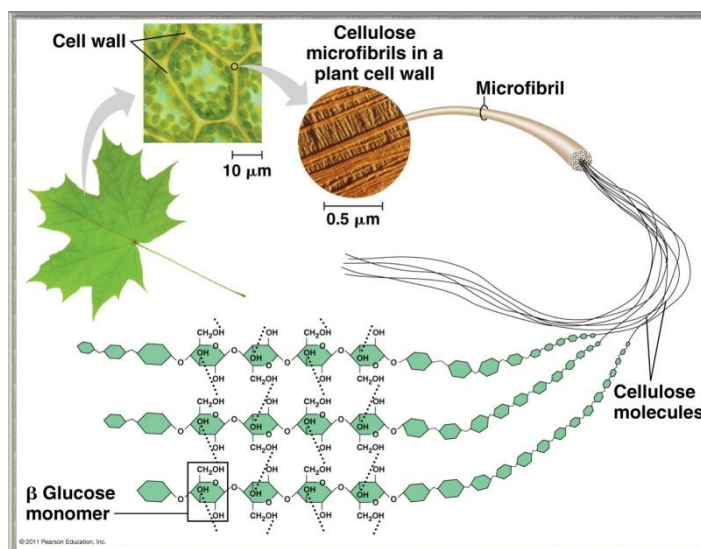




ภาพที่ 5 โครงสร้างของเซลลูโลส

Figure 5 The structure of cellulose

ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose-เซลลูโลส>



ภาพที่ 6 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส

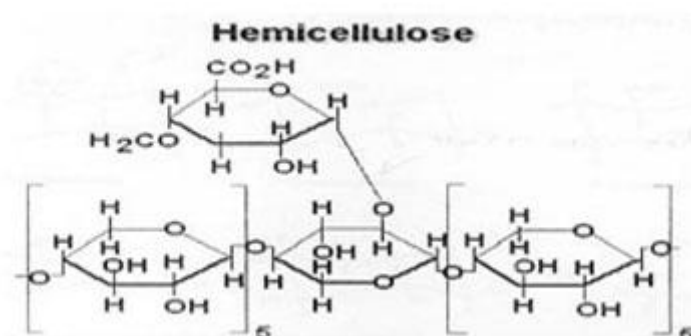
Figure 6 The structure of cellulose molecules

ที่มา: <http://www.thaigoodview.com/node/21065?page=0,4>

### 2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส จัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) พบมากในไม้เนื้อแข็งเปลือกพวกพืชตระกูลหญ้า ไม่ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว สามารถละลายได้ในสารละลายต่างเจือจาง สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange) เมื่ออยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์ เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ของพืชที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลสพบมาก ในผัก และผลไม้

เฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส เป็น heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีน้ำตาลไซโลส (xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง 1,4- $\beta$  เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วยและมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนงได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) ปกติจะอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและลิกนินในผนังของเซลล์พืช โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็น heteroglycan ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดมาต่อกันเช่น  $\beta$ -D-xylopyranose,  $\alpha$ -L-arabofuranose,  $\beta$ -D-glucopyranose,  $\alpha$ -D-galactopyranose,  $\beta$ -D-mannopyranose,  $\alpha$ -L-rhamnopyranose และ  $\alpha$ -L-fucopyranose ซึ่งน้ำตาลทั้งหมดมีลักษณะเป็น pyranose form ยกเว้น arabofuranose ที่มีลักษณะเป็น furanose form acid Araf = L-arabinofurnoayl residue, Glcpa = glucuronic acid residue, Xylp = D-xylopyranosyl residue เฮมิเซลลูโลสในพืชทั่วไป มีโครงสร้างหลัก (back bone) เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลไซโลส ที่เชื่อมต่อกัน 1,4 - $\beta$ -linkage โดยมี branch เป็นน้ำตาล pentose, hexose หรือ uronic acid ตัวอย่างของโครงสร้างเฮมิเซลลูโลส (ระวีวรรณ, 2538; Johnathan, 2007)



ภาพที่ 7 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

Figure 7 The structure of hemicellulose

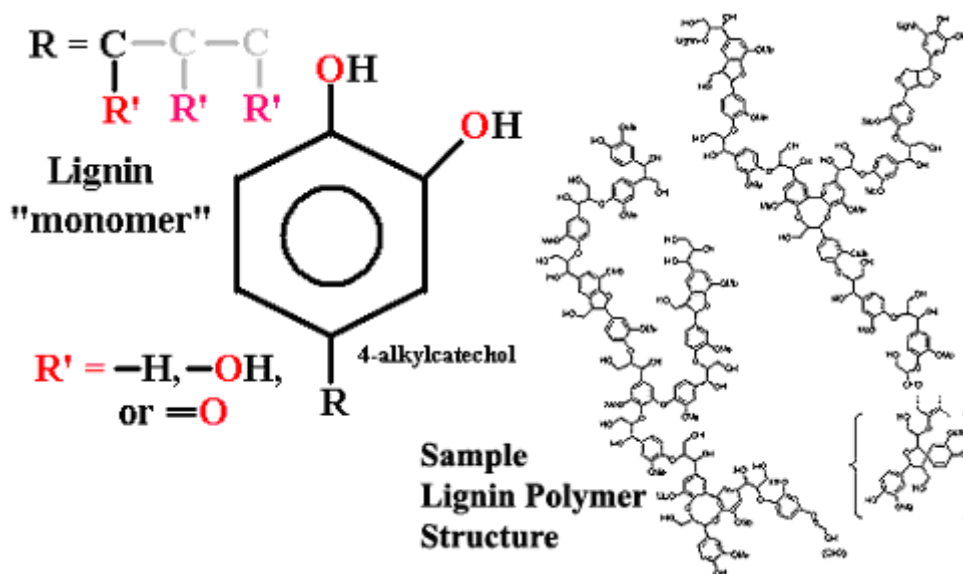
ที่มา: [http://www.buranapagroup.com/knowledge\\_chemical.php](http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php)

### 2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน (lignin) เป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ประเภทใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ให้พลังงาน โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโซ่โมเลกุลของออกซิเจนเตตฟีนิลโพรเพน (oxygenated phenyl propane) มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000-4,500 ดาลตัน สันเคราะห์จากอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้แก่ คูมาริล (coumaryl) โคนิเฟอริล (coniferyl) และไซนาพิล (sinapyl) ไม่สลายทั้งในกรดและด่างแก่ ลิกนินเป็นสารประกอบ aromatic ซึ่งหมู่ -OH group สามารถสร้างพันธะกับหมู่ aldehyde ได้เป็น hemiacetal หมู่ ketals โครงสร้างของลิกนิน ลิกนินมีความต้านทานต่อจุลินทรีย์ และ anaerobic process ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ aromatic ring ของลิกนินได้ หรือถ้าเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ก็จะช้ามากเป็นเวลาหลายวัน ลิกนินพบในธรรมชาติ โดยเป็นตัวยึดเกาะระหว่างเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (พชรภณ สนทอง, 2556)

แหล่งที่พบลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรงอยู่ร่วมกับเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนประกอบของเปลือก ช้าง หรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้น ไปสู่ยอด เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น ปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย พบมากในผลไม้สุกมากกว่าผลไม้ดิบ

การย่อยในทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์ ลิกนินเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยได้ในร่างกายมนุษย์และไม่มีสัตว์ชนิดใดใช้ประโยชน์ได้เลย ลิกนินจะทำให้การย่อยได้ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงด้วย ดังนั้นปริมาณลิกนินจึงมีความสำคัญต่อการประเมินคุณภาพของพืชอาหารสัตว์ที่ใช้สำหรับเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง ม้า และกระต่าย ลิกนินสามารถดูดซับน้ำดี (Bile acid) ได้ดี และอาจมีผลชะลอการดูดซึมสารอาหารบางชนิดในลำไส้เล็ก



ภาพที่ 8 โครงสร้างของลิกนิน

Figure 8 The structure of lignin

ที่มา: <http://palaeos.com/plants/glossary/glossaryL.html>

จากการสืบค้นข้อมูลพบว่านักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของทะลายปาล์มเปล่าดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในทะลายปาล์มเปล่า

Table 2 Cellulose hemicellulose and lignin contents in oil palm empty fruit bunch

องค์ประกอบ	ปริมาณ (% (w/w))		
	Umikalsom และคณะ (1997)	Rahman และคณะ (2006)	Loboguerrero และคณะ (2007)
เซลลูโลส	50.40	42.85	46.77
เฮมิเซลลูโลส	21.90	24.01	17.92
ลิกนิน	10.00	11.70	4.15
เถ้า	0.50	0.55	-
ความชื้น	-	-	-
อื่นๆ	17.20	20.92	-

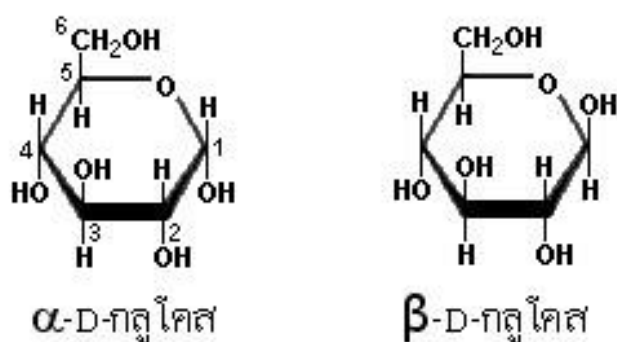
## 2.4. โครงสร้างของน้ำตาลที่พบในทะลายปาล์มเปล่า

### 2.4.1 กลูโคส (Glucose)

น้ำตาลกลูโคสเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่มีความสำคัญค่อนข้างมาก เพราะเป็นน้ำตาลพื้นฐานของคาร์โบไฮเดรตทุกตัว หรือเป็นสารตั้งต้นของการผลิตพลังงาน น้ำตาลเชิงเดี่ยวทุกตัวจะต้องเปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคสที่ตับก่อนจึงจะนำไปใช้ได้ ด้วยเหตุนี้ น้ำตาลกลูโคสจึงเป็นน้ำตาลที่พบมากในร่างกายโดยเฉพาะในเลือดบางครั้งจึงเรียกว่า บลัด ซูการ์ (Blood sugar) ระดับน้ำตาลหรือน้ำตาลกลูโคสในเลือดปกติจะประมาณ 70-110 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร เซลล์ในสมองใช้กลูโคสเพียงอย่างเดียวเป็นแหล่งพลังงาน สมองจึงต้องได้รับกลูโคสจากเลือดตลอดเวลา (นุจริย์ เตารัตน์ , 2555)

แหล่งอาหารธรรมชาติที่พบกลูโคส คือ ข้าว แป้ง น้ำตาล น้ำผึ้ง ผัก และผลไม้ ผลไม้ที่พบว่ามีมาก คือ องุ่น ในร่างกายของคน และสัตว์ได้จากการย่อยแป้ง และน้ำตาลทุกชนิด ด้วยเหตุนี้กลูโคสจึงเป็นน้ำตาลที่พบมากในร่างกาย

โครงสร้างของน้ำตาลกลูโคส มีหลายแบบ เช่น โครงสร้างแบบโซ่เปิด (open-chain structure) หรือ Fischer projection โครงสร้างแบบวง (cyclic หรือ ring structure) หรือ Haworth projection กลูโคสมีโครงสร้างแบบวง ที่มีขนาดของวง 6 อะตอม (เรียกว่า six-membered ring) ซึ่งเกิดจากการปิดวงโดยหมู่ไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์ ให้อะซิตัล (acetal)



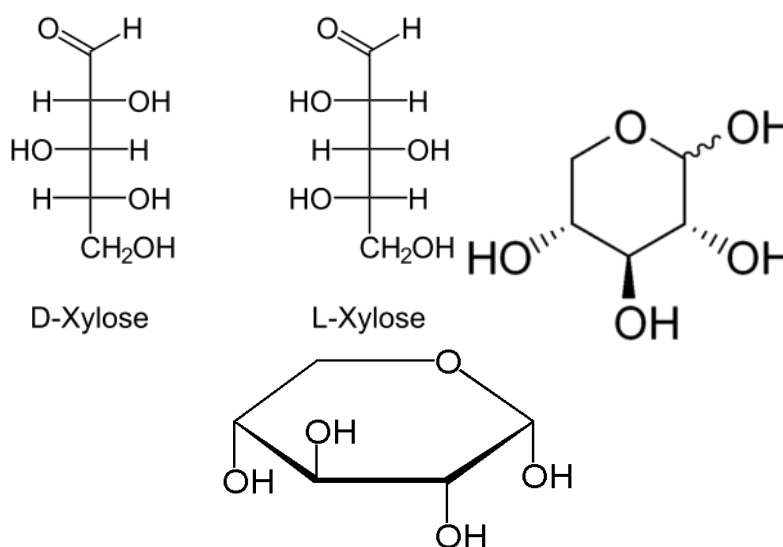
ภาพที่ 9 โครงสร้างของกลูโคส

Figure 9 The structure of glucose

ที่มา: [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-biology1/Chapter2/Part4\\_1.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-biology1/Chapter2/Part4_1.html)

### 2.4.2 น้ำตาลไซโลส

น้ำตาลไซโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ( Monosaccharide) ซึ่งจะอยู่ประเภทน้ำตาลอัลโดส (aldose) ที่มีคาร์บอน 5 อะตอม (pentose) มักจะไม่พบอิสระแต่เป็นน้ำตาลที่พบในโครงสร้างของ polysaccharide



ภาพที่ 10 โครงสร้างของไซโลส

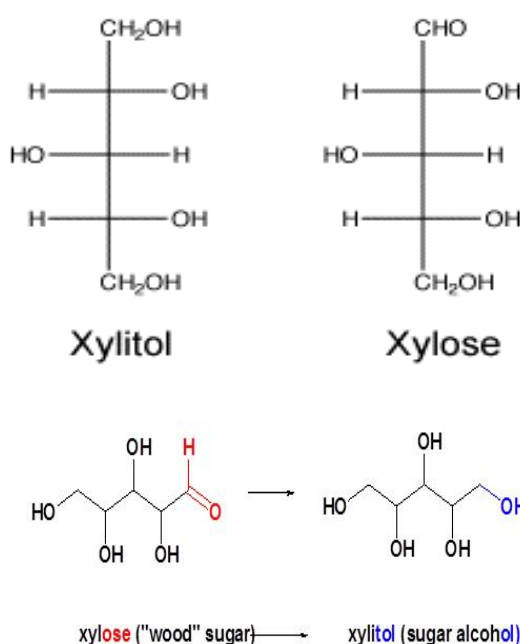
Figure 10 The structure of xylose

ที่มา: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:DL-Xylose.svg>

ไซโลสเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสในรูปของไซแลน (Xylan) ซึ่งพบมากในเปลือกของผักและผลไม้จึงใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ไซลิทอล

ไซลิทอลเป็นสารจากธรรมชาติให้รสหวานเช่นเดียวกับน้ำตาลแต่จะให้พลังงานที่ต่ำกว่า พบได้ในเส้นใยของผักและผลไม้ต่างๆ เช่นผลไม้กลุ่มเบอร์รี่ ชงข้าวโพด และเห็ด เป็นต้น ไซลิทอลสกัดได้ครั้งแรกจากเปลือกของต้น Birch ที่ประเทศฟินแลนด์ มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวคล้ายกับกับน้ำตาล ให้รสหวานคล้ายน้ำตาลทราย ใช้แทนน้ำตาลหรือใช้ผสมในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ไซลิทอลหนึ่งช้อนชาจะให้พลังงาน 9.6 แคลอรีเมื่อเทียบกับน้ำตาลซึ่งจะให้พลังงาน 15 แคลอรี ไซลิทอลจะถูกนำมาใช้ในด้านอาหาร ยา และเครื่องสำอาง

ไซลิตอลเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ (Sugar alcohol) สูตรโมเลกุลคือ  $C_5H_{12}O_5$  ละลายน้ำได้ดี (ประมาณ 60% โดยมวลที่อุณหภูมิ 25°C) และไม่มีกลิ่น ระหว่างการเก็บมีความคงตัวสูงและไม่เปลี่ยนเป็นน้ำตาล ร่างกายสร้างขึ้นในกระบวนการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตประมาณ 5-15 mg ต่อวัน ไซลิตอลสามารถสังเคราะห์ได้จากไซโลสโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันที่อุณหภูมิและความดันสูงและใช้โลหะนิกเกิลเป็นตัวเร่ง หมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) ในไซโลสจะถูกรีดิวซ์เป็นหมู่ไฮดรอกซี (OH)



ภาพที่ 11 โครงสร้างของไซลิตอล

Figure 11 The structure of xylitol

ที่มา: [http://www.myfirstbrain.com/student\\_view.aspx?ID=70436](http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=70436)

ไซลิตอลดูดซึมที่ลำไส้เล็กเข้าสู่เลือดไปยังตับแล้วจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคสถูกเผาผลาญเป็นพลังงาน แต่เนื่องจากการดูดซึมจะเกิดขึ้นช้าจึงทำให้ไซลิตอลส่วนใหญ่ที่ลงไปยังลำไส้เล็กนั้นตอนล่างถูกแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์เปลี่ยนเป็นกรดไขมันสายสั้นนั้นดูดซึมกลับไปยังตับเพื่อให้พลังงานต่อไป ไซลิตอลจะไม่เพิ่มระดับกลูโคสและอินซูลินในเลือดไซลิตอลปริมาณ



4-12 กรัมต่อวัน มีประสิทธิภาพที่ดีและไม่ก่อให้เกิดอันตราย หมากฝรั่ง (gum) หนึ่งชิ้นจะมีไซลิทอลประมาณ 1 กรัม ดังนั้นในหนึ่งวันถ้ารับประทานสี่ชิ้นก็จะได้รับไซลิทอลประมาณสี่กรัม

การใช้ไซลิทอลในอุตสาหกรรมอาหารพบว่ามีแนวโน้มการใช้อย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น หมากฝรั่ง ช็อคโกแลต ทอฟฟี่ คาราเมล ลูกกวาด เยลลี่ ไอศกรีม และโยเกิร์ต เป็นต้น โดยไซลิทอลจะมีข้อดีกว่าน้ำตาลซูโครสหลายประการ เช่น เมื่อรับประทานเข้าไปแล้วให้ความรู้สึกเย็นสดชื่น ไม่ทำให้เกิดโรคฟันผุ เนื่องจากจุลินทรีย์ในปากไม่สามารถใช้ไซลิทอลได้จึงทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีไซลิทอลเป็นส่วนประกอบนั้นไม่เสื่อมสภาพได้ง่าย สามารถที่จะเก็บไว้นาน นอกจากนี้ไซลิทอลยังให้พลังงานที่ต่ำกว่าซูโครสจึงนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ

## 2.5. การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การไฮโดรไลซิส เป็นการย่อยสลายโพลีเมอร์ของน้ำตาล หรือโมโนแซ็กคาไรด์ให้สั้นลง สามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีแรกคือ การไฮโดรไลซิสด้วยสารเคมี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและด่าง ได้มีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบปริมาณของเอทานอลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและด่างพบว่าปริมาณของเอทานอลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดนั้นจะมีปริมาณที่สูงกว่าไฮโดรไลซิสด้วยด่างประมาณ 3 เท่า และยังพบว่ามีการใช้ด่างเป็นสารเคมีที่ในการปรับสภาพวัตถุดิบมากกว่า อีกทั้งในงานวิจัยส่วนมากนิยมใช้กรดในการไฮโดรไลซิส เนื่องจากทำได้ง่ายและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาสั้นและพบว่าการใช้ด่างในการไฮโดรไลซิสเป็นที่ยอมรับในการใช้กำจัดลิกนินออก ช่วยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนินและการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยา วิธีที่สองคือ การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์

**กระบวนการย่อย (Hydrolysis)** เนื่องจากทะเลียมเปลา่มีสารพวกเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นโพลีแซ็กคาไรด์เป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นเมื่อนำมาทำการย่อยสลายจะได้น้ำตาลออกมา โดยถ้าทำการย่อยสลายเซลลูโลสอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันคือกลูโคส แต่ถ้าการย่อยสลายเกิดไม่สมบูรณ์จะได้ทั้งกลูโคส เซลโลไบโอส (cellulobiose) และพอลิโอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) ปนกัน ส่วนเฮมิเซลลูโลสเมื่อย่อยสลายก็จะได้น้ำตาลหลายชนิดปนกันขึ้นกับโครงสร้างของน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลส การย่อยสลายนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

### 2.5.1 การย่อยสลายด้วยสารเคมี (Chemical Hydrolysis)

เป็นการย่อยสลายด้วยกรดหรือด่างโดยจะไปทำลายพันธะไกลโคซิดิกระหว่างคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจน ส่วนใหญ่การย่อยสลายแบบนี้ต้องการสภาวะที่รุนแรง (นุจรีย์ เตรีตน์, 2555)

1) การย่อยสลายด้วยกรด (Acid Hydrolysis) อาจแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ คือ

1.1) Homogenous process เป็นกระบวนการที่ใช้กรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริกเข้มข้น ผลึกภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลกลูโคส แต่ข้อเสียคือ จะต้องมีการแยกกรดออกจากน้ำตาลก่อนนำไปใช้และนำกรดกลับมาใช้ใหม่ (recycle) รวมทั้งปัญหาการสูญเสียกรดไปกับส่วนที่ไม่ถูกย่อยสลาย และการฟุ้งกระจายของเครื่องมือจากการใช้กรดแก่

1.2) Heterogenous process เป็นกระบวนการที่ใช้กรดอ่อนแต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า  $180^{\circ}\text{C}$  ผลการย่อยคือ เซลลูโลสยังมีโครงสร้างเป็นเส้นใยอยู่ (fibrous structure) วิธีการนี้จะไม่สามารถนำกรดกลับมาใช้ใหม่ แต่จะถูกทำให้เป็นกลางด้วยปูนขาว หรือแคลเซียมคาร์บอเนต

#### การย่อยด้วยกรด

ในการย่อยเป็งด้วยกรด Hydroxonium ion ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนใน  $\alpha(1,4)$  glycosidic bond ในขั้นต่อไป อิเล็กตรอนใน carbon-oxygen bond จะย้ายไปที่ oxygen atom เกิดสภาวะที่ไม่เสถียร เกิด high-energy carbocation intermediate ต่อจากนั้นทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิด hydroxyl group อีกครั้งหนึ่ง

#### 1.2 การย่อยโครงสร้างของผนังพืชด้วยกรด

การย่อยสลายพันธะ Glycosidic linkages ในคาร์โบไฮเดรตด้วยกรดได้ผลึกภัณฑ์เป็นน้ำตาลซึ่งการย่อย เป็นการแตกออกของพันธะ glucosidic พร้อมกับการเติม โมเลกุลของน้ำไปยังโมเลกุล 2 ส่วนคือ ส่วนที่รับ  $\text{H}^+$  และอีกส่วนหนึ่งรับ  $\text{OH}^-$

ปฏิกิริยาของกรดในการย่อย จะประกอบด้วย

- 1) การกระจายจากตัวของ proton ไปยังส่วนที่เป็น lignocellulosic matrix
- 2) ออกซิเจนให้ proton ไปยังพันธะ heterocyclic ether ระหว่าง sugar monomers แต่ละตัว
- 3) ทำลายพันธะ ether
- 4) สร้างคาร์บอนเพื่อเป็นสาร intermediate

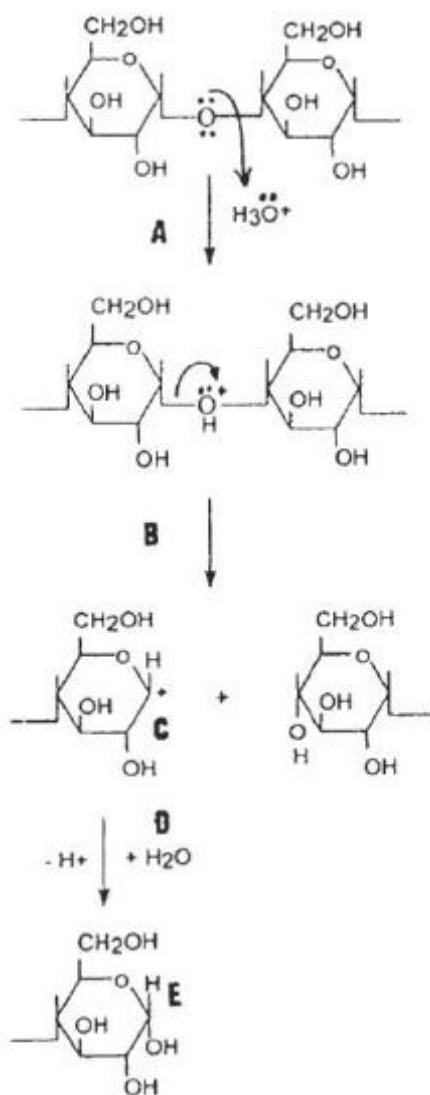
5) คาร์บอนถูกละลายด้วยน้ำ

6) Proton จะถูกสร้างขึ้นใหม่เพื่อสร้างพันธะ ether ได้เป็น sugar monomer, oligomer หรือ polymer ขึ้นกับตำแหน่งของพันธะ ether

7) การเข้าทำปฏิกิริยาจะขึ้นกับรูปร่าง และขนาดของวัตถุดิบ

กรดที่นิยมใช้ในการย่อย คือ กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) ปริมาณน้ำตาลที่ได้จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ เวลา อุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดที่ใช้ โดยความเข้มข้นของกรดมีผลต่อปริมาณน้ำตาลที่ได้ ในขณะที่อุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น โดยที่น้ำตาลเพนโตสนั้นจะเกิดปฏิกิริยาต่อได้เป็น furfural และ 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) เกิดจากน้ำตาลเฮกโซส ปริมาณของ furfural และ 5-HMF ที่เกิดขึ้นก็ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการย่อยด้วย

ข้อดีของวิธีการ Diluted acid hydrolysis ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้เอนไซม์ คือ ประหยัดและสะดวกกว่า เนื่องจากขั้นตอนการย่อยด้วยเอนไซม์นั้นอาจมีขั้นตอน pretreatment ซึ่งต้องใช้เวลาในการ breakdown วัตถุดิบให้กลายเป็นน้ำตาล วิธีการ diluted-acid hydrolysis ใช้ปริมาณกรดเพียงเล็กน้อย และยังมีราคาที่ถูกกว่าเอนไซม์ อีกทั้งเวลาในการย่อยสั้นกว่า



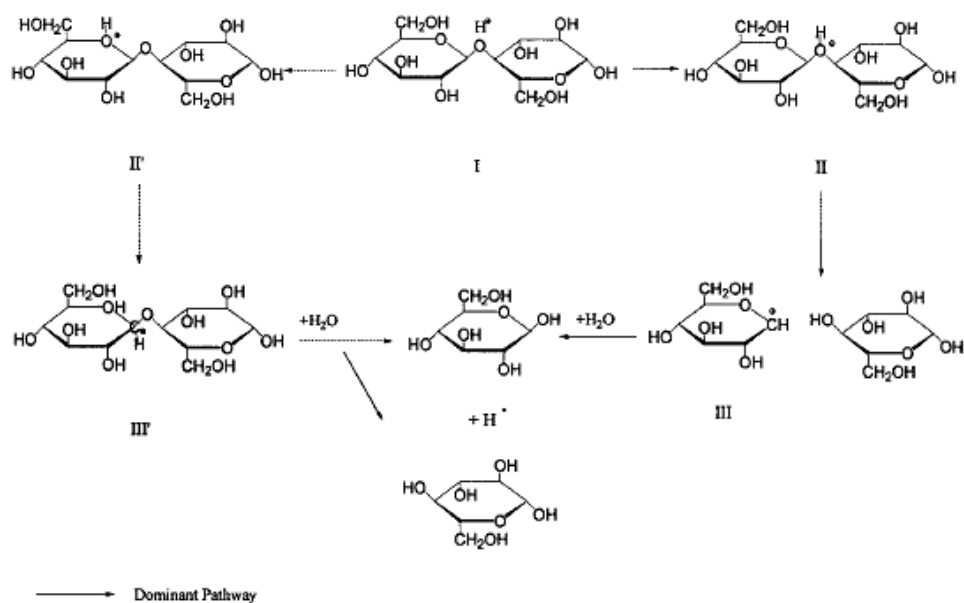
ภาพที่ 12 กลไกการย่อยโครงสร้างของแป้งด้วยกรด

Figure 12 Mechanism of acid hydrolysis of starch

ที่มา: กนก รัตน์ะกนกชัย, (2543), Biodegradation of cellulose and pectin substances

การย่อยเซลลูโลสด้วยกรดเป็นปฏิกิริยาเรียกว่า Heterogeneous reaction ซึ่งอาศัยปัจจัยทางกายภาพเช่นเดียวกับปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยสารเคมีทั่วไป กลไก acid hydrolysis ของเซลลูโลส (การย่อยสลาย  $\beta$ -1-4 glycosidic bond)

ปฏิกิริยา Acid-hydrolysis เริ่มต้นจากการย่อยสลายที่ glycosidic Oxygen linkage ของน้ำตาล 2 โมเลกุลทำให้เกิดการสลายของพันธะ C-O conjugate เกิดเป็น cyclic carbonium ion และเมื่อน้ำเกิดขึ้นใน ปฏิกิริยา fire suger และ proton จะถูกปล่อยออกมา การเกิด intermediate carbonium ion จะเกิดขึ้นที่บริเวณตอนปลายมากกว่าตอนกลางของสาย polysaccharide (นุจรีย์ เตรัตน์, 2555)



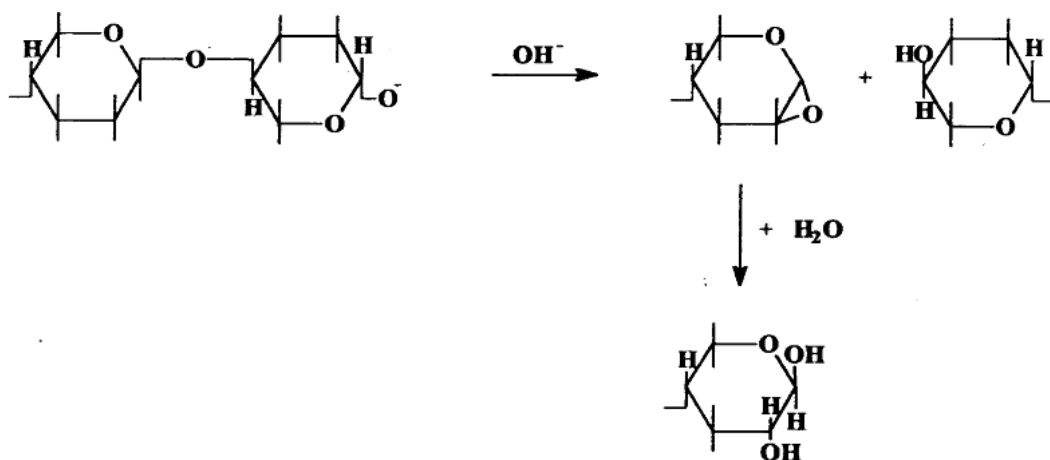
ภาพที่ 13 กลไกการย่อยโครงสร้างของแป้งด้วยกรด

Figure 13 Mechanism of acid catalyzed hydrolysis of  $\beta$ 1-4 glucan

ที่มา: กนก รัตน์กะนกชัย, (2543), Biodegradation of cellulose and pectin substances

### การย่อยสลายด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis)

สารเคมีที่มีนิยมนำมาใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง เอทิลีนไดอะมีน และแอมโมเนีย เป็นต้น จะมีผลทำให้สายของโพลีแซคคาไรด์สั้นลง โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $160-180^{\circ}\text{C}$  และต้องการออกซิเจนในปริมาณเล็กน้อยซึ่งใช้ในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส (นุจรีย์ เตรัตน์, 2555)



ภาพที่ 14 การย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสด้วยด่าง

Figure 14 Alkali hydrolysis of cellulose.

ที่มา: Reilly (1980), Structure and Function of Mycothecium verrucaria for Fuel and Chemicals

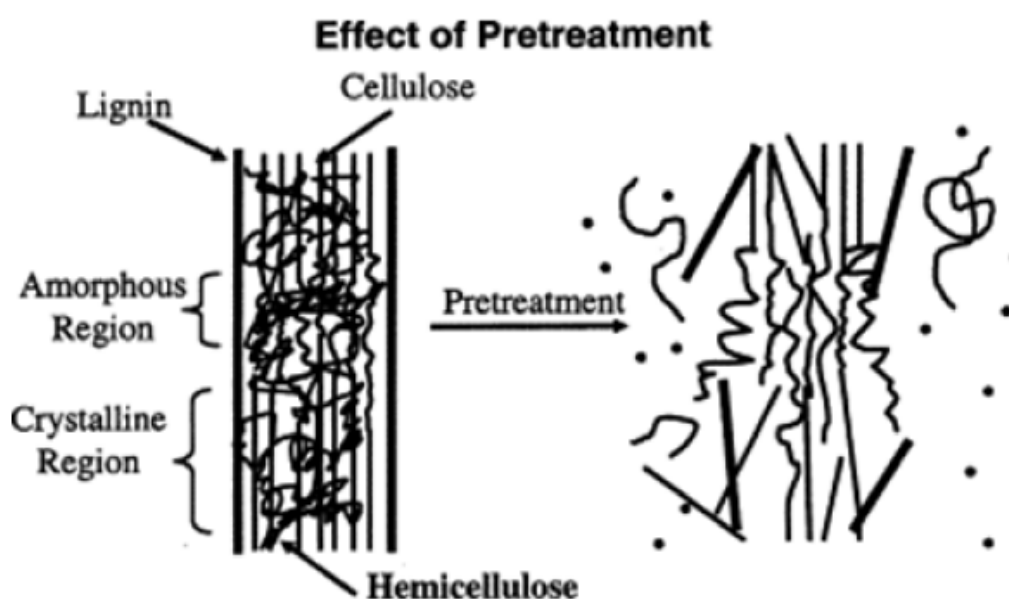
## 2.6. กระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion)

กระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ชนิด ที่ประกอบอยู่ในพืชหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ให้แยกออกจากกันแล้วนำแต่ละองค์ประกอบไปใช้ให้ประโยชน์ในการผลิตสารเคมีมูลค่าเพิ่ม เช่น เฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีน้ำตาลไซโลสเป็นองค์ประกอบหลักจะนำไปผลิตเป็นน้ำตาลไซลิทอล (Xylitol) และใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ ลิกนินที่ได้จากการแยกด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำก็จะสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบของสารเคมีในการผลิตกาวไม้ (Wood Adhesive) และองค์ประกอบสุดท้ายที่เป็น เซลลูโลสบริสุทธิ์จะนำไปผลิตพวกอนุพันธ์ของเซลลูโลส (Cellulose Derivative) เช่น คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (CMC) เป็นต้น ซึ่ง นำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

กระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำมีหลักการว่าจะใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง โดยปกติจะใช้อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 180 - 210°C ระยะเวลาในการระเบิดนานไม่เกิน 10 นาที ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไอน้ำ โดยไอน้ำจะไปละลายในส่วนของเฮมิ

เซลลูโลสออกมา ส่วนองค์ประกอบที่เหลือในส่วนของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะนำไปแยกออกจากกันภายหลังโดยใช้สารละลายเบสที่สามารถละลายลิกนินได้แต่ไม่ละลายเซลลูโลส

## 2.7. การปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment)



ภาพที่ 15 ผลของการปรับสภาพ

Figure 15 The result of pretreatment

ที่มา: <http://omicsonline.org/2157-7463/2157-7463-2-108.php>

การปรับสภาพวัตถุดิบมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดส่วนที่เป็นลิกนินออกและเป็นการปรับโครงสร้างของเซลลูโลสให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซิสและลดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกของเซลลูโลสและช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยามี 4 วิธี คือ

### 2.7.1 วิธีทางกายภาพ (Physical Pretreatment)

วิธีทางกายภาพเป็นการลดขนาดของวัตถุดิบหรือคือการเพิ่มพื้นที่เพื่อให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ข้างในถูกย่อยสลายได้มากขึ้นโดยการหั่น การสับ การทุบ หรือการบดด้วยลูกบอลหรือลูกกลิ้งจัดว่าเป็นวิธีการที่ให้ผลสำเร็จเป็นอย่างดีและมีต้นทุนต่ำและยังช่วยลดปริมาณ

การใช้เอนไซม์ในการช่วยย่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้เปลี่ยนไปเป็นกลูแคนและไซแลนในขั้นตอนต่อไปซึ่งจะเป็นการบดผลึกของเส้นใยที่ประกอบด้วยไมโครไฟบริลจำนวนมาก ซึ่งในแต่ละไมโครไฟบริลนั้นจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystallineregion) ให้แตกออกจากกันเพื่อที่จะให้สารละลายย่อยสลายได้ง่ายขึ้นรวมทั้งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุดิบทำให้สารละลายทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

### 2.7.2 วิธีทางเคมี (Chemical Pretreatment)

สารเคมีตั้งแต่พวก Oxidizing agents พวกกรดต่างๆ ไปจนกระทั่งถึงด่างหรือเกลือสามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ โดย สามารถทำภายใต้ความดันและอุณหภูมิปกติได้ ตัวอย่าง เช่น

- Alkaline treatment; sodium hydroxide, ammonia, ammonium sulfite
- Acid treatment; sulphuric acid, hydrochloric acid, phosphoric acid
- Gas treatment; chlorine dioxide, nitrogen dioxide, sulphur dioxide
- Addition of oxidizing agents; hydrogen peroxide, ozone
- Solvent extraction of lignin; ethanol-water extraction, benzene-water extraction,

Ethylene glycol extraction, butanol-water extraction, swelling agents

#### 1. การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยกรดจะสามารถในการแยกเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสได้ดี

- เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็น heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีน้ำตาลไซโลส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง  $\beta(1-4)$  เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส กาแล็กโทส หรือกลูโคส มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วยและมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนงได้แก่ น้ำตาลอะราบินอส กรดกลูคูโรนิก เฮมิเซลลูโลส จัดเป็นเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว สามารถละลายได้ในสารละลายกรดเจือจาง สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกเมื่ออยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์ เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ของพืชที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลสพบมาก ในผัก และผลไม้



- เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรต ( carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประเภท homopolysaccharide ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (glucose) มาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก จะไม่ละลายในกรดอ่อน เซลลูโลส 40-50 % ในผนังเซลล์พืช ลักษณะเป็นโพลิเมอร์สายตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา และเป็นโฮโมโพลิเมอร์ (homopolymer) ของ  $\beta$ -D-glucose ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glucoside linkage โดยมีค่า degree of polymerization อยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึงมากกว่า 10,000 เกาะรวมกันภายใน crystalline microfibrils เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลเรียงตัวเป็นมัดเรียกว่า fibril มีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกลูโคสที่อยู่ใกล้กันของเซลลูโลสสายหนึ่งกับเซลลูโลสอีกสายหนึ่งที่เชื่อมต่อกันเป็น fibril นอกจากนี้เซลลูโลสที่พบในทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ซึ่งจะมี ความทนต่อกรดได้มากกว่าเฮมิเซลลูโลส

## 2. การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยด่าง

การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยด่างจะสามารถแยกลิกนินได้ดีลิกนินเป็นคาร์โบไฮเดรต ประเภทใยอาหาร (Dietary fiber) ที่ไม่ให้พลังงาน โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโซ่โมเลกุลของออกซิเจนเตเตเพนนิลโรเพน (oxygenated phenyl propane) มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000-4,500 สังกะระห้จากอนุพันธ์ ของแอลกอฮอล์ ชนิดต่างๆ ได้แก่ คูมาริล โคนิเฟอร์ิล และไซนาพิล ไม่ละลายในกรดแก่แต่จะละลายในด่าง โดยลิกนินจะอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยลิกนินจะทำให้การย่อยของทั้งสองเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสน้อยลง

## 3. การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยน้ำ

การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยน้ำจะให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เป็นพวกโอลิโกแซคคาไรด์ ซึ่งโอลิโกแซคคาไรด์คือคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยมอนแซ็กคาไรด์ตั้งแต่ 2-10 โมเลกุล ซึ่งจะ มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก คาร์โบไฮเดรตในกลุ่มนี้คือ ซูโครส มอลโตส แล็กโตส กาแล็กโตไบโอส เมลิไบโอส ราฟฟิโนส และสตาคิโอส

#### 4. การใช้สาร Oxidant

การใช้สาร Oxidant สารเคมีที่ใช้ได้แก่  $\text{SO}^-$  ตัวทำละลายชนิดอื่นๆ ที่สามารถกำจัด ลิกนิน เช่น  $\text{NaClO}_2$ ,  $\text{KB}_2\text{O}_2$ ,  $\text{KIO}_3$ ,  $\text{SO}_3$  โดยจะมีผลต่อการละลายของลิกนิน

##### 2.7.3 วิธีทางเคมีฟิสิกส์ (Physico-Chemical Pretreatment)

เป็นการปรับสภาพวัตถุดิบโดยใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับการใช้สารเคมี เช่น การบด ร่วมกับวิธีการทางกายภาพ การรวมกันระหว่างวิธี chemical และ physical treatment ส่วนสำคัญในการละลายน้ำของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ถูกแปลงโครงสร้างแล้วเป็นผลทำให้การแตกตัวของ เซลลูโลสในขั้นตอน hydrolysis เพิ่มขึ้น Physicochemical pretreatment รวมถึง Thermochemical treatment เช่นวิธี steam explosion, ammonia fiber explosion,  $\text{CO}_2$  explosion,  $\text{SO}_2$  explosion

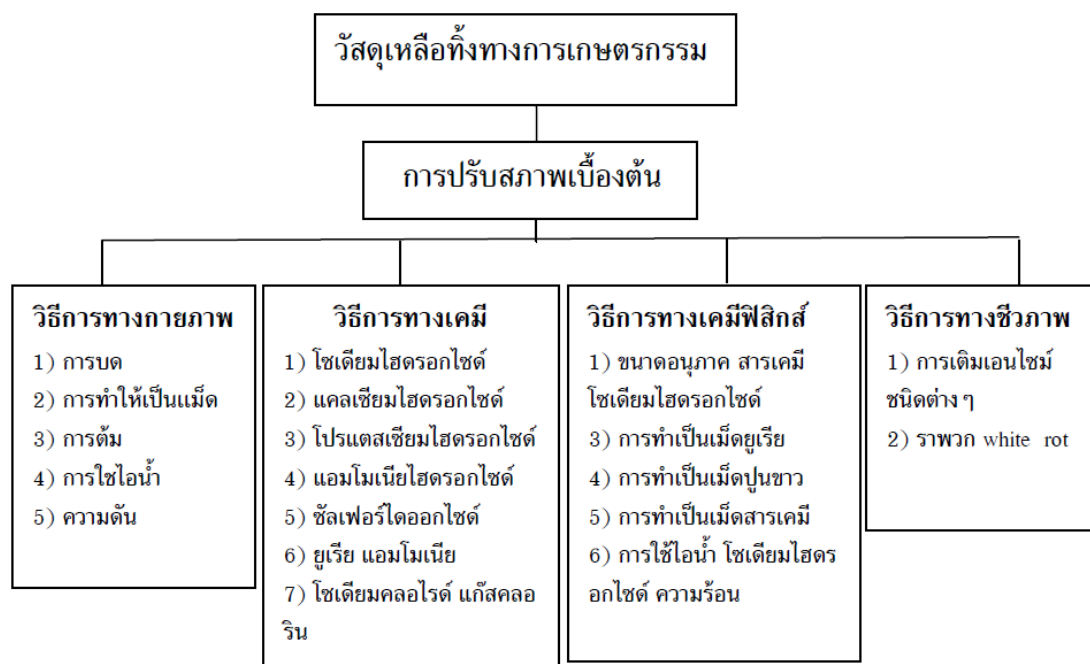
อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิระหว่าง 160-260°C กระทำภายใต้ความดัน 0.69-4.83 MPa ที่มีไอน้ำอิ่มตัว เป็นเวลาหลายวินาทีหรือ 2-3 นาทีก่อนที่จะปรับลดลงมาอยู่ที่ความดันปกติโดยวิธี wet oxidation pretreatment กระทำ ณ อุณหภูมิระหว่าง 200-210°C และมีการเติมด่างหรือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ร่วมด้วยซึ่งจะนำไปสู่การละลายที่ดีขึ้นของสารพวกลิกโนเซลลูโลส และทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า โดยการใช้เอนไซม์ต่างๆ ให้ผลดีขึ้น ส่วนวิธี Liquid hot water (LHW) pretreatment โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 170-230°C ความดัน 5 MPa นานหลายนาทีจึงปรับคืนสู่ความดันปกติ วิธีนี้ทำให้เฮมิเซลลูโลสในพวกลิกนินอ้อย, เส้นใยข้าวโพด, และพวงข้าวต่างๆ แตกตัวเป็นไซโลสได้ถึง 45-65%

Aguilar และคณะ (2002) ทำการปรับสภาพฟางข้าวโดยเปรียบเทียบวิธีทางกายภาพ โดยการบด และวิธีทางเคมีฟิสิกส์โดยการบดและแช่ในในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% (w/v) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าการใช้วิธีทางเคมีฟิสิกส์ในการปรับสภาพฟางข้าว ทำให้มีร้อยละความเข้มข้นของน้ำตาลเซลลูโลสสูงกว่าการใช้วิธีทางกายภาพเพียงอย่างเดียวคือ 0.557 และ 0.24 ตามลำดับ

##### 2.7.4 วิธีทางชีวภาพ (Biological Pretreatment)

เป็นการใช้เอนไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อทำการเปลี่ยนโครงสร้างที่ซับซ้อนของเซลลูโลสให้เปลี่ยนอยู่ในรูปไวต์ตรงและช่วยลดความเป็นผลึก เป็นการปรับสภาพที่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ชนิดต่างๆที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรารวมทั้งเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์เหล่านี้ เชื้อราทั้ง

ชนิดที่เป็น White-rot, brown-rod และชนิดที่เป็น soft-rot สามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ โดย brown-rod มีบทบาทสำคัญในการย่อยพวกเซลลูโลส ในขณะที่ white-rot และ soft-rot จะเข้าย่อยสลายพวกลิกนินและเฮมิเซลลูโลส



ภาพที่ 16 วิธีของการปรับสภาพ

Figure 16 The methods of pretreatment

## 2.8 หม้ออัดความดันไอน้ำแรงสูง (Autoclave)

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรค จุลินทรีย์ขนาดเล็ก โดยใช้ไอน้ำร้อนและอยู่ในระบบปิดเพื่อให้เกิดแรงดันอากาศสูง ทำให้เครื่องมืออุปกรณ์ ของที่ผ่านการอบไอน้ำที่ความดันสูงแล้วอยู่ในสภาพปราศจากเชื้อ จึงนิยมใช้เครื่องนี้ในการนึ่งฆ่าเชื้อของเสียทางชีวภาพเพื่อฆ่ากำจัดต้นตอของเชื้อโรค โดยเครื่อง Autoclave ยังสามารถใช้ทำความสะอาดภาชนะได้เป็นอย่างดี ก่อนจะนำมาใช้งานอีกครั้ง ส่วนการใช้งานเครื่อง Autoclave นั้น ควรมีการทดสอบเครื่องอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถใช้งานเครื่อง Autoclave หลักการของ Autoclave คือการนำสิ่งของที่ต้องการทำให้

ปราศจากเชื้อฆ่าเชื้อ วางลงในหม้อ autoclave ที่ให้ความร้อนและแรงดันของไอน้ำที่สูงกว่าสภาวะบรรยากาศปกติ ในระยะเวลาหนึ่งการนึ่งฆ่าเชื้อโดยทั่วไปจะใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 121-132°C แรงดันอากาศของไอน้ำที่ประมาณ 15 psi โดยใช้ระยะเวลาหนึ่ง 15-20 นาที

## 2.9. High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

หลักการทำงาน HPLC หรือโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงแยกสารเคมี ภายใต้ความดันของเหลว เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารเชิงคุณภาพวิเคราะห์ (qualitative analysis) และปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) ที่นิยมใช้มากวิธีหนึ่ง โดยสามารถใช้กับงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่นในการวิเคราะห์ทางอาหาร ยา ยาฆ่าแมลง ทางด้านการแพทย์ สมุนไพร และทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น สามารถตรวจวิเคราะห์ปริมาณต่างๆได้ในระดับไมโครกรัม ( $\mu\text{g}$ ) ถึงพิโคกรัม (pg) เมื่อเลือกใช้เครื่องตรวจวัดที่เหมาะสม HPLC เป็นเทคนิคแยกสารผสมแบบใช้เครื่องสูบล้างดันสูง (high pressure pump) สูบตัวทำละลายซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) พาสารตัวอย่างที่ถูกฉีดเข้าทางช่องฉีดสาร (injector) ผ่านอนุภาคที่เป็นเฟสอยู่กับที่ (stationary phase) บรรจุอยู่ในคอลัมน์ (column) สารผสมตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และถูกแยกออกมาผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจวัด (detector) ในเวลาที่แตกต่างกัน สัญญาณที่วัดได้จะอยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้าตามเวลาและปริมาณของสารแต่ละตัวที่ตรวจวัดได้จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณเพื่อแสดงผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม (chromatogram)

## 2.10. ก๊าซโครมาโทกราฟี (GC)

เป็นเทคนิคหนึ่งของการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครมาโทกราฟี ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะมีความสามารถแยกและวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีองค์ประกอบซับซ้อนได้และยังให้ผลที่เที่ยงตรง รวดเร็วกว่าลิควิดโครมาโทกราฟี ก๊าซโครมาโทกราฟี มีเทคนิคในการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของแข็ง เรียกว่า “gas-solid chromatography” (GSC) และ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลว เรียกว่า “gas-liquid chromatography” (GLC) ซึ่งทั้งสองวิธีมีเฟสเคลื่อนที่ได้เป็นก๊าซ เทคนิคทั้งสองถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยที่เทคนิคของ GLC เป็นที่นิยมกันมากกว่า ก๊าซโครมาโทกราฟีใช้ได้กับสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิของคอลัมน์ ที่เท่านั้น ดังนั้น

วิธีการของก๊าซโครมาโตกราฟีจึงเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น เพราะสามารถกลายเป็นไอได้ง่ายจะไม่ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี

หลักการของก๊าซโครมาโตกราฟีคือ เฟสเคลื่อนที่ต้องเป็นก๊าซ และสารตัวอย่างที่ได้ลงในคอลัมน์ต้องมีสภาพเป็น ไอตั้งแต่บริเวณสวนบนสุดของคอลัมน์ การอิดูทสารตัวอย่างออกจากคอลัมน์เกิดจากแรงพาของเฟสเคลื่อนที่ ซึ่งเรียกว่า ตัวพา (Carrier) สำหรับตัวพาต้องเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนหรือฮีเลียม อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของสารตัวอย่างในแต่ละชนิดในคอลัมน์ขึ้นอยู่กับอัตราการละลายของสารตัวอย่างนั้นๆ ในเฟสอยู่กับที่หรือขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของการกระจาย

## 2.11. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยา ปั้นสุวรรณ และคณะ (2001) การผลิตเชื้อที่มีแอลฟาเซลลูโลสสูงและไซโลสจากขานอ้อยโดยวิธีระเบิดด้วยไอน้ำ ได้ทำการศึกษากการแยกองค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อย คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยใช้ปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายกรดเจือจางแล้วตามด้วยปฏิกิริยากำจัดลิกนินด้วยสารละลายเบส ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ โดยนำขานอ้อยที่แช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางเป็นเวลา 1 คืน ไประเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลานาน 4 นาที ขานอ้อยที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำ จะถูกนำไปล้างในน้ำร้อน เพื่อให้ได้สารละลายเฮมิเซลลูโลส เชื้อขานอ้อยที่ล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะถูกนำไปกำจัดเอาลิกนินออกโดยต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 20% (w/v) ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 120 นาที ผลการทดลองพบว่าผลการคืนกลับของไซโลสและเชื้อแอลฟาเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 83% และ 30% ตามลำดับเทียบกับขานอ้อยวัตถุดิบ เชื้อขานอ้อยที่ได้ภายหลังจากกำจัดลิกนินถูกนำไปฟอกขาวจำนวน 2 ครั้งด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อผลิตเชื้อที่มีแอลฟาเซลลูโลสสูงต่อไป

วิทยา ปั้นสุวรรณ และคณะ (2000) ศึกษาไซโลสจากชังข้าวโพดโดยการระเบิดด้วยไอน้ำ ชังข้าวโพดซึ่งมีปริมาณไซแลนประกอบอยู่สูงจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางเป็นเวลา 1 คืน โดยทำในเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำจะได้น้ำตาลไซโลสเกิดขึ้น สารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ถูกนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยสารกัมมันต์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์คือ ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.4% (v/v) แช่ชังข้าวโพดหนึ่งคืน แล้วระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 180°C ระยะเวลา 4 นาที ได้น้ำตาลไซโลสมากกว่า 90% สารละลายน้ำตาลไซโลสที่ได้สามารถกำจัดสีและสารฟีนอลิกออกได้โดยใช้สารกัมมันต์

ศุภกิจ สอนประจักษ์ และคณะ (1995) ศึกษาการผลิตน้ำตาลไซโลสจากฟางข้าว โดยฟางข้าวพันธุ์ กข 23 ได้นำมาใช้ในการทดลองเพื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลาย ด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางเพื่อที่จะให้ได้น้ำตาลไซโลสซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไซลิทอลด้วย วิธีการหมัก การทดลองศึกษาถึงปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการย่อย 3 ปัจจัย คือความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (0.5, 1.0 และ 1.5% (w/v)) ปริมาณฟางข้าวที่ใช้ (2.5, 5.0 และ 7.5% (w/v)) และขนาดของฟางข้าว (1.0, 1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร) ซึ่งทุกสภาวะใช้เวลาในการย่อย 30 นาทีที่อุณหภูมิ 121°C โดยผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยคือการใช้ความเข้มข้นของกรด 0.5 % (w/v) ปริมาณฟางข้าว 7.5% (w/v) และขนาดของฟางที่ใช้ 2.0 มิลลิเมตร โดยได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลไซโลสเท่ากับ 11.97 g/l และพบว่าปัจจัยทั้งสามดังกล่าวมีผลต่อปริมาณน้ำตาลไซโลสที่ได้ โดยที่ความเข้มข้นของกรดกับปริมาณฟางข้าว และขนาดของฟางข้าวกับปริมาณฟางข้าวมีอิทธิพลร่วมกันในการย่อย แต่ความเข้มข้นของกรดกับขนาดฟางข้าวไม่มีอิทธิพลร่วมกัน จากสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการย่อยฟางข้าว 200 กรัม โดยแปรระยะเวลาเป็น 30, 60 และ 70 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลไซโลสที่ได้มีค่าเท่ากับ 3.77, 10.92 และ 12.49 g/l ตามลำดับ

พรวิภา ทองมิตร และคณะ (2012) ศึกษาการเพิ่มผลผลิตน้ำตาลไซโลสจากขานอ้อย ด้วยการย่อยสลายโดยการระเบิดด้วยไอน้ำร่วมกับกรดอะซิติก ก่อนนำมาทำการหมักเพื่อผลิตเอทานอล โดยนำขานอ้อยมาทำการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 และ 180°C ร่วมกับกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้น 6 ค่าตั้งแต่ 0 – 5% (w/v) เป็นเวลาตั้งแต่ 5 –40 นาที จากผลการทดลองพบว่าการย่อยสลายที่เหมาะสมคือ ทำการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 °C ร่วมกับกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้น 4% (w/v) เป็นเวลา 5 นาที สามารถผลิตน้ำตาลรวมได้สูงเท่ากับ 16.91 g/l โดยผลการวิเคราะห์ทั้งชนิดและปริมาณน้ำตาล 4 ประเภทคือ ไซโลส ฟรุกโทส กลูโคส และซูโครสด้วยเครื่อง HPLC พบว่าการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 และ 180°C จะได้ปริมาณน้ำตาลที่แตกต่างกันโดยที่อุณหภูมิ 120°C ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงสุดและที่อุณหภูมิ 180°C ได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสได้สูงสุด

พิชญา ภูมิภัทร และคณะ (2006) ศึกษาการเตรียมสารละลายไซโลสจากสารละลายที่ได้จากต้นปาล์มน้ำมันโดยการไฮโดรไลซิสด้วยเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ เมื่อย่อยสลายด้วยการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำของจีนไม้สับต้นปาล์มด้วยไอน้ำที่สภาวะความดัน 21 kg/cm<sup>2</sup> เวลา 2 นาที ของจีนไม้สับที่แช่และไม่ได้แช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก พบว่าในน้ำล้างเยื่อของการย่อยสลายที่ไม่แช่กรดจะได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสเท่ากับ 1.68% และเมื่อแช่กรดจะได้ไซโลส 9.32% เมื่อนำน้ำล้างเยื่อไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1% (w/v)

อุณหภูมิ 120°C เวลา 30 นาที เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลโอลิโกเมอร์ของไซโลสที่ประกอบอยู่ในน้ำล้างเชื้อ เป็นน้ำตาลไซโลส พบว่า น้ำล้างเชื้อของจีนไม้สับที่ไม่ได้แช่กรดก่อนการย่อยสลายด้วยระเบิดไอน้ำที่มีน้ำตาลไซโลสเพิ่มขึ้นจาก 1.68% เป็น 6.32% และน้ำล้างเชื้อที่มีการแช่กรดมีปริมาณน้ำตาลไซโลสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

Kim และคณะ (2012) ศึกษากระบวนการปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าด้วยกรดซัลฟิวริกและด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางก่อนแล้วตามด้วยด่างซึ่งกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในขั้นตอนแรกจะกำจัด 90% ของเฮมิเซลลูโลสและ 32% ของลิกนินองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เหลือเป็นเซลลูโลสในการปรับสภาพ และในขั้นตอนที่สองได้ทำการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถสกัดลิกนินได้อย่างมีประสิทธิภาพมีคือ delignification 70% โดยการปรับสภาพตามลำดับนั้นจะได้เซลลูโลส 82% เฮมิเซลลูโลสน้อยกว่า 1% และลิกนิน 30% ซึ่งการปรับสภาพชีวมวลนั้นมีความเป็นรูพรุนนั้นมีผลต่อการย่อยเพิ่มขึ้น

Zhang และคณะ (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการย่อยสลายกรดเจือจางของปาล์มน้ำมันสำหรับการผลิตไซโลส โดยต้นทุนที่มีประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซิสพวกกลีโคเซลลูโลสที่ระดับความเข้มข้นของกรดต่ำๆเพื่อที่จะให้ได้ผลผลิตของน้ำตาลที่สูงเป็นที่น่าสนใจ โดยทะลายปาล์มเปล่าจะถูกไฮโดรไลซิส โดยใช้กรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้น <math>< 1\% \text{ (w/v)}</math> การทำนายโดยใช้โมเดลจะได้ไซโลส 80-90% เมื่อทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 140-160°C อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลว 10-20 ml/g ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.25-0.5% (w/v) และความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ 0.1-0.2% (w/v) แต่ผลที่ได้จากการทดลองคือความเข้มข้นของไซโลสที่สูงที่สุดคือ 91.3% เมื่อทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลานาน 10 นาที อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลว 20 ml/g ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.5% (w/v) และความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ใช้ 0.2% (w/v) ที่ขนาดของทะลายปาล์ม 2 มิลลิเมตร

Cai และคณะ (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับสภาพซังข้าวโพดด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อผลิตไซโลสและการผลิตเอทานอล เนื่องจากลิกโนเซลลูโลสเหมาะสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงและสารเคมีมากขึ้นเพราะว่าวัสดุที่ใช้มีค่าใช้จ่ายต่ำและเหมาะที่จะเป็นแหล่งที่ใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำตาล โดยซังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบที่นิยมใช้ในการศึกษาไซโลสและการผลิตเอทานอลจากในซังข้าวโพดมีปริมาณของไซแลนและกลูแคนที่สูง ซึ่งจะออกแบบการทดลองโดยใช้ response surface method ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในการปรับสภาพคือ 0.16-1.84% (w/v) เวลา 0.16-1.84 ชั่วโมง ดำเนินการที่อุณหภูมิ 105-130°C ผลการศึกษาพบว่าเงื่อนไขในการปรับ

สภาพที่ใช้การผลิตไซโลสสูงสุดคือกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1% (w/v) เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 123°C ที่เปอร์เซ็นต์ของไซเลนที่ได้รวม 87.2

Mohamad และคณะ (2011) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตน้ำตาลไซโลสจากลำต้นของสาเกโดยใช้วิธีการย่อยสลายด้วยกรด โดยเปลือกนอกของลำต้นสาเกนั้นเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์มากมายเช่นไซโลสและไซลิตอล การทดลองนี้ศึกษาความแตกต่างของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกและเวลาการย่อยสลายในการผลิตของไซโลสจากเปลือกสาเก จะออกแบบการทดลองที่ศึกษาโดยใช้โปรแกรม Response surface methodology (RSM) ผลที่ได้สภาวะที่เหมาะสมคือ ไซ้เข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 8% (w/v) เป็นเวลา 60 นาที โดยจะได้ความเข้มข้นของไซโลสที่สูงที่สุดคือ 22.78 g/L

Binyirasli (2010) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำตาลไซโลสจากชานอ้อยโดยใช้วิธี Response surface methodology (RSM) การผลิตไซโลสจากชานอ้อยช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายกระบวนการทางชีวภาพ โดยจุดมุ่งหมายของการศึกษานี้คือการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลไซโลสจากชานอ้อยโดยศึกษาอุณหภูมิ อัตราการกวน และความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้ ทำการปรับสภาพชานอ้อยโดยใช้กรดและด่างหลังจากนั้นนำมาย่อยด้วยเอนไซม์ จะได้สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิที่ใช้ 50°C อัตราการกวน 180 รอบต่อนาที และความเข้มข้นเอนไซม์ที่ใช้คือ 2 mg/ml ได้ความเข้มข้นของไซโลส 0.367 mg/ml

Jose และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตไซโลสจากชานอ้อยโดยใช้วิธี surface response methodology ซึ่งจะใช้กรดซัลฟิวริกในการไฮโดรไลซิส มีสภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิ 111.5, 114.0, 120.0, 126.0 และ 128.5 °C ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.20, 0.70, 1.90, 3.10 และ 3.60% (v/v) และเวลาที่ใช้ก็คือ 18, 30 และ 50 นาที จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกจะมีอิทธิพลมากกว่าอุณหภูมิ แต่ที่ระดับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกสูงกว่า 3.10% (v/v) การเพิ่มอุณหภูมิมิมีผลต่อปริมาณของไซโลสที่ได้โดยสภาวะที่ดีที่สุดจะได้ปริมาณของไซโลสเท่ากับ 266.73 มิลลิกรัมของชานอ้อยแห้ง ต้องใช้เวลาในการไฮโดรไลซิส 18 นาที ที่อุณหภูมิ 126°C และความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 3.10% (v/v) ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 96.0% ของทฤษฎี

Rahman และคณะ (2006) ศึกษาการผลิตน้ำตาลไซโลสจากทะลายปาล์มเปล่าโดยการไฮโดรไลซิส มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อตรวจสอบผลของอุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไซโลส และความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 120°C เวลา 0-90 นาที และ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 2-6% (w/v) ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไซโลสมากที่สุดคืออุณหภูมิ 120°C ใช้เวลา 15 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 6% (w/v) ได้



ความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไซโลส กลูโคส เฟอร์ฟูรัล และกรดอะซิติกที่พบในการย่อยเป็น 29.4, 2.34, 0.87 และ 1.25 g/L ตามลำดับ

Rahman และคณะ (2007) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยกรดของ ทะลายปาล์มเปล่าสำหรับการผลิตไซโลส โดยทะลายปาล์มเปล่าเป็นแหล่งที่มีไซโลสซึ่งสามารถ นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไซลิตอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตรวจสอบผลของอุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไซโลส และความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริก โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 100-130°C เวลา 30-90 นาที และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 2-6% (w/v) ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไซโลสมากที่สุดคือ อุณหภูมิ 119°C ใช้เวลา 60 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 2% ได้ไซโลสมา 91.27%

Yunus และคณะ (2010) ศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพแบบอัลตราโซนิกของ ทะลายปาล์มเปล่าเมื่อมีการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการย่อยที่อุณหภูมิต่ำศึกษาโดยใช้ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกคือ 2% (w/v) มีอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่ 1:25 และกระทำที่ อุณหภูมิ 100°C จะได้ไซโลสสูงสุดที่ 58% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้มีการปรับสภาพแบบอัลตรา โซนิกจะได้ไซโลสมากที่สุดแค่ 22%

## บทที่ 3

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ

##### 1. วัสดุดิบ

ทะเลาะปาล์มเปล่าในเขตพื้นที่ อำเภอ ห้วยยอด จังหวัด ตรัง

##### 2. สารเคมี

2.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (lab grade)

2.2 สารละลายกรดซัลฟูริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (lab grade)

2.3 สารเคมีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

2.4 สารเคมีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสโดยใช้

เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)

2.5 สารเคมีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณกรดอะซิดิกโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

#### 3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (weighing machine)
2. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath)
3. เครื่องให้ความร้อน (Heater)
4. โถดูดความชื้น (desiccator)
5. ตู้อบ (oven)
6. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อด้วยความดันไอน้ำ (autoclave)
7. เครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion)
8. ชุดกรองแบบสุญญากาศ (suction vacuum)

9. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง  
(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)
10. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)
11. อุปกรณ์เครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์

### 3.3 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 กิจกิจกรรมหลัก คือ การหากรดที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส ขั้นตอนการปรับสภาพวัตถุดิบ (pretreatment) ขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบในวัตถุดิบ และขั้นตอนในการย่อย (hydrolysis) โดยมีกิจกรรมย่อยและมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

#### กิจกรรมที่ 1 ขั้นตอนในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส

##### กิจกรรมที่ 1.1 ขั้นตอนในการหากรดที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส

ชั่งทะเลสาปาล์มที่ผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดจากนั้นนำมาตัดและอบจนแห้งแล้วปริมาณ 10 กรัม ใส่ในขวด Duran ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมความเข้มข้น 2% (v/v) ของกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดอะซิติก ( $C_2H_4O_2$ ) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้น นำตัวอย่างที่ได้กรองเพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวออกจากกัน ส่วนที่เป็นเหลว ร่องด้วย Membrane Filter ขนาด 0.22 ไมครอน กรองใส่ขวด Vial สำหรับการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและกลูโคสโดยใช้เครื่อง HPLC

ตารางที่ 3 ชนิดของกรดที่จะทำการทดลอง

Table 3 Types of acid for experiments.

กรด	xylose (g/l)	glucose (g/l)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		
HCl		
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>		

กิจกรรมที่ 1.2 ขั้นตอนในการหาอุณหภูมิ เวลา ความเข้มข้นของกรดและวิธีให้ความร้อนที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส

ซึ่งทะลายปาล์มที่ผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดจากนั้นนำมาตัดและอบจนแห้งแล้วปริมาณทะลายปาล์มที่ใช้ 50-125 กรัม ใส่ในขวด Duran ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมความเข้มข้น 2-10% (v/v) ของกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 110-130°C เป็นเวลา 20-120 นาที หลังจาก กรองเพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวออกจากกัน ส่วนที่เป็นเหลวกรองด้วย Membrane Filter ขนาด 0.22 ไมครอน กรองใส่ขวด Vial สำหรับการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและกลูโคสโดยใช้เครื่อง HPLC

ตารางที่ 4 ช่วงของอุณหภูมิที่จะใช้ในการทดลอง

Table 4 Range of temperature for experiments.

อุณหภูมิ (°C)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
110		
115		
120		
125		
130		

ตารางที่ 5 ช่วงของเวลาที่จะใช้ในการทดลอง

Table 5 Range of time for experiments.

เวลา (°C)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
20		
40		
60		
90		
120		

ตารางที่ 6 ช่วงของความเข้มข้นกรดที่จะใช้ในการทดลอง

Table 6 Range of acid concentration for experiments.

ความเข้มข้นของกรด (v/v)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
2		
4		
6		
8		
10		

ตารางที่ 7 ปริมาณละลายปาล์มที่จะใช้ในการทดลอง

Table 7 Amount of OPEFB for experiments.

ปริมาณละลายปาล์มที่ใช้ (g/l)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
50		
75		
100		
125		

ตารางที่ 8 เครื่องมือจะใช้ในการทดลอง

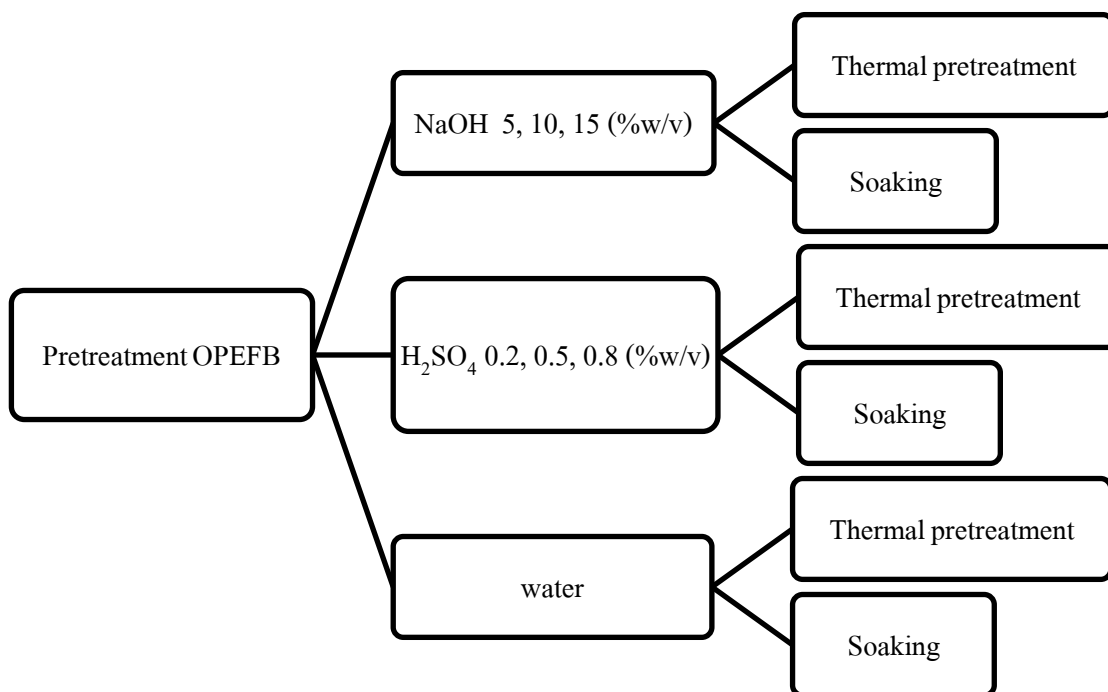
Table 8 Equipment for experiments.

วิธีให้ความร้อนในการไฮโดรไลซิส	xylose (g/l)	glucose (g/l)
Oil bath		
Hot plate		
Autoclave		

## กิจกรรมที่ 2 ขั้นตอนการปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment)

### กิจกรรมที่ 2.1 ปรับสภาพวัตถุดิบแบบ 1-step

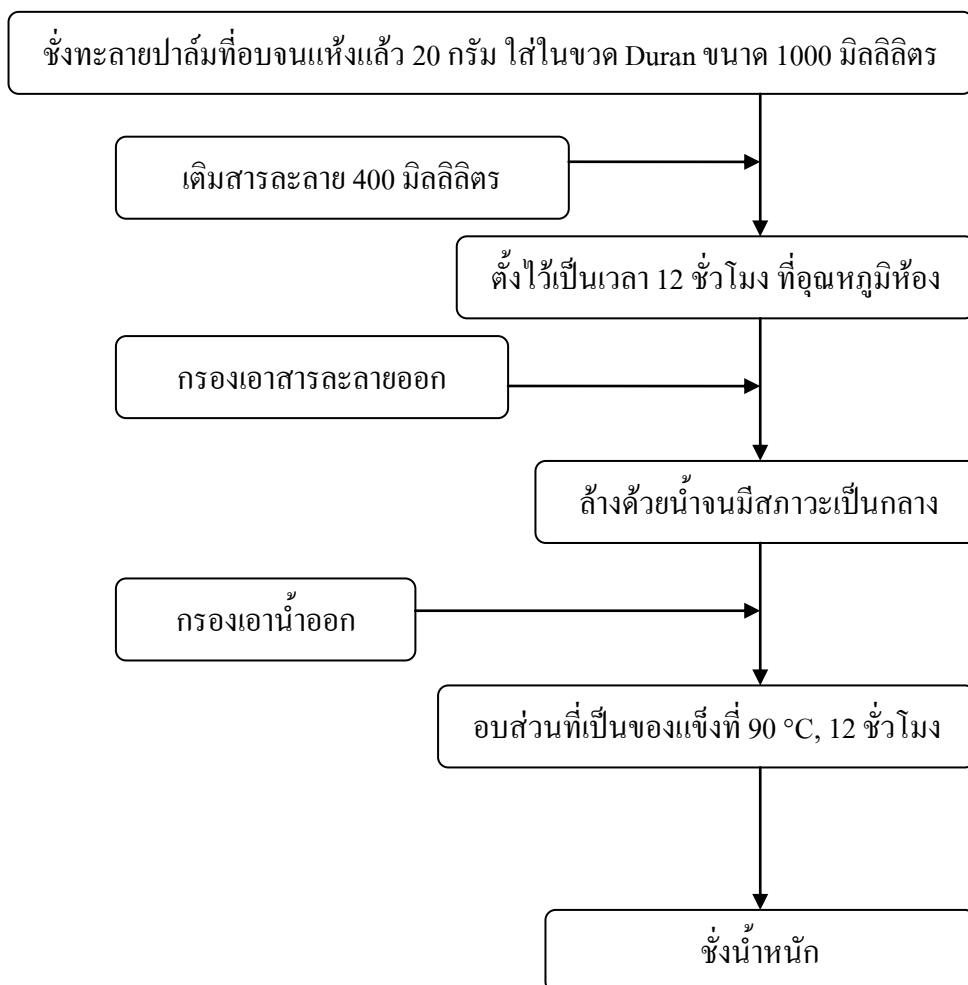
ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5, 10, 15% (w/v) กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ความเข้มข้น 0.2, 0.5, 0.8% (w/v) และน้ำกลั่น ทำการการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธีการแช่ (soaking) และวิธีใช้ความร้อน (thermal pretreatment) 121°C เป็นเวลา 20 นาที



ภาพที่ 17 ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบ 1-step

Figure 17 1-Step pretreatment method

### 2.1.1 การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธีการแช่ (soaking)



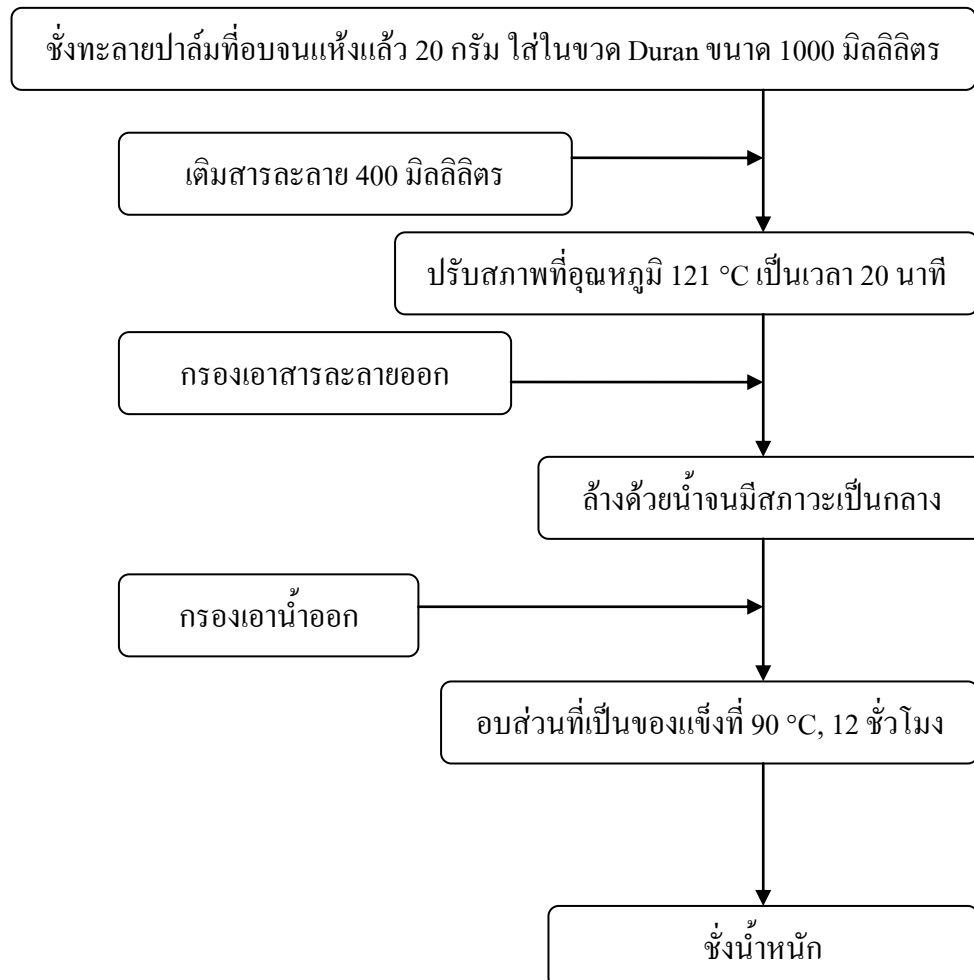
ภาพที่ 18 ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบวิธีการแช่

Figure 18 Soaking pretreatment method



### 2.1.1 การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธีการใช้ความร้อน (thermal pretreatment)

ด้วยเครื่อง autoclave

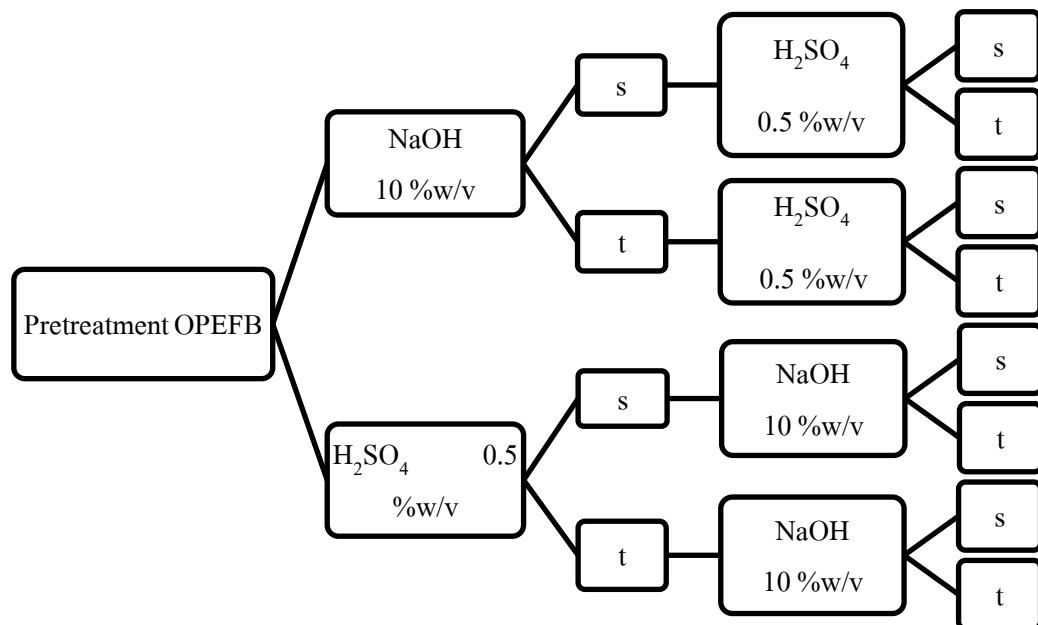


ภาพที่ 19 ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบการใช้ความร้อน

Figure 19 Thermal pretreatment method

\*\*\*หมายเหตุ การปรับสภาพด้วย NaOH ต้องวางที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วกรองเอา NaOH ออกก่อนแล้วค่อยนำส่วนที่เป็นของแข็งปรับสภาพด้วยเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 20 นาที

กิจกรรมที่ 2.2 ศึกษาผลของการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธี two-step โดยใช้กรดซัลฟิวริก (0.5% w/v) ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (10% w/v) ในการปรับสภาพ



ภาพที่ 20 ขั้นตอนปรับสภาพวัตถุดิบแบบ 2-step

Figure 20 2-Step pretreatment method

\*\*\*หมายเหตุ การปรับสภาพแบบ two-step ใช้วิธีเดียวกับ 1-step โดยหลังจากอบแห้งแล้วในขั้นตอนสุดท้ายก็จะปรับสภาพแบบ 1-step อีกรอบด้วยสารเคมีอีกตัว

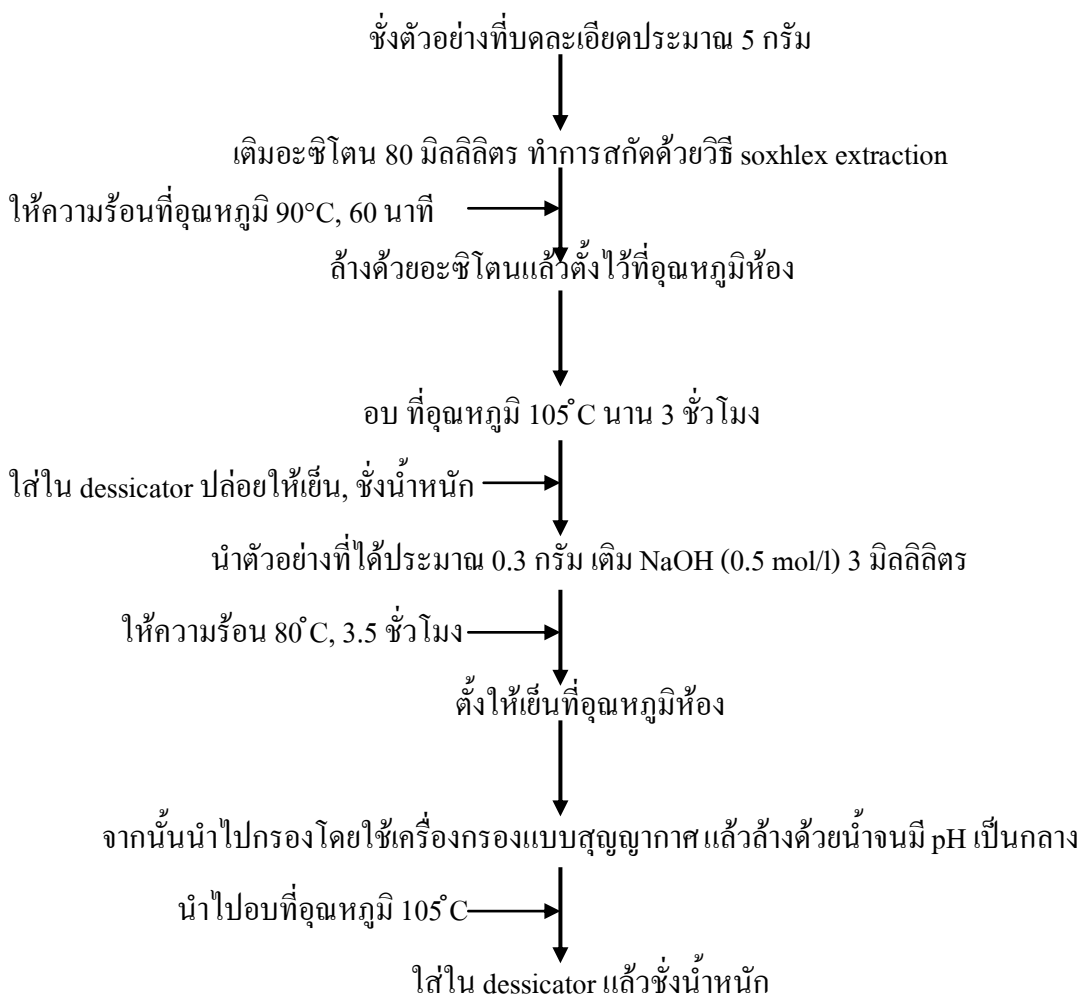
s = soaking

t = thermal pretreatment

### กิจกรรมที่ 3 การวิเคราะห์หาเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน

ตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักแล้วทุกการปรับสภาพนำมาบดด้วย Hammer mill ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์หาเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน

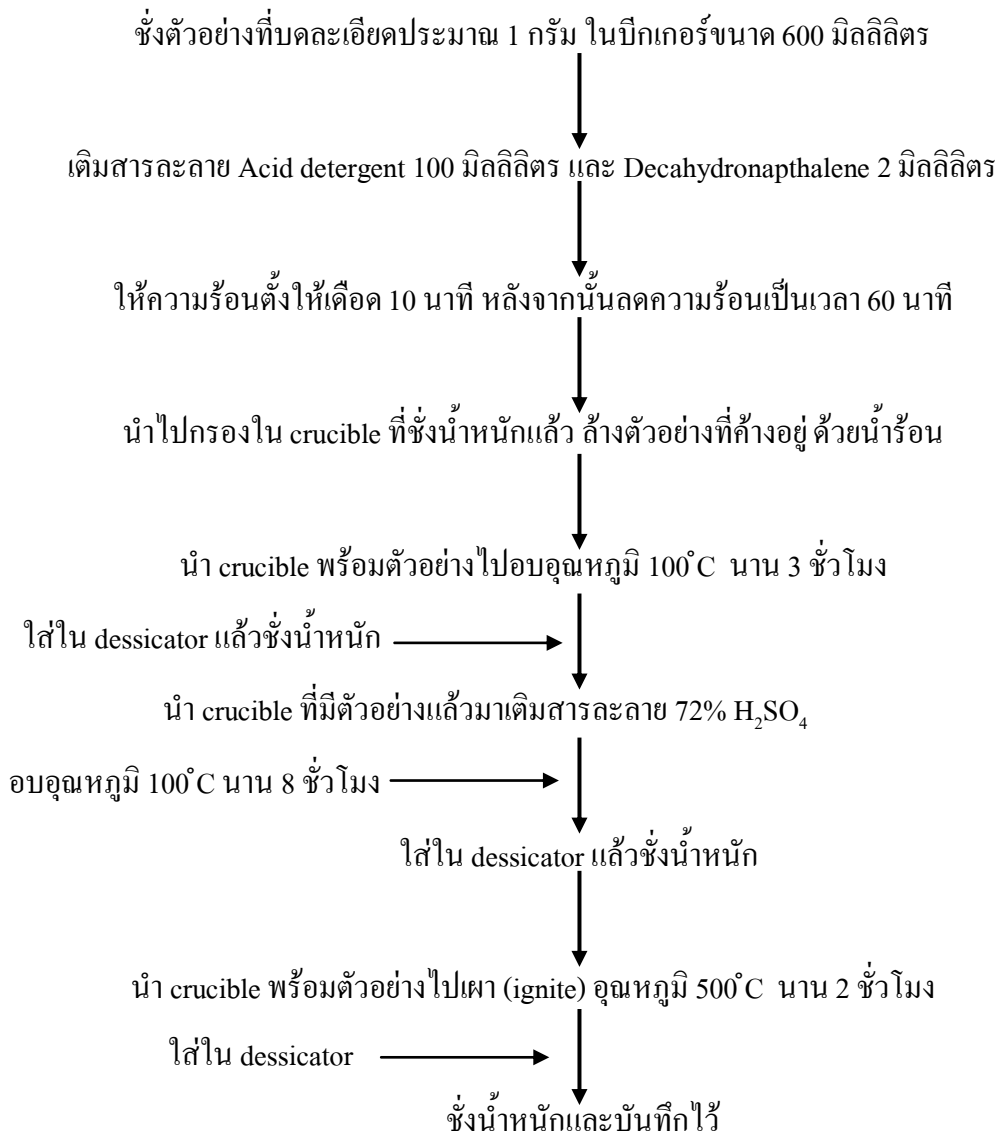
#### วิธีวิเคราะห์ปริมาณเฮมิเซลลูโลส



ภาพที่ 21 วิธีวิเคราะห์ปริมาณเฮมิเซลลูโลส

Figure 21 Hemicellulose method

### วิธีวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน



ภาพที่ 22 วิธีวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน

Figure 22 Cellulose and lignin method

#### กิจกรรมที่ 4 ขั้นตอนในการย่อย (Hydrolysis)

ทำการศึกษาโดยนำวัตถุดิบที่ไม่มีการปรับสภาพและที่มีการปรับแบบต่างๆ มาทำการไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางที่ความเข้มข้น 2-10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที เพื่อวิเคราะห์หาน้ำตาลไซโลส น้ำตาลกลูโคส และกรดอะซิติก

ตารางที่ 9 การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยน้ำ กรด และด่าง ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Table 9 Different Physiochemical Methods pretreatment with water, sulfuric acid and sodium hydroxide solution at various conditions.

การปรับสภาพ	Hydrolysis with H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	2%	6%	10%
non-pre			
Water (s)			
Water (t)			
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)			
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)			
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)			
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)			
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)			
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)			
5% NaOH (s)			
10% NaOH (s)			
15% NaOH (s)			
5% NaOH (t)			
10% NaOH (t)			
15% NaOH (t)			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (s)			
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (t)			

ตารางที่ 9 (ต่อ)

การปรับสภาพ	Hydrolysis with H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	2%	6%	10%
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (t)			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (s)			
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)			
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)			
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>			

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของทะเลสาบปลาต้ม

จากการศึกษาองค์ประกอบของทะเลสาบปลาต้มเปล่าที่ไม่มีการปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมี แต่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการทางกายภาพโดยการนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรง 24 เมช เพื่อทำการคัดขนาดให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน พบว่ามีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และ ลิกนินที่ได้จากการทำการทดลองคือ 20.71 49.95 และ 9.33% ( w/w) ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ งานวิจัยของ Umikalson และคณะ (1997) ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 องค์ประกอบของทะเลสาบปลาต้มที่ไม่มีการปรับสภาพ

Table 10 Component in untreated OPEFB

องค์ประกอบของทะเลสาบปลาต้มเปล่า % (w/w)	งานวิจัยนี้	Umikalson และคณะ (1997)
เฮมิเซลลูโลส	20.71	21.90
เซลลูโลส	49.95	50.40
ลิกนิน	9.33	10.00

เมื่อทำการเปรียบเทียบวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของทะเลสาบปลาต้มกับ วัตถุประสงค์เหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่นจะเห็นได้ว่า ทะเลสาบปลาต้มเปล่ามีปริมาณขององค์ประกอบ ทั้งสองที่ค่อนข้างสูงและที่สำคัญมีปริมาณลิกนินน้อยจะมีประโยชน์ในการไฮโดรไลซิสซึ่งจะช่วยให้ได้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 10 โดยเฮมิเซลลูโลสเมื่อทำการ ไฮโดรไลซิสจะได้ไซโลส ส่วนเซลลูโลสเมื่อทำการไฮโดรไลซิสจะได้กลูโคส จากเหตุผลดังกล่าว พบว่าทะเลสาบปลาต้มเป็นวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาน้ำตาลไซโลส ซึ่งจะส่งผลให้ได้ ปริมาณของน้ำตาลไซโลสที่สูง

ตารางที่ 11 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในทะลายปาล์มเปล่าและพืชอื่นๆ

Table 11 Cellulose hemicellulose and lignin contents in oil palm empty fruit bunch and others crop

ผู้วิจัย	วัสดุ		Hemicellulose	Cellulose	Lignin
			(%w)	(%w)	(%w)
กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน (2010)	เหง้ามัน		11.41	82.14	6.45
	สับปะรด	ลำต้น	15.50	16.10	-
		ใบ	22.20	20.80	-
	ยอดอ้อย		24.45	17.17	-
Umikalson และคณะ (1997)	ทะลายปาล์มเปล่า		21.90	50.40	10.00
Zhn และคณะ (2005)	ฟางข้าว		19.70	38.60	13.60
Zhn และคณะ (2006)	ซังข้าวโพด		25.80	41.20	21.30
Shatalov และคณะ (2012)	ต้นกก		25.61	33.85	24.02
Mohamad และคณะ (2011)	ลำต้นสาकु		21.09	44.13	23.30
Binti Rasli และคณะ (2010)	ชานอ้อย		24.00	40.00	25.00
Ganguly และคณะ (2012)	ผักตบชวา		33.80	35.00	15.50



## 4.2. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส

### 4.2.1 ผลของชนิดของกรดที่ใช้

เป็นการออกการทดลองโดยใช้กรดชนิดต่างๆ ( $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$ ,  $HCl$  และ  $C_2H_4O_2$ ) ที่นิยมใช้ในการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  เป็นเวลา 60 นาที ใช้ทะลายปาล์มเปล่า 1 กรัมต่อสารละลายกรด 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของกรดที่ใช้คือ 2% (v/v) จะพบว่าปริมาณของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกจะได้ปริมาณไซโลสที่มากที่สุดคือ  $31.40 \pm 0.41$  g/l รองลงมาคือ กรดไฮโดรคลอริก  $28.99 \pm 0.73$  g/l ดังแสดงในตารางที่ 11

เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดได้ดีในกรดแก่และเบสแก่ โดยการแตกตัว จะแตกตัวได้หมด 100% เป็นไอออนได้หมดในตัวทำละลายซึ่งเป็นน้ำ ในงานวิจัยนี้มีกรดแก่ 2 ตัว คือ  $H_2SO_4$  และ  $HCl$  ส่วน  $H_3PO_4$  และ  $C_2H_4O_2$  เป็นกรดอ่อนจะแตกตัวเป็นไอออนได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ในทางเคมีการไฮโดรไลซิสด้วยกรดหมายถึงกระบวนการที่ใช้โปรตอน (H) ของกรดในการกระตุ้นให้โมเลกุลขนาดใหญ่แตกพันธะเคมีออก เมื่อเปรียบเทียบกับกรดแก่  $H_2SO_4$  และ  $HCl$  จะพบว่ากรด  $H_2SO_4$  มีโปรตอนสองตัวส่วนกรด  $HCl$  มีโปรตอนแค่ตัวเดียว

ตารางที่ 11 ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสโดยใช้กรดที่แตกต่างกันในการไฮโดรไลซิส

Table 11 The results of xylose with various acid for hydrolysis.

กรด	xylose (g/l)
$H_2SO_4$	$31.40 \pm 0.41$
$H_3PO_4$	$0.07 \pm 0.27$
$HCl$	$28.99 \pm 0.73$
$C_2H_4O_2$	$0.15 \pm 0.03$

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิ

ตารางที่ 12 จะแสดงข้อมูลของปริมาณน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 110-130°C เป็นเวลา 60 นาที ใช้ละลายปาล์มเปล่า 1 กรัมต่อสารละลายกรด 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้คือ 6% (v/v) พบว่าปริมาณของน้ำตาลไซโลสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเมื่อมีการเพิ่มการอุณหภูมิเรื่อยๆ จนถึงที่ 120°C ปริมาณของน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสก็มีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสเกิน 120°C ปริมาณของน้ำตาลก็ลดน้อยลง อันเนื่องมาจากโครงสร้างของน้ำตาลได้เปลี่ยนไปเป็นสารประกอบชนิดอื่น

Cellulose » Glucan » Glucose » HMF » Formic acid, Levulinic acid

Hemicellulose » Xylan » Xylose » Furfural » Formic acid

» Mannan » Mannose » HMF » Formic acid, Levulinic acid

» Acetyl groups » Acetic acid

Lignin » Phenolic compounds

โดยปริมาณของน้ำตาลไซโลสสูงสุด  $39.298 \pm 1.23$  g/l และปริมาณของน้ำตาลกลูโคสสูงสุด  $2.854 \pm 0.20$  g/l ที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 120°C

ตารางที่ 13 ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส

Table 13 The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various temperature.

อุณหภูมิ (°C)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
110	$21.124 \pm 0.91$	$0.267 \pm 0.31$
115	$34.376 \pm 0.58$	$2.836 \pm 0.54$
120	$39.298 \pm 1.23$	$2.854 \pm 0.20$
125	$26.037 \pm 1.98$	$1.567 \pm 1.86$
130	$18.677 \pm 0.66$	$1.245 \pm 2.00$

#### 4.2.3 ผลของเวลา

อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสมีผลต่อปริมาณน้ำตาลไซโลสและกลูโคส โดยในตารางที่ 13 แสดงผลของการไฮโดรไลซิสน้ำตาลทั้งสองที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20-120 นาที ใช้ทะเลาะปาล์มเปล่า 1 กรัมต่อสารละลายกรด 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้คือ 6% (v/v) จะพบว่าปริมาณน้ำตาลไซโลสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ในช่วง 20 ถึง 120 นาที แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซิสมากกว่า 60 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลไซโลสจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็นเพราะเกิดสารประกอบอื่นๆ เช่น เฟอร์ฟิวรอล และสารประกอบฟีนอลิก โดยปริมาณของสารประกอบดังกล่าวนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการไฮโดรไลซิส ซึ่งในงานวิจัยของ Rahman และคณะ (2007) ได้กล่าวไว้ว่าความเข้มข้นของกรดกับระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสมีผลต่อการเกิดสารประกอบดังกล่าว และจากงานวิจัยของ Ria Milati และคณะ (2011) ทำการไฮโดรไลซิสทะเลาะปาล์มเปล่าด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.8%(v/v) ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงสุดที่อุณหภูมิ 230°C เกิดเฟอร์ฟิวรอลและกรดอะซิติกมากที่สุดที่อุณหภูมิ 210°C และเกิด HMF มากที่สุดที่อุณหภูมิ 230°C เมื่อเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซิสจะส่งผลให้ปริมาณไซโลสและกลูโคสที่ได้น้อยลง และในกลับกันปริมาณของเฟอร์ฟิวรอล กรดอะซิติก และ HMF จะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสคือ 20 นาทีจะได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสสูงสุด 35.566±2.01 g/l

ตารางที่ 14 ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส

Table 14 The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various reaction time.

เวลา (min)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
20	35.566±2.01	2.097±0.96
40	30.352±0.43	3.046±0.26
60	34.008±1.87	2.365±0.57
90	19.162±0.26	1.846±1.48
120	14.376±0.46	0.276±2.86

#### 4.2.4 ผลของความเข้มข้นของกรด

อิทธิพลของความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกมีผลต่อปริมาณน้ำตาลไซโลสและกลูโคส โดยทำการไฮโดรไลซิสอุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20 นาที ใช้ละลายปาล์มเปล่า 1 กรัมต่อสารละลายกรด 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้คือ 2-10% (v/v) ดังแสดงผลในตารางที่ 14 โดยพบว่าปริมาณน้ำตาลไซโลสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกลดลงจาก 2 ถึง 10% (v/v) จะได้ว่าปริมาณน้ำตาลไซโลสมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของกรดที่มากขึ้นไป โดยปริมาณความเข้มข้นของกรดที่มากจะทำลายโครงสร้างของน้ำตาล เป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลของน้ำตาลทั้งหมด เกิดเป็นสารประกอบ เช่น อนุพันธ์ของฟูแรน เฟอร์-ฟิวรอล 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรอล และสารประกอบฟีนอลิก โดยดึงโมเลกุลของไฮโดรเจน และออกซิเจนออกจากโมเลกุลของน้ำตาล Rahman และคณะ (2007) จึงทำให้ปริมาณน้ำตาลไซโลสลดลง ดังนั้นที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 6% (v/v) จะได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสสูงสุด 31.011±0.79 g/l

ตารางที่ 15 ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของความเข้มข้นกรดที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส

Table 15 The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various concentration acid.

ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ (v/v)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
2	22.409±0.35	3.618±1.26
4	30.264±0.47	4.095±0.68
6	31.011±0.79	2.365±0.04
8	27.081±0.41	1.245±0.82
10	24.098±1.83	1.127±0.44

#### 4.2.5 ผลของปริมาณละลายปาล์ม

อิทธิพลของปริมาณละลายปาล์มที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสมีผลต่อปริมาณน้ำตาลไซโลสและกลูโคส โดยทำการไฮโดรไลซิสอุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้คือ 6% (v/v) ใช้ละลายปาล์มเปล่า 50-125 กรัมต่อสารละลายกรด 1 ลิตร ดังแสดงผลในตารางที่ 15 พบว่า ปริมาณน้ำตาลไซโลสจะลดลงเมื่อปริมาณละลายปาล์มที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50 ถึง 125 g/l โดยการเพิ่มปริมาณของละลายปาล์มส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลที่ได้จะเนื่องจากละลายปาล์มมีการอัดแน่นจนเกินไปในขวดที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส ทำให้กรดไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง โดยที่ปริมาณละลายปาล์ม 50 g/l จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยสกัดน้ำตาลไซโลสได้สูงที่สุดที่  $25.092 \pm 0.28$  g/l

ตารางที่ 16 ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสในช่วงของปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส

Table 16 The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various amount of OPEFB.

ปริมาณละลายปาล์มที่ใช้ (g/l)	xylose (g/l)	glucose (g/l)
50	$25.092 \pm 0.28$	$3.568 \pm 1.48$
75	$20.046 \pm 0.62$	$3.098 \pm 0.26$
100	$19.248 \pm 1.63$	$2.357 \pm 0.09$
125	$17.387 \pm 0.45$	$1.129 \pm 2.46$

#### 4.2.6 ผลของเครื่องมือที่ให้ความร้อน

เครื่องมือที่ให้ความร้อนในการไฮโดรไลซิสมีผลต่อปริมาณน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสที่ได้ โดยทำการ ไฮโดรไลซิสอุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้คือ 6% (v/v) ใช้ละลายปาล์มเปล่า 1 กรัมต่อสารละลายกรด 20 มิลลิลิตร ทำการไฮโดรไลซิสด้วย oil bath, autoclave และ hot plate แสดงผลในตารางที่ 16 พบว่า เครื่อง Autoclave เครื่องมือที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสแล้วให้ปริมาณของน้ำตาลไซโลสมากที่สุดคือ 33.526±0.18 g/l เนื่องจากเครื่อง autoclave ที่ใช้นั้นมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการไฮโดรไลซิส ซึ่งแตกต่างจาก oil bath และ hot plate ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ค่อนข้างยากอุณหภูมิจะขึ้นๆลงๆ

ตารางที่ 17 ผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบต่างๆ

Table 17 The results of xylose and glucose with diluted sulfuric acid solution at various equipment for hydrolysis.

เครื่องมือที่ให้ความร้อน	xylose (g/l)	glucose (g/l)
oil bath	29.095±1.45	3.164±0.46
Autoclave	33.526±0.18	3.097±1.35
hot plate	17.94±0.94	1.804±0.04

สรุปสถานะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสละลายปาล์มเปล่าที่ไม่มีการปรับสภาพทางเคมี พบว่าในการไฮโดรไลซิสเพื่อที่จะได้ปริมาณของไซโลสที่สูงที่สุดคือ 33.526±0.18 g/l โดยการละลายปาล์ม 50 กรัม ทำการไฮโดรไลซิสในเครื่อง Autoclave กับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 6% (v/v) 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20 นาที

### 4.3. ผลของน้ำหนักหลังจากการปรับสภาพ

การปรับสภาพของทะลายปาล์มน้ำหนักที่ได้หลังจากการปรับสภาพจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ ดังแสดงในตารางที่ 17 พบว่าที่น้ำหนักเริ่มต้น 20 กรัม เมื่อมีการปรับปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีผลทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนละลายน้ำออกมาทำให้น้ำหนักของทะลายปาล์มหลังจากการปรับสภาพด้วยเบสจะหายไปมากกว่าการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก และยังทำให้เกิดการพองตัว (swelling) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุดิบให้เหมาะแก่การไฮโดรไลซิส โดยลิกนิน จะเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีมีความซับซ้อนเป็นตัวยึดเกาะระหว่างเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เมื่อ มีการการกำจัดลิกนินออกนั้นจะทำให้องค์ประกอบที่เป็นเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถูกไฮโดรไลซิสออกมาได้มากกว่าที่ไม่มีการกำจัดลิกนิน ส่งผลให้น้ำตาลไซโตสและน้ำตาลกลูโคสมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย (ชนิต เมธิ์นุกูล, 2546)

ตารางที่ 18 ผลของน้ำหนักที่หายไปหลังการปรับสภาพทะลายปาล์ม

Table 18 The results of weight lose after pretreatment OPEFB.

การปรับสภาพ	น้ำหนักที่ได้หลังจากการปรับสภาพ		น้ำหนักที่หายไปหลังจากการปรับสภาพ	
	กรัม	%	กรัม	%
non-pre	20.00	100	0	0
Water (s)	17.37 ±0.72	86.85	2.63	13.15
Water (t)	16.77±0.63	83.85	3.23	16.15
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	17.42±0.53	87.10	2.58	12.90
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	16.64±0.62	83.20	3.36	16.80
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	15.60±0.47	78.00	4.40	22.00
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	13.65±0.45	68.25	6.35	31.75
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	11.73±0.46	58.65	8.27	41.35
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	11.45±1.05	57.25	8.55	42.75
5% NaOH (s)	12.33±0.59	61.65	7.67	38.35
10% NaOH (s)	11.16±1.30	55.80	8.84	44.20
15% NaOH (s)	10.24±0.62	51.20	9.76	48.80
5% NaOH (t)	10.91±0.97	54.55	9.09	45.45

ตารางที่ 18 (ต่อ)

การปรับสภาพ	น้ำหนักที่ได้หลังจากการปรับสภาพ		น้ำหนักที่หายไปหลังจากการปรับสภาพ	
	กรัม	%	กรัม	%
10% NaOH (t)	8.70±1.23	43.50	11.30	56.50
15% NaOH (t)	8.82±2.10	44.10	11.18	55.90
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (s)	12.36±0.47	61.80	7.64	38.20
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	10.22±0.92	51.10	9.78	48.90
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (t)	8.58±1.29	42.90	11.42	57.10
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	9.74±0.64	48.70	10.26	51.30
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (t)	6.22±0.98	31.10	13.78	68.90
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (s)	7.42±2.23	37.10	12.58	62.90
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	8.14±0.89	40.70	11.86	59.30
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	9.19±1.25	45.95	10.81	54.05
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>				

#### 4.4. ผลการศึกษาองค์ประกอบของทะเลสาบปาล์ม

ทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบของทะเลสาบปาล์ม ได้แก่ เสมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดซัลฟิวริก และน้ำ ผลจากการวิเคราะห์พบว่า หลังการปรับสภาพปริมาณของเสมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เซลลูโลสก็เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของปริมาณเซลลูโลสเริ่มต้น และในส่วนของปริมาณลิกนินจะลดลงเกือบ 3 เท่าของปริมาณลิกนินเริ่มต้น สามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพวัตถุดิบจะช่วยกำจัดลิกนินที่หุ้มในส่วนของเสมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีผลทำให้ปริมาณของเสมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำไปเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ และใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำตาลไซโลสและกลูโคสต่อไป



ตารางที่ 19 องค์ประกอบในทะลายปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและที่ปรับสภาพด้วยน้ำ กรด และ ด่าง

Table 19 Component in OPEFB after pretreated by chemical methods and untreated.

การปรับสภาพ	องค์ประกอบของทะลายปาล์ม (%)		
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
non-pre	49.95±0.45	20.71±1.35	9.33±1.35
Water (s)	34.32±1.21	24.26±0.72	24.50±0.69
Water (t)	38.26±0.23	28.82±0.54	26.25±0.69
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	33.64±1.01	5.67±2.30	43.39±0.46
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	34.71±0.69	6.80±2.54	46.20±0.32
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	36.25±0.68	7.15±0.77	50.56±0.68
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	42.76±0.60	10.59±0.57	45.70±0.54
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	37.69±1.12	11.12±0.34	47.24±0.24
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	33.39±0.71	14.42±0.82	41.46±0.31
5% NaOH (s)	47.21±0.43	25.80±0.85	20.24±0.59
10% NaOH (s)	48.58±0.78	27.62±1.10	23.53±0.94
15% NaOH (s)	49.48±0.98	30.36±0.28	17.84±0.52
5% NaOH (t)	52.43±0.32	33.85±0.39	4.82±2.98
10% NaOH (t)	55.55±0.70	30.25±0.32	5.97±2.27
15% NaOH (t)	59.98±0.61	27.19±0.26	6.54±1.95
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (s)	27.42±1.65	4.50±2.78	26.70±0.90
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	27.06±1.24	4.19±1.18	25.74±1.00
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (t)	39.87±0.39	0.57±2.66	8.78±2.13
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	40.37±0.89	0.83±4.82	7.82±1.92
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (t)	32.38±0.69	2.42±1.26	13.54±1.65
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (s)	31.54±1.33	2.89±2.65	18.22±0.52
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	29.57±1.42	2.53±2.37	19.75±1.22
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	29.36±0.84	2.24±3.38	15.34±1.71

ตารางที่ 20 องค์ประกอบในทะลายปาล์มเปล่า

Table 20 Component in OPEFB

การปรับสภาพ	Hemicellulose recovery (% initial weight)	ปริมาณของ เซลลูโลส ที่เหลือ	weight lose of lignin
non-pre	20.71±1.35	100±0.00	20.12±1.25
Water (s)	3.55±0.24	70.08±0.94	17.98±0.87
Water (t)	8.11±4.21	68.93±0.22	17.42±0.37
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-15.04±2.73	47.34±0.97	23.48±2.65
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-13.91±2.96	45.85±1.23	21.09±1.78
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-13.56±2.47	44.27±1.64	22.76±0.78
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	-10.12±2.52	42.56±0.92	20.12±0.80
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	-9.59±3.24	43.98±0.58	20.98±0.18
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	-6.29±1.76	48.58±0.65	21.12±2.52
5% NaOH (s)	5.09±1.91	87.79±0.93	48.01±1.75
10% NaOH (s)	6.91±0.81	85.86±1.26	48.25±3.89
15% NaOH (s)	9.65±2.03	83.03±0.46	49.94±2.00
5% NaOH (t)	13.14±2.65	88.90±0.69	52.75±1.25
10% NaOH (t)	9.54±3.94	85.41±2.54	55.34±1.90
15% NaOH (t)	6.48±3.34	80.58±1.98	57.47±0.46
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (s)	-16.21±2.48	32.65±0.28	34.87±2.67
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-16.52±1.95	32.67±0.66	35.11±1.00
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (t)	-20.14±1.34	26.67±0.91	32.87±0.99
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	-19.88±1.32	25.78±0.87	35.10±0.64
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (t)	-18.29±1.48	29.87±1.37	34.15±0.38
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (s)	-17.82±1.33	28.90±1.86	34.72±0.59
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	-18.18±1.73	30.09±0.29	35.98±0.91
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-18.47±1.62	30.81±0.45	34.79±1.87

จากผลการทดลองเมื่อทำการปรับสภาพทะเลสาบด้วยวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมี จะพบว่าโครงสร้างของเส้นใยมีลักษณะเปลี่ยนไปจากเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) โดยการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับการปรับสภาพทางเคมีเป็นวิธีการที่เหมาะสมวิธีหนึ่ง ช่วยกำจัดลิกนินและไม่ทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูญเสียไป จากการศึกษพบว่าตัวอย่างทะเลสาบที่นำมาศึกษามีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดคือ  $49.95 \pm 0.45\%$  (w/w) ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและปริมาณลิกนินคือ  $20.71 \pm 1.35$  และ  $9.33 \pm 1.35\%$  (w/w) ตามลำดับ โดยสภาวะที่เหมาะสม ในการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น  $5\%$  (w/w) ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง เป็นวิธีการปรับสภาพทะเลสาบที่ดีที่สุดทำให้ได้เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส สูงถึง  $52.43 \pm 0.32$  และ  $33.85 \pm 0.39\%$  ตามลำดับ และเหลือมีปริมาณลิกนินอยู่เพียง  $4.82 \pm 2.98\%$  ดังแสดงในตารางที่ 18

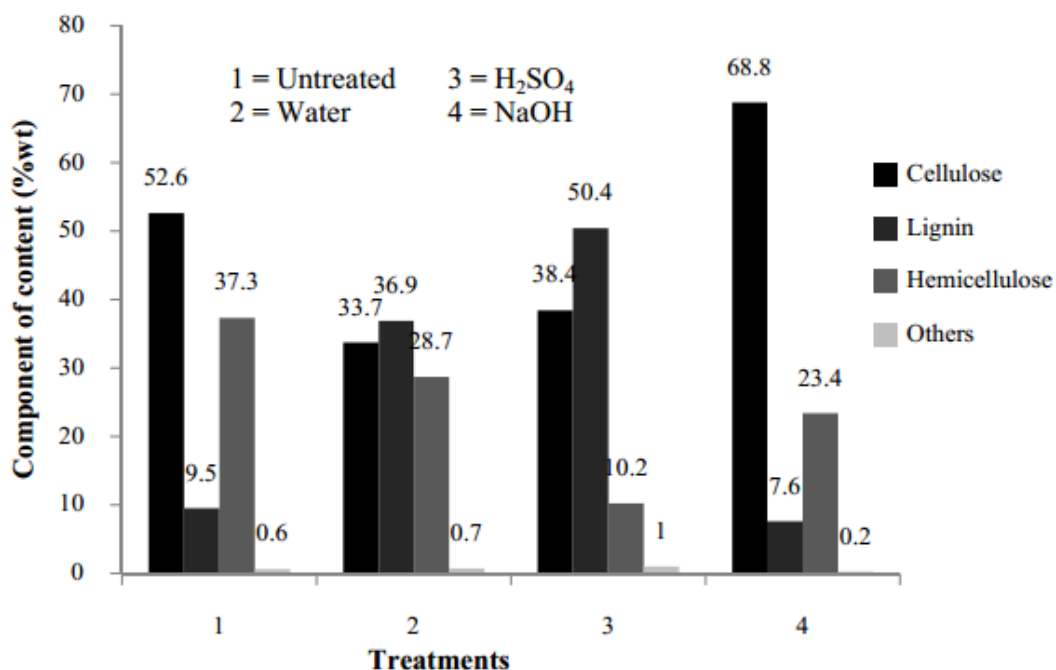
การปรับสภาพทะเลสาบเปล่าด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่ามีผลต่อปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน คือจากการเตรียมด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจะทำให้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุดเท่ากับ  $42.76 \pm 0.60\%$  wt เมื่อปรับสภาพทะเลสาบเปล่าด้วย  $0.2\% \text{H}_2\text{SO}_4$  โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^\circ\text{C}$  เวลา 20 นาที จากเซลลูโลสในทะเลสาบเปล่าเริ่มต้น  $49.95 \pm 0.45\%$  wt การเตรียมด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก จะทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงสุดเท่ากับ  $14.42 \pm 0.82\%$  wt เมื่อปรับสภาพทะเลสาบเปล่าด้วย  $0.8\% \text{H}_2\text{SO}_4$  โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^\circ\text{C}$  เวลา 20 นาที จากเซลลูโลสในทะเลสาบเปล่าเริ่มต้น  $20.71 \pm 1.35\%$  wt สำหรับลิกนินหลังจากการเตรียมด้วยกรดซัลฟิวริก ปริมาณของลิกนินเพิ่มขึ้นในทุกๆความเข้มข้น โดยสามารถกำจัดได้สูงสุด  $23.48\%$  wt จากการปรับสภาพโดยการแช่ทะเลสาบเปล่าด้วย  $0.2\% \text{H}_2\text{SO}_4$  ซึ่งการปรับสภาพด้วยกรดนี้ถ้าทำในช่วงอุณหภูมิสูง ความเข้มข้นของกรดต่างๆ แต่สามารถที่จะละลายส่วนที่เป็นลิกนินออกมาได้ แต่จะสามารถที่จะทำให้ลิกนินแตกพันธะออกได้ ช่วยให้ง่ายต่อการย่อยเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลสออกจากกัน

การปรับสภาพโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นมากเกินไปและใช้เวลานาน การปรับสภาพที่นานเกินไปในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลายจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างที่อยู่ถัดเข้าไปด้านในส่วนของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส องค์ประกอบทั้งสองเกิดการย่อยออกมาได้ จะส่งผลให้ปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสลดลงเมื่อใช้เวลานาน การปรับสภาพวัตถุดิบนานเกินไป โดยจะทำให้วัตถุดิบที่ได้มีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสต่อไป โดยปริมาณของเซลลูโลสในทะเลสาบเปล่าหลังการเตรียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเกือบทุกๆสภาวะ การเตรียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณเซลลูโลสใน

ทะเลสาบปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายองค์ประกอบของทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยส่วนที่ละลายไปนั้นจะเป็นส่วนของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนที่อยู่บริเวณรอบนอกโดยจะละลายเป็น  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  และ Carboxylic acid (Umikasom, 1998) จากการเตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำได้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุดเท่ากับ  $59.98 \pm 0.61\%$  wt เมื่อปรับสภาพทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วย 15% NaOH โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^\circ\text{C}$  เวลา 20 นาที จากเซลลูโลสในทะเลสาบปาล์มเปล่าเริ่มต้น  $49.95 \pm 0.45\%$  wt สำหรับในส่วนของเฮมิเซลลูโลสในทะเลสาบปาล์มเปล่าหลังการเตรียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเกือบทุกสภาวะการเตรียมจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับปริมาณเฮมิเซลลูโลสในทะเลสาบปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีและก็มีบางส่วนที่ละลายออกไป การเตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำได้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงสุดเท่ากับ  $33.85 \pm 0.39\%$  wt เมื่อปรับสภาพโดยการแช่ทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วย 5% NaOH จากเซลลูโลสในทะเลสาบปาล์มเปล่าเริ่มต้น  $20.71 \pm 1.35\%$  wt สำหรับลิกนินหลังจากการเตรียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณของลิกนินเพิ่มขึ้นในทุกๆความเข้มข้น โดยสามารถกำจัดได้สูงสุด  $57.47\%$  wt จากการปรับสภาพทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วย 15% NaOH โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^\circ\text{C}$  เวลา 20 นาที

Mosier และคณะ (2005) พบว่าการปรับสภาพของวัตถุดิบที่เป็นพืชชีวมวลด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้อง โดยจะใช้เวลาที่นานกว่าการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ แตกต่างกับการปรับสภาพด้วยกรด เพราะว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีข้อจำกัดในการเกิดปฏิกิริยาโดยส่วนหนึ่งของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปฏิกิริยาจะเกิดเป็นเกลือที่ผิวของวัตถุดิบที่ใช้

สายฤดี ค้วงหวัง (2555) ได้ทำการศึกษาองค์ของทะเลสาบปาล์มเปล่าดังแสดงผลในรูปที่ 22 โดยทะเลสาบปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ที่อุณหภูมิ  $130^\circ\text{C}$  เวลา 40 นาที ความเข้มข้นของสารเคมีร้อยละ 15% (w/v)



ภาพที่ 23 องค์ประกอบของทะเลสาปาล์ม

Figure 23 Components in OPEFB

ดังนั้น ปริมาณองค์ประกอบของทะเลสาปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ โดยพบว่าความเข้มข้นที่ต่ำเกินไปจะทำให้องค์ประกอบเกิดการย่อยสลายได้น้อยกว่า แต่ในขณะเดียวกันความเข้มข้นที่สูงเกินไปก็อาจส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดมาก นอกจากนี้สารเคมีที่ใช้ยังมีผลต่อการแยกองค์ประกอบของเส้นใย โดยพบว่ากรดจะมีความสามารถในการแยกเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสได้ดีกว่า ส่วนลิกนินจะพบว่าสามารถแยกได้ดีในสารละลายต่าง โดยในการปรับสภาพนั้นมีปริมาณน้ำตาล เช่น น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลกลูโคส จะเกิดสารประกอบที่เป็นพิษ เช่น 5-HMF และ furfural ในปริมาณที่น้อยมาก ยกเว้นตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกจะให้ปริมาณน้ำตาลออกมาด้วย เนื่องจากว่ากรดแก่จะมีความสามารถย่อยสลายสูง (Hydrolysis) จึงทำให้เส้นใยถูกย่อยสลายต่อเนื่องจนได้น้ำตาลออกมาและหากกรดยังเหลือในปฏิกิริยามากเกินไปยังสามารถทำให้น้ำตาลไซโลสเปลี่ยนไปเป็น furfural และน้ำตาลกลูโคสเปลี่ยนไปเป็น 5-HMF ได้อีกด้วย (นันทิกา คล้ายชม, 2554)

#### 4.5. ผลของน้ำตาลไซโลส น้ำตาลกลูโคส และกรดอะซิติก

สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลซิสของทะลายปาล์มโดยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง โดยใช้สภาพที่เหมาะสมในข้อ 4.2 คือ การไฮโดรไลสทะลายปาล์ม 2 กรัม ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 40 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซิส 20 นาที ที่อุณหภูมิ 121°C ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ 2-10% (v/v) การปรับสภาพทะลายปาล์มด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี โดยนำทะลายปาล์มไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเส้นใย และส่วนของเหลวนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลและสารประกอบอนุพันธ์อื่นๆก่อน การปรับสภาพด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 23 วิธีโดยไม่ผ่านหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (การแช่) และโดยผ่านหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงให้ปริมาณองค์ประกอบของเส้นใยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% (w/v) โดยไม่ผ่านหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (การแช่) จะมีปริมาณไซโลสที่มากที่สุด โดยทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางที่ใช้ 10% (w/v) ดังแสดงในตารางที่ 19

จากการเตรียมด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจะทำได้ปริมาณของไซโลสที่สูงสุดเท่ากับ  $18.977 \pm 0.00\%$  wt เมื่อปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าด้วย  $0.8\%$   $H_2SO_4$  โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที และทำการไฮโดรไลซิสด้วย 10% เนื่องจากในการปรับสภาพทะลายปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริกเมื่อมีการความเข้มข้นของกรดจะละลายส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลสออกมาด้วยทำให้ได้ไซโลสที่น้อยลง

จากการเตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไดออกไซด์จะทำได้ปริมาณของไซโลสที่สูงสุดเท่ากับ  $40.027 \pm 0.84\%$  wt เมื่อปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าด้วยการแช่ใน 10% NaOH และทำการไฮโดรไลซิสด้วย 10%  $H_2SO_4$  ซึ่งจะเห็นการปรับสภาพทะลายปาล์มด้วยโซเดียมไดออกไซด์จะมีปริมาณของไซโลสที่สูงกว่าการปรับสภาพทะลายปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริก เนื่องจากการปรับสภาพด้วยโซเดียมไดออกไซด์จะกำจัดส่วนที่เป็นลิกนินออก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่าย

ระหว่างปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ลิกนินเซลลูโลสจะถูกย่อยไปเป็นน้ำตาลและผลพลอยได้ต่างๆ ดังนี้

Cellulose » Glucan » Glucose » HMF » Formic acid, Levulinic acid

Hemicellulose » Xylan » Xylose » Furfural » Formic acid

» Mannan » Mannose » HMF » Formic acid, Levulinic acid

» Acetyl groups » Acetic acid

Lignin » Phenolic compounds

ตารางที่ 21 น้ำตาลไซโลสที่ได้จากไฮโดรไลซิสที่กรดความเข้มข้นต่างๆ

Table 21 The results of xylose with diluted sulfuric acid solution at various conditions.

การปรับสภาพ	Xylose (g/l)		
	2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
non-pre	18.724±0.04	20.124±0.04	18.913±0.03
Water (s)	17.997±0.08	17.487±0.06	15.226±0.04
Water (t)	15.476±0.02	12.509±0.40	19.896±0.03
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.194±0.24	8.349±0.06	8.085±0.22
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	4.910±0.31	8.416±0.09	8.880±0.01
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.804±0.17	8.940±0.06	9.189±0.01
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	9.186±0.10	14.346±0.14	10.726±0.01
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	10.538±0.25	15.312±0.02	17.106±0.10
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	9.999±0.14	12.402±0.03	18.977±0.00
5% NaOH (s)	29.965±1.66	35.026±2.26	28.061±0.11
10% NaOH (s)	29.325±3.17	37.230±2.30	40.027±0.84
15% NaOH (s)	30.926±0.61	33.689±0.74	39.526±0.03
5% NaOH (t)	20.965±0.27	28.179±2.66	25.731±0.05
10% NaOH (t)	12.612±2.09	27.000±0.20	24.214±0.01
15% NaOH (t)	15.724±0.14	18.266±0.06	25.229±0.05
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (s)	12.737±0.65	12.911±0.02	9.462±0.72
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	13.476±0.07	12.413±0.06	7.720±0.02
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (t)	0.225±1.38	0.258±2.01	0.532±0.42
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	0.230±0.48	0.297±2.86	0.700±1.30
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (t)	0.509±0.12	0.438±2.01	7.542±0.14
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (s)	0.182±4.82	0.502±0.51	7.546±0.10
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	7.791±0.21	6.318±0.27	8.212±0.07
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.125±0.19	6.995±0.08	8.234±0.17

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 20 ปริมาณของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการเตรียมด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจะทำให้ปริมาณของกลูโคสที่สูงสุดเท่ากับ  $5.444 \pm 0.01\%$  wt เมื่อปรับสภาพละลายปาล์มเปล่าด้วย  $0.2\%$   $H_2SO_4$  โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^\circ C$  เวลา 20 นาที และทำการไฮโดรไลซิสด้วย  $10\%$   $H_2SO_4$

จากการเตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไดออกไซด์จะทำให้ปริมาณของกลูโคสที่สูงสุดเท่ากับ  $16.250 \pm 0.01\%$  wt เมื่อปรับสภาพละลายปาล์มเปล่าด้วย  $10\%$  NaOH โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^\circ C$  เวลา 20 นาที และทำการไฮโดรไลซิสด้วย  $6\%$   $H_2SO_4$  ซึ่งจะเห็นการปรับสภาพละลายปาล์มด้วยโซเดียมไดออกไซด์จะมีปริมาณของกลูโคสที่สูงกว่าการปรับสภาพละลายปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริก เนื่องจากในการปรับสภาพละลายปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริกจะละลายส่วนที่เป็นเซลลูโลสออกมาด้วยทำให้ได้กลูโคสที่น้อยลง และการปรับสภาพด้วยโซเดียมไดออกไซด์จะกำจัดส่วนที่เป็นลิกนินออก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่าย

ตารางที่ 22 น้ำตาลกลูโคสที่ได้จากไฮโดรไลซิสที่กรดความเข้มข้นต่างๆ

Table 22 The results of glucose with diluted sulfuric acid solution at various conditions.

การปรับสภาพ	Glucose (g/l)		
	2% $H_2SO_4$	6% $H_2SO_4$	10% $H_2SO_4$
non-pre	3.798±0.06	2.672±0.17	2.160±0.26
Water (s)	3.136±0.37	2.758±0.24	0.815±0.47
Water (t)	3.126±0.36	3.040±0.06	1.056±0.13
0.2% $H_2SO_4$ (s)	1.639±0.61	2.501±0.18	2.731±0.06
0.5% $H_2SO_4$ (s)	2.094±1.28	2.968±0.08	4.357±0.09
0.8% $H_2SO_4$ (s)	2.537±0.59	2.935±0.16	2.079±0.17
0.2% $H_2SO_4$ (t)	3.000±0.60	2.396±0.08	5.444±0.01
0.5% $H_2SO_4$ (t)	1.910±0.42	2.377±0.29	5.000±0.13
0.8% $H_2SO_4$ (t)	1.155±0.48	2.349±0.05	4.650±0.10
5% NaOH (s)	7.955±0.04	6.398±0.01	6.079±0.03
10% NaOH (s)	12.042±0.02	5.745±0.04	5.368±0.10
15% NaOH (s)	9.510±0.22	9.096±0.03	6.830±0.02
5% NaOH (t)	9.222±0.07	9.811±0.06	8.076±0.09

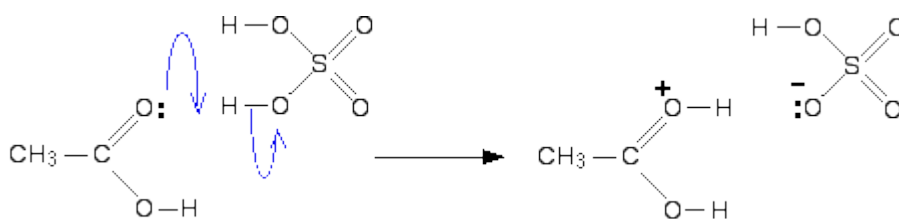


ตารางที่ 22 (ต่อ)

การปรับสภาพ	Glucose (g/l)		
	2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
10% NaOH (t)	14.258±0.05	16.250±0.01	6.047±0.19
15% NaOH (t)	9.332±0.26	11.215±0.04	7.599±0.10
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (s)	2.383±10.1	1.070±0.27	6.556±0.35
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.553±0.48	1.016±0.74	6.100±0.07
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (t)	2.902±0.24	6.070±0.18	6.395±0.06
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.362±3.71	5.727±0.02	5.790±0.03
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (t)	2.399±0.09	1.591±0.01	1.038±0.00
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (s)	2.356±0.28	3.796±0.14	1.043±0.11
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	0.965±1.21	3.875±0.15	1.018±0.06
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.833±0.27	1.772±0.09	1.015±0.86
***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน			

น้ำตาลกลูโคสเป็นโมโนเมอร์ของเซลลูโลสส่วนน้ำตาลไซโลสนั้นเป็นโมโนเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส จากองค์ประกอบทั้งหมดของทะลายปาล์มจะเห็นว่าปริมาณของเซลลูโลสมากกว่าเฮมิเซลลูโลส ทำให้หลายๆคนคิดว่าการไฮโดรไลซิสจะได้ปริมาณของกลูโคสมากกว่าไซโลส แต่ในความเป็นจริงแล้วลักษณะของโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสจะเป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างไม่แน่นอนซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายเป็นโมโนเมอร์เล็กๆได้ง่ายกว่าเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่มีลักษณะซับซ้อนต้านทานต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังนั้นในการย่อยเซลลูโลสจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าย่อยเฮมิเซลลูโลส (สายฤดี คิ้วหวัง, 2555)

ผลพลอยได้จากการไฮโดรไลซิสน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสก็คือ กรดอะซิติกดังแสดงผลในตารางที่ 21 โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยเพื่อให้ได้กรดอะซิติก คือ อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางที่ใช้ 6% (v/v) ทะลายปาล์มที่ใช้ปรับสภาพในเครื่อง Autoclave ด้วย 0.2% (w/v) ของกรดซัลฟิวริกได้กรดอะซิติก 7.308±2.4 g/l โดยกรดอะซิติกสามารถวิเคราะห์ได้ที่มีไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่ำๆ ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่สูงๆ โดยงานวิจัยนี้คือ 10% (v/v)  $H_2SO_4$  จะไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณกรดอะซิติกหรือวิเคราะห์ได้น้อยมากๆ เนื่องจากกรดซัลฟิวริกจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกในทะลายปาล์มเปล่าได้เป็นสารประกอบ ethyl-dioxy ดังรูปที่ 22 ปริมาณของกรดอะซิติกที่ตกไม่มียุ่สำคัญกับการปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าและความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส



ภาพที่ 24 กลไกปฏิกิริยาในการเกิด ethyl-dioxy

Figure 24 Mechanism of ethyl-dioxy

Hemicellulose » Xylan » Xylose » Furfural » Formic acid

» Mannan » Mannose » HMF » Formic acid, Levulinic acid

» Acetyl groups » Acetic acid

ตารางที่ 23 กรดอะซิติกที่ได้จากไฮโดรไลซิสที่กรดความเข้มข้นต่างๆ

Table 23 The results of acetic acid with diluted sulfuric acid solution at various conditions.

การปรับสภาพ	Acetic acid (g/l)		
	2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
non-pre	4.305±0.10	4.041±1.88	N/A
Water (s)	6.590±0.04	5.493±0.63	N/A
Water (t)	5.518±3.62	6.070±0.46	N/A
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.518±1.26	7.175±0.83	N/A
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.355±0.97	6.595±4.49	N/A
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.525±2.78	4.041±1.73	N/A
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	4.624±0.53	7.308±2.44	N/A
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.494±3.70	5.979±4.34	N/A
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.143±3.25	4.461±2.54	N/A
5% NaOH (s)	3.820±4.37	5.074±1.90	N/A
10% NaOH (s)	5.343±0.83	4.020±1.85	N/A
15% NaOH (s)	3.882±0.40	3.486±3.69	N/A
5% NaOH (t)	3.790±4.09	4.873±4.20	N/A
10% NaOH (t)	3.191±3.27	6.050±1.77	N/A
15% NaOH (t)	3.585±4.24	7.073±1.75	N/A
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (s)	4.868±1.44	4.593±1.19	N/A
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	4.623±1.20	4.548±4.77	N/A
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (t)	1.849±1.53	3.554±1.87	N/A
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.827±3.02	2.246±1.15	N/A
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH (t)	3.318±2.48	2.772±3.72	N/A
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH (s)	2.093±4.74	2.651±4.88	N/A
NaOH (s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.676±0.97	3.404±1.45	N/A
NaOH (t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.853±1.32	2.008±0.95	N/A

\*\*\*หมายเหตุ N/A ไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้เนื่องจากไม่ปรากฏสเปกตรัมใน GC

โดยสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้สำหรับการย่อยเพื่อให้ได้น้ำตาลไซโลส คือ ที่ อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางที่ใช้ 10% (w/v) ทะลายปาล์มปรับสภาพโดยการแช่ใน 10% ( w/v) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้น้ำตาลไซโลส 40.027±0.84 g/l

การย่อยเพื่อให้ได้น้ำตาลกลูโคส คือ อุณหภูมิ 121 °C เวลา 20 นาที ความเข้มข้นของ สารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางที่ใช้ 6% (w/v) ทะลายปาล์มที่ใช้ปรับสภาพในเครื่อง Autoclave ที่ อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ด้วย 10% ( w/v) ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้น้ำตาลกลูโคส 16.250±0.01 g/l

การย่อยเพื่อให้ได้กรดอะซิติก คือ ที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ความเข้มข้นของ สารละลายกรดซัลฟูริกเจือจางที่ใช้ 6% (w/v) ทะลายปาล์มที่ใช้ปรับสภาพในเครื่อง Autoclave ที่ อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ด้วย 0.2% (w/v) ของกรดซัลฟูริก ได้น้ำตาลกลูโคส 7.308±2.44 g/l

การปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าก่อนทำการไฮโดรไลซิสจะได้ไซโลส 40.027 ±0.87 g/l เมื่อเปรียบเทียบกับทะลายปาล์มเปล่าที่ไม่มีการปรับสภาพทางเคมีในกิจกรรมที่ 4. 2 ซึ่งจะได้ ไซโลส 33.526±0.18 g/l ถึงแม้การปรับสภาพก่อนไฮโดรไลซิสจะได้ปริมาณไซโลสที่สูงกว่าแต่ จะต้อง NaOH ในการปรับสภาพ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสมากขึ้น และต้องใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก 1°C

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1. การศึกษาองค์ประกอบของทะเลสาบปลาต้ม

สำหรับงานวิจัยนี้ ทะเลสาบปลาต้มได้มาจากอำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง โดยนำทะเลสาบปลาต้มมาผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพโดยวิธีการบด แต่ไม่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการทางเคมี โดยทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 24 เมช พบว่ามีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และ ลิกนิน 20.71 49.95 และ 9.33% (w/w) ตามลำดับ

##### 5.1.2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสทะเลสาบปลาต้มที่ไม่มีการปรับสภาพ

สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสทะเลสาบปลาต้มเปล่าที่ไม่มีการปรับสภาพทางเคมี พบว่าในการไฮโดรไลซิสเพื่อที่จะได้ปริมาณของไซโลสที่สูงที่สุดคือ  $33.526 \pm 0.18$  g/l โดยการใช้ทะเลสาบปลาต้ม 50 กรัม ทำการไฮโดรไลซิสในเครื่อง Autoclave กับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 6% (v/v) 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที

##### 5.1.3. การศึกษาผลของการปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment)

###### 1 การศึกษาผลของน้ำหนักของทะเลสาบปลาต้มหลังการปรับสภาพ

ทำการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5-15% (w/v) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2-0.8 % (w/v) และน้ำ โดยการแช่และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^{\circ}\text{C}$  เวลา 20 นาที พบว่าจากน้ำหนักเริ่มต้นทะเลสาบปลาต้ม 20 กรัม การปรับปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5% (w/v) แช่ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นล้างจนมีสภาวะเป็นกลางแล้วนำไปอบให้แห้ง ทำการปรับสภาพวัตถุดิบต่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% (w/v) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $121^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที พบว่าน้ำหนักสุดท้ายหลังการปรับสภาพคือ  $6.22 \pm 0.98$  กรัม

## 2 การศึกษาผลของการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง (Acid pretreatment)

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง 0.8% (w/v) อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที พบว่ามีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน  $14.42 \pm 0.82$ ,  $33.39 \pm 0.71$  และ  $41.46 \pm 0.31\%$  (w/w) ตามลำดับ

## 3 การศึกษาผลของการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Alkali pretreatment)

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% (w/v) อุณหภูมิ 121 °C เวลา 20 นาที พบว่ามีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน  $33.85 \pm 0.39$ ,  $52.43 \pm 0.32$  และ  $4.82 \pm 2.98\%$  (w/w) ตามลำดับ

## 4 การศึกษาผลของการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยน้ำ

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยน้ำ อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที พบว่ามีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน  $28.82 \pm 0.54$ ,  $38.29 \pm 0.23$  และ  $26.25 \pm 0.69\%$  (w/w) ตามลำดับ

## 5 การศึกษาผลของการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธี Alkali pretreatment ร่วมกับการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธี Acid pretreatment

ทำการทดลองปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% (w/v) แช่ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นล้างจนมีสถานะเป็นกลางแล้วนำไปอบให้แห้ง จากนั้นทำการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง 0.5% (w/v) แช่ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปอบให้แห้งอีกครั้ง พบว่ามีปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน  $4.19 \pm 1.18$ ,  $27.06 \pm 1.24$  และ  $27.74 \pm 1.00\%$  (w/w) ตามลำดับ

## 6 การศึกษาองค์ประกอบในทะลายปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยกรดซัลฟิวริก น้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

ทำการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5-15% (w/v) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2-0.8 % (w/v) และน้ำ โดยการแช่และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลานาน 20 นาที เพื่อศึกษาว่าสารใดที่เหมาะสมแก่การปรับสภาพวัตถุดิบมากที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบกับวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี โดยพบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์เหมาะสม

ที่สุดในการปรับสภาพวัตถุดิบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยส่วนของเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาลไซโลส

#### 5.1.4. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส

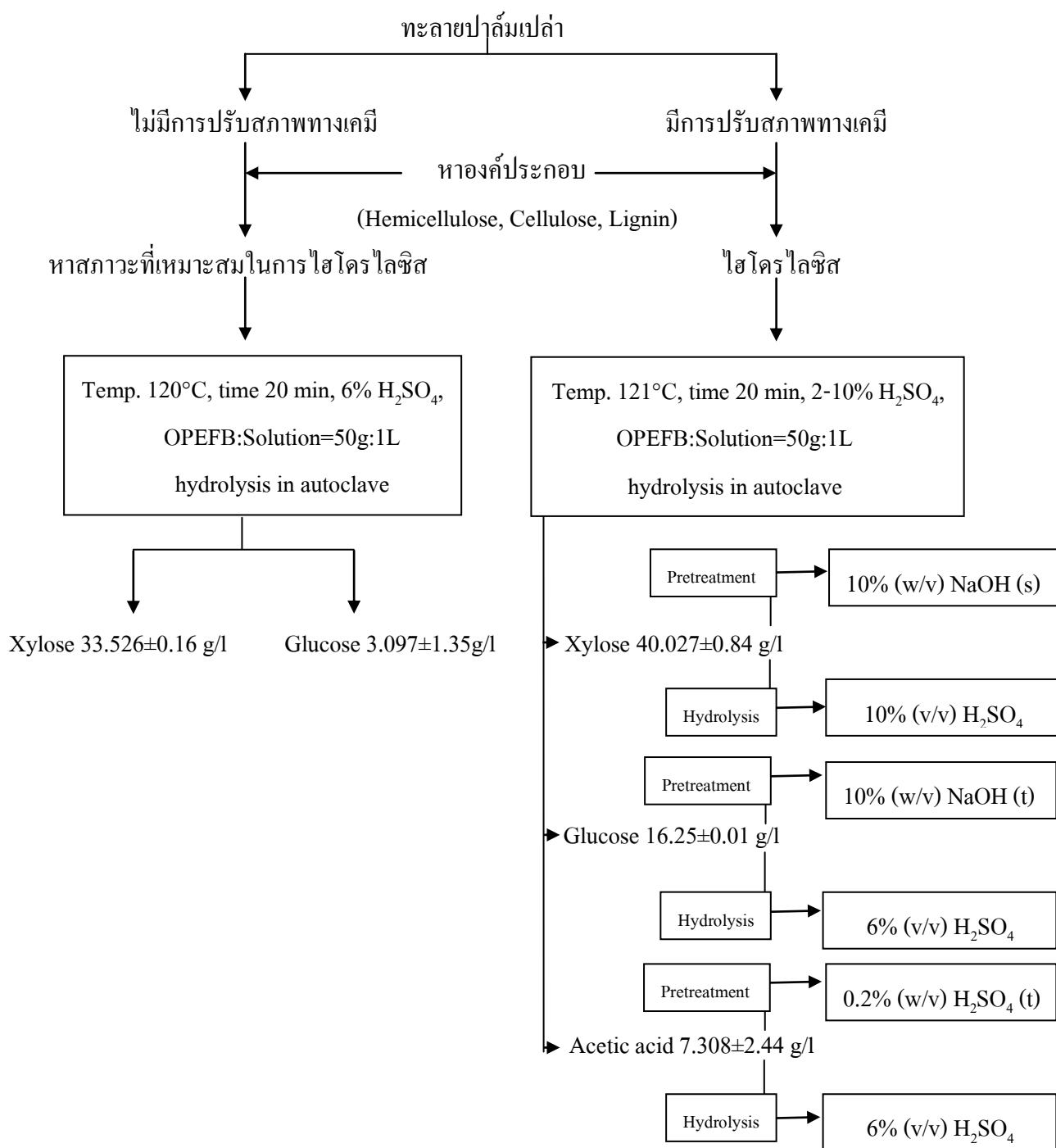
สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสจากข้อ 5.1.2. ของทะเลสาบปาล์มที่ไม่มีการปรับสภาพ นำสภาวะนั้นมาทำการไฮโดรไลซิสทั้งทะเลสาบปาล์มที่ไม่มีการปรับสภาพและที่มีการปรับสภาพซึ่งจะได้ผลดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสทะเลสาบปาล์มเปล่าที่ไม่มีการปรับสภาพทางเคมี พบว่าในการไฮโดรไลซิสเพื่อที่จะได้ปริมาณของไซโลสที่สูงที่สุดคือ 33.526 g/l โดยการใช้ทะเลสาบปาล์ม 50 กรัม ทำการไฮโดรไลซิสในเครื่อง Autoclave กับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 6% (v/v) 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 20 นาที

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยเพื่อให้ได้น้ำตาลไซโลสมากที่สุด คือ การใช้ทะเลสาบปาล์มที่ปรับสภาพแบบโดยแซนโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% (w/v) ทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง 10% (v/v) ได้น้ำตาลไซโลส  $40.027 \pm 0.84$  g/l

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยเพื่อให้ได้น้ำตาลกลูโคสมากที่สุด คือ การใช้ทะเลสาบปาล์มที่ปรับสภาพแบบให้ความร้อนกับเครื่อง Auoclave ที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% (w/v) ทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง 6 % (v/v) ได้น้ำตาลกลูโคส  $16.25 \pm 0.01$  g/l

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยเพื่อให้ได้กรดอะซิดิกมากที่สุด คือ การใช้ทะเลสาบปาล์มที่ปรับสภาพโดยให้ความร้อนกับเครื่อง Auoclave ที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ด้วยสารละลายความเข้มข้น 0.2% (w/v) ของกรดซัลฟิวริก ทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 121°C เวลา 20 นาที ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง 6% (v/v) ได้กรดอะซิดิก  $7.308 \pm 2.44$  g/l



ภาพที่ 25 สรุปผล

Figure 25 Discussion



## อ้างอิง

- กนก รัตน์กะนกชัช. 2543. Biodegradation of cellulose and pectin substances. ภาควิชา  
เทคโนโลยีชีวภาพ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.  
กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2552. การปลูกปาล์มน้ำมัน. กรุงเทพฯ :  
สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี.
- นันทิกา คล้ายชม. 2554. การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากขางข้างฟางหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส  
ด้วยกรด. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.
- นุจริย์ เตรตัน. 2555. การสกัดน้ำตาลกลูโคสจากใบอ้อย. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พชรภณ สนทอง. 2556. การสลายลิกนินด้วยความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ระวีวรรณ แก้วกล้า. 2538. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- เรวัต เลิศฤทัยโยธิน. 2541. ปาล์มน้ำมัน, ใน พฤษศาสตร์พืชเศรษฐกิจ ภาควิชาพืชไร่นา  
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 117-122.
- ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย ธนาคารกสิกรรมไทย. 2551. ความต้องการปาล์มน้ำมัน : ผลิตไบโอดีเซล.  
กรุงเทพฯ : ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย.
- สายฤดี ดั่งหวัง. 2555. การผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสในทลายปาล์มด้วยวิธี Separation  
Hydrolysis and Fermentation. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชา  
วิศวกรรมเคมีคณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Aguilar R., Ramirez J.A., Garrote G. and Vazquez M., Kinetic study of acid hydrolysis of sugar  
cane bagasse. Journal of Food Engineering. 55 (2002) 309-318.
- Anatoly A., Shatalov, Helena P., Xylose production from giant reed (Arundo donax L.):  
Modeling and optimization of dilute acid hydrolysis. Carbohydrate Polymers. 87  
(2012) 210– 217
- Bai-Yan C., Jing-Ping G., Hong-Zhi L., Ke-Ke C. and Wen-Xiang P., Statistical optimization of  
dilute sulfuric acid pretreatment of corncob for xylose recovery and ethanol production.  
Biomass and bio energy. 36 ( 2012 ) 250- 57.

- Dawson L., and Boopathy R., Use of Post-Harvest sugarcane residue for ethanol production. *Bioresource Technology*. Vol. 98(2006) 1695-1699.
- Dongxu Z., Yee L.O, Zhi L., Jin C.W., Optimization of dilute acid-catalyzed hydrolysis of oil palm empty fruit bunch for high yield production of xylose. *Chemical Engineering Journal*. 181– 182 (2012) 636– 642.
- Ganguly A., Das S., Dey A., Das R., Chatterjee P. K., Optimization of xylose yield from water hyacinth for ethanol production using Taguchi Technique. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*. 3 (2012) 1-9
- Johnathan E., Studying cellulose fiber structure by SEM, XRD, NMR and acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*. 68 (2007) 235-241.
- Jose E.D.P., Iriani R. M., and Adilma R.P.S, Xylose production from sugarcane by surface response methodology. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*. 13 (2009) 75-80.
- Nootcharee T., and Anongnart D., Hydrolysis of sugarcane leaves for sugar production. project report No.ChE 2012-10, 1-64
- Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y., Holtzapple, M., and Ladisch, M., Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 96(2005) 673-686.
- Nurul I.B., Optimization of Xylose production from sugarcane bagasse using response surface methodology (RSM). Bachelor of Chemical Engineering (Biotechnology). 2010 1-25.
- Nurul L.M., Siti M.M.K and Abdul G.L.A, Optimization of xylose production from sago trunk cortex by acid hydrolysis. *Food Science and Technology*. 2(5) (2011) 102-108
- Pitchaya P., Sawitri C. Vitaya P. and Pilanee V., Preparation of xylose solution from steam explosion of oil palm trunk chip. 1-8.
- Pornvipa T., Warawut C. and Orathai C., Enhancing sugar production from bagasse by steam explosion with acetic acid digestion. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน ครั้งที่ 9 89-96.

- Rahman S.H.A., Choudhury J.P. and Ahmad A.L., Production of xylose from oil palm empty fruit bunch fiber using sulfuric acid. *Biochemical Engineering Journal*. 30 (2006) 97– 103
- Rahman S.H.A., Choudhury J.P., Ahmad A.L. and Kamaruddin A.H., Optimization studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose. *Bioresource Technology*. 98 (2007) 554–559.
- Reilly P.J. Xylanase ; Structure and function of myothecium verrucaria for fuel and chemicals. *Basic Life Sciences*. 18 (1980) 111-131.
- Robiah Y., Shanti F., Salleh N., Abdullah and Dyg R.A.G., Effect of ultrasonic pre-treatment on low temperature acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch. *Bioresource Technology*. 101 (2010) 9792–9796.
- Rahman S.H.A., Choudhury J.P. and Ahmad A.L., Production of xylose from oil palm empty fruit bunch fiber using sulfuric acid. *Biochemical Engineering Journal*. 30 (2006) 97–103
- Seonghun K., Jang-Min P., Jeong-Woo S., Chul-Ho K., Sequential acid-/alkali-pretreatment of empty palm fruit bunch fiber. *Bioresource Technology*. 109 (2012) 229–233.
- Supakit S., Suwimon K. and Sarote S., Production of xylose from rice straw. 323-330
- Teerapong J., Zero - waste process in oil palm extraction industries. *Hatyai Journal* 6(2) July–December. 2008 3-7.
- Umikalsom M.S., Ariff A.B., Zulkifli H.S., Tong C.C., Hass M.A. and Karim M.I.A. The treatment of oil palm empty fruit bunch for subsequent as substrate for cellulose production by *Chaetomium globosum* . *Bioresource Technology*. 62 (1997.) 1-9.
- Vittaya P., Nongnooy T. and Boonyarit C., Xylose from corn cobs by steam explosion. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38, 507-513.
- Vittaya P., Siripron S., Saowapark S. and Kuntida I., Production of high alpha-cellulose pulp a xylose from bagasse by steam explosion. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39 79-86.
- Zhu S., Wu Y., Yu Z., Liao J. and Zhange Y. Pretreatment by microwave/alkali of rice straw and its enzymic hydrolysis. *Proc Biochem*. 40 (2005) 3082-3086.
- Zhu S., Wu Y., Yu Z., Zhang X., Wang C., Yu F., Jin S. Production of ethanol from microwave-assisted pretreated wheat straw. *Proc. Biochem*. 41 (2006) 869-873.

ไซลิทอล - Wikipedia, the free encyclopedia [Internet]. [cited 2013 Sep 1].

Available from : <http://th.wikipedia.org/wiki/ไซลิทอล>

ปาล์มน้ำมัน - Wikipedia, the free encyclopedia [Internet]. [cited 2013 June 21].

Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/ปาล์มน้ำมัน>

ศึกษาและสาธิตการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน  
(2010) [cited 2013 June 21].

Available from: <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/finalreport.pdf>

Xylose - Wikipedia, the free encyclopedia [Internet]. [cited 2013 Sep 1].

Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Xylose>

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### วิธีการวิเคราะห์และการเตรียมสาร

#### ก-1 วิธีวิเคราะห์ปริมาณ เฮมิเซลลูโลส

##### อุปกรณ์

1. เครื่องให้ความร้อน (heater)
2. ชุดสกัด Soxhlet
3. ตู้อบ (oven)
4. ชุดกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum pump)
5. เครื่องชั่ง
6. แท่งแก้วคนสารละลาย
7. โถดูดความชื้น (desiccator)

##### สารเคมี

1. อะซิโตน
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์

การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 mol/l (0.5 M),  $M_w = 40 \text{ g/mol}$

$$\frac{\text{g}}{M_w} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{\text{g}}{40 \text{ g/mol}} = \frac{0.5 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 100 \text{ ml}}{1000}$$

$$\text{g} = 2 \text{ g}$$

∴ ชั่ง NaOH 2 กรัมปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร

##### วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดแล้วประมาณ 5 กรัม อะซิโตน 80 มิลลิลิตร
2. ทำการสกัดด้วยชุดสกัด Soxhlet ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 60 นาที
3. จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 30 นาที ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

4. นำตัวอย่างไปอบในตู้อบแห้ง (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105°C นาน 3 ชั่วโมงหรือจนกว่า น้ำหนักที่ชั่งได้จะคงที่ จากนั้นนำออกตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น (dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก
5. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 5 ประมาณ 0.3 กรัม (w1) ใส่ในหลอดทดลองขนาด 15 มิลลิลิตร
6. เติม NaOH (0.5 mol/l) 3 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
7. จากนั้นนำไปกรองโดยใช้เครื่องกรองแบบสุญญากาศเพื่อล้างสารละลายออกแล้วล้างด้วย น้ำจมี pH เป็นกลาง
8. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 7 ไปอบในตู้อบแห้ง (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105°C จนกว่า น้ำหนักที่ชั่งได้จะคงที่ จากนั้นนำออกตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น (dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก (w2)

#### การคำนวณ

$$H = \frac{(w1 - w2)}{w1} \times 100$$

โดยที่ H = ปริมาณของเฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)

w1 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

w2 = น้ำหนักตัวอย่างหลังการอบ (กรัม)

#### ก-2 วิธีวิเคราะห์หาเซลลูโลสและลิกนิน

##### อุปกรณ์

1. ถาดที่ทำด้วยโลหะสเตนเลส
2. เครื่องให้ความร้อน (heater)
3. ตู้อบ (oven)
4. บีกเกอร์ ขนาด 600 มิลลิลิตร
5. ขวดฉีดน้ำกลั่น
6. ชุดกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum pump)

7. เครื่องชั่ง
8. แท่งแก้วคนสารละลาย
9. โถดูดความชื้น (desiccator)
10. เตาเผา (Muffle furnace)

#### สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก (%assay = 96)
2. Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)
3. ฟีนอลพทาลิน
4. Decahydronapthalene
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

#### การเตรียมสาร

##### การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 N

Sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ), reagent grade (% assay) = 96, มวลโมเลกุล = 98.08 g/mol, sp.Gr = 1.84

$$\begin{aligned} \text{สูตร} \quad V &= \frac{100 * M_w * N}{\% (w/w) * \text{valency} * \text{sp.Gr}} \\ &= \frac{100 * 98.08 * 1}{96.7 * 2 * 1.84} \\ &= 27.56 \quad \text{ml} \end{aligned}$$

∴ ปิเปตกรดซัลฟิวริก 27.56 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร

##### สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล (1 M), $M_w = 40 \text{ g/mol}$

$$\begin{aligned} \frac{g}{M_w} &= \frac{CV}{1000} \\ \frac{g}{40 \text{ g/mol}} &= \frac{1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 100 \text{ ml}}{1000} \\ g &= 4 \quad g \end{aligned}$$

∴ ชั่ง NaOH 4 กรัมปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร

#### สารละลาย Acid Detergent Fiber



1. กรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  27.56 มิลลิลิตร ใส่ volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 200 มิลลิลิตร

3. เติมน้ำกลั่นให้พอดีขีด ปิดฝา เขย่าให้เข้ากัน ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3. ปรับปริมาตรพอดีขีด volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่า ให้เข้ากัน

4. หาคความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ด้วยการไทเทรตกับ NaOH

– ปิเปตสารละลายที่เตรียมได้มา 20 ml. ใสลงใน flask ขนาด 250 ml. หยดฟีนอล์ฟทาลีน 3 หยด ไทเทรตสารละลายด้วยสารละลาย NaOH ที่ทราบความเข้มข้นแล้ว จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลการทดลองและคำนวณผลที่ได้ หาคความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$

ครั้งที่	ปริมาตรเริ่มต้น (ml)	ปริมาตรสุดท้าย (ml)	ปริมาตรที่ใช้ (ml)
Blank	25.00	24.50	0.50
1	24.50	4.30	20.20
2	25.00	4.80	20.20
3	25.00	4.90	20.10
เฉลี่ย	20.1667		

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

$$(1 \text{ N}) * (20.1667 \text{ ml}) = N_2 * (20 \text{ ml})$$

$$N_2 = 0.9917 \text{ N}$$

∴ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เตรียมคือ 0.9917 N

โดย  $N_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน NaOH (N)

$N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่ต้องการทราบ (N)

$V_1$  = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน NaOH ที่ใช้ไทเทรต (ml)

$V_2$  = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่ใช้ (ml)

5. ชั่ง CTAB 20 กรัม ลงใน beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลาย Acid Detergent Fiber โดยใช้กรวยกรองและแท่งคนสารละลายช่วย ล้าง CTAB ที่ติดค้างใน beaker ด้วยสารละลาย sulfuric acid ความเข้มข้น 1 N แล้วใส่ลงในขวดเก็บสารละลาย Acid Detergent Fiber ที่มี CTAB เขย่าให้เข้ากัน แล้วเทกรดซัลฟิวริกที่เหลือใส่ในขวดสารละลาย Acid Detergent Fiber และเขย่าให้เข้ากัน

#### การเตรียมสารละลาย $H_2SO_4$ เข้มข้น 72 %

คำนวณหาปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลาย  $H_2SO_4$  เข้มข้น 72 %  
เตรียมสารละลาย 72%  $H_2SO_4$  ความถ่วงจำเพาะ 1.634 จาก 96.7%  $H_2SO_4$  ความถ่วงจำเพาะ 1.84 ( $H_2SO_4$  conc)

$$\text{จากสูตร } N_1V_1 = N_2V_2$$

เมื่อ  $N_1$  = ความเข้มข้นของ 96%  $H_2SO_4$  หน่วยเป็น Normal

$N_2$  = ความเข้มข้นของสารละลาย 72%  $H_2SO_4$  หน่วยเป็น Normal

$V_1$  = ปริมาตรของ 96%  $H_2SO_4$  ที่ต้องใช้หน่วยเป็น ml

$V_2$  = ปริมาตรของสารละลาย 72%  $H_2SO_4$  ที่ต้องการเตรียมหน่วยเป็น ml

จาก 96%  $H_2SO_4$  ความถ่วงจำเพาะ 1.84

สารละลาย $H_2SO_4$ หนัก	100 g	มีเนื้อกรดอยู่	= 96.7 g
สารละลาย $H_2SO_4$ หนัก	1.84 g	มีเนื้อกรดอยู่	= $\frac{96.7 \times 1.84}{100}$
สารละลาย $H_2SO_4$	1 ml	จะมีเนื้อกรดอยู่	= $\frac{96.7 \times 1.84}{100}$
สารละลาย $H_2SO_4$	1000 ml	จะมีเนื้อกรดอยู่	= $\frac{96.7 \times 1.84 \times 1000}{100 \times 1}$ g

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้น} &= \frac{96.7 \times 1.84 \times 1000}{100 \times 1 \times \left(\frac{98.08}{2}\right)} \text{ N} \\ &= 36.28 \text{ N} \end{aligned}$$

96%  $H_2SO_4$  ความถ่วงจำเพาะ 1.84 มีความเข้มข้น 36.28 N

จาก 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ความถ่วงจำเพาะ 1.634

$$\begin{array}{llll}
 \text{สารละลาย H}_2\text{SO}_4 \text{ หนัก} & 100 & \text{g} & \text{มีเนื้อกรดอยู่} = 72 \text{ g} \\
 \text{สารละลาย H}_2\text{SO}_4 \text{ หนัก} & 1.634 & \text{g} & \text{มีเนื้อกรดอยู่} = \frac{72 \times 1.634}{100} \\
 \text{สารละลาย H}_2\text{SO}_4 & 1 & \text{ml} & \text{จะมีเนื้อกรดอยู่} = \frac{72 \times 1.634}{100} \text{ g} \\
 \text{สารละลาย H}_2\text{SO}_4 & 1000 & \text{ml} & \text{จะมีเนื้อกรดอยู่} = \frac{72 \times 1.634 \times 1000}{100 \times 1} \text{ g} \\
 \text{ความเข้มข้น} & = & \frac{72 \times 1.634 \times 1000}{100 \times 1 \times \left(\frac{98.08}{2}\right)} \text{ N} \\
 & = & 23.99 \text{ N}
 \end{array}$$

96% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ความถ่วงจำเพาะ 1.63 มีความเข้มข้น 23.99 N

สารละลาย 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ความถ่วงจำเพาะ 1.634 มีความเข้มข้น 23.99 N

$$\text{จาก} \quad N_1 V_1 = N_2 V_2$$

$$36.28 \times V_1 = 23.99 \times 1000$$

$$V_1 = \frac{23.99 \times 1000}{36.28}$$

$$V_1 = 661.26 \text{ ml}$$

ในการเตรียมสารละลาย 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ความถ่วงจำเพาะ 1.634 จะต้องใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 96% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ความถ่วงจำเพาะ 1.84 เท่ากับ 666.02 มิลลิลิตร

#### วิธีเตรียมสารละลาย 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

1. ตวง H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 661.26 มิลลิลิตร ค่อยๆเทอย่างช้าๆ ลงใน beaker ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้ว 100 มิลลิลิตร พร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเข้ากันเป็นระยะ ในขณะที่เตรียมสารละลายนี้ต้องให้ beaker อยู่ในอ่างน้ำเย็นตลอดเวลา
2. นำกระจกนาฬิกาปิดไว้รอนสารละลายเย็นที่อุณหภูมิ 20°C
3. เมื่อสารละลายเย็นลง เติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร คนสารละลายให้เข้ากันอีกครั้ง เอากระจกนาฬิกาปิด ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 20°C
4. เมื่อสารละลายเย็นลง เทใส่ลงในขวดสำหรับเก็บสารละลาย 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ก่อนนำสารละลาย 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> มาใช้จะต้องวัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายนี้ให้ได้ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20°C ในการวัดเพื่อหาความถ่วงจำเพาะ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20°C นั้น เริ่มจากวางขวดสารละลาย 72% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ลงในอ่างน้ำเย็น วัดอุณหภูมิพออุณหภูมิ 20°C ยกขึ้น

จากอ่างน้ำเย็น เขย่าสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 72% ในขวดเก็บสารละลายให้เข้ากัน แล้วเทลงในกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร ใช้เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะวัดให้ได้เท่ากับ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 °C ถ้าค่าที่วัดได้สูงกว่า 1.634 ให้ค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงไป แต่ถ้ามีค่าต่ำกว่า 1.634 ให้เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป จนกว่าจะวัดได้ค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.634 ที่อุณหภูมิ 20 °C จึงจะนำไปใช้ได้

### วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดแล้วประมาณ 1 กรัม ในปิกรเจอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย Acid detergent ปริมาณ 100 มิลลิลิตร และ Decahydronaphthalene ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ให้ความร้อนตั้งให้เดือด 10 นาที หลังจากนั้นลดความร้อนเป็นเวลา 60 นาที
3. จากนั้นนำไปกรองใน crucible ที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว (w1) ล้างตัวอย่างที่ค้างอยู่ในปิกรเจอร์ลงใน Crucible ด้วยน้ำร้อน (อุณหภูมิ 90-100 °C) โดยใช้น้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ปิดเครื่องดูดสุญญากาศ เมื่อคูดน้ำออกจากตัวอย่างหมดแล้ว ล้างตัวอย่างที่กรองได้อีก 2 ครั้งด้วยน้ำร้อน เมื่อคูดน้ำออกจากตัวอย่างจนหมดแล้ว ล้างตัวอย่างต่อด้วย Acetone ประมาณ 2-3 ครั้ง จนกระทั่งไม่มีสีออกมา
4. นำ crucible พร้อมตัวอย่างไปอบในตู้อบแห้ง (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักที่ชั่งได้จะคงที่ จากนั้นนำออกตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น (dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกไว้ (w2)
5. นำ crucible ที่มีตัวอย่างแล้วมาเติมสารละลาย 72%  $H_2SO_4$  ที่เย็น (20°C) ลงไป ประมาณครึ่ง crucible ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่วเพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับตัวกันเป็นก้อน
6. คอยเติมสารละลาย 72%  $H_2SO_4$  เมื่อสารละลายใน crucible แห้ง พร้อมทั้งคนเป็นระยะๆ ใช้เวลาย่อย 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองโดยใช้เครื่องกรองแบบสุญญากาศเพื่อล้างสารละลายกรดออกแล้วล้างด้วยน้ำร้อน
7. โดยใช้น้ำร้อนปริมาณ 1,400 มิลลิลิตร หรือจนกว่าหมดกรด จากนั้นใช้ขวดฉีดน้ำร้อน ไล่ตัวอย่างที่ติดอยู่ข้าง crucible ให้ลงไป ใน crucible ให้หมด แล้วฉีดล้าง crucible อีกหนึ่งครั้ง

8. นำ crucible พร้อมตัวอย่างที่ย่อยแล้วจากข้อ 7 ไปอบในตู้อบแห้ง (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 8 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำออกใส่โถดูดความชื้น (dessicator) ปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกไว้ (w3)

9. นำ crucible พร้อมตัวอย่างไปเผา (ignite) ในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 500°C นาน 2 ชั่วโมง

10. นำออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักและบันทึกไว้ (w4)

#### การคำนวณ

$$ADF = \frac{(w2 - w1)}{S} \times 100$$

$$L = \frac{(w3 - w4)}{S} \times 100$$

$$C = ADF - L$$

โดยที่ ADF = Acid detergent fiber (ร้อยละ)

L = ปริมาณของลิกนิน (ร้อยละ)

C = ปริมาณของเซลลูโลส (ร้อยละ)

w1 = น้ำหนักของ crucible เปล่า (กรัม)

w2 = น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างหลังการย่อยด้วย Acid detergent (กรัม)

w3 = น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างหลังการอบ (กรัม)

w4 = น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

S = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

### ก-3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสโดยใช้เครื่อง HPLC

#### สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

Test Method Used:	Refer to WI-RES-HPLC-001
Test Equipment:	High Performance Liquid Chromatograph, 1100, Hewlett Packard, Germany
Test technique:	Reverse phase high performance liquid chromatograph
Mobile phase:	Acetonitrile: Water (75:25, v/v), 1.5 ml/min
Detector:	Refractive index detector (RID)
Injection volume:	20 $\mu$ L, temperature 35 $^{\circ}$ C

### ก-4 การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะซิติกโดยใช้เครื่อง GC

#### สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

Column:	HP-INNOWAX 19091 N-133
Column description:	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายนอก 0.251 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายใน 0.251 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร
Column temperature:	120 $^{\circ}$ C (15 $^{\circ}$ C จนถึง 120 $^{\circ}$ C)
Detector:	Flame - ionized detector (FID)
Detector FID:	Heater 250 $^{\circ}$ C

Carrier gas, flow rate: Helium, 2 มิลลิลิตรต่อนาที

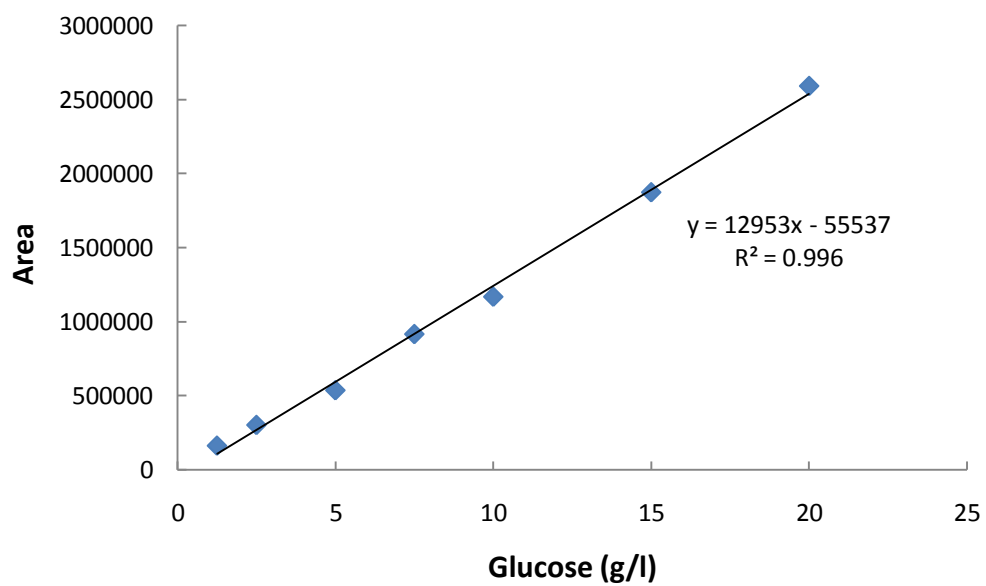
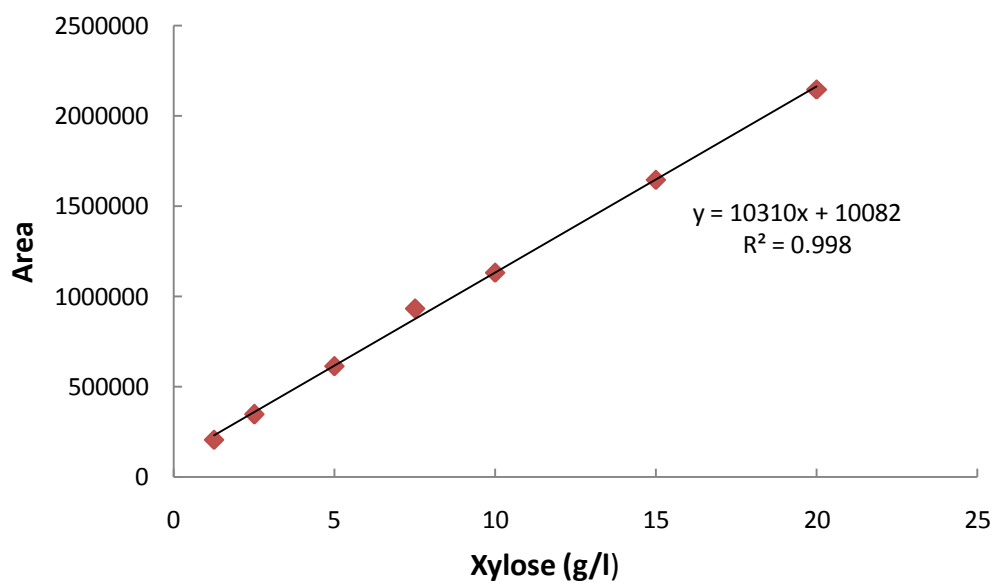
Oven:

Oven	Rate (°C/min)	Value (°C)	Hold Time (min)
initial		110	1
Ramp 1	15	200	9
Ramp 2	15	230	7

## ภาคผนวก ข

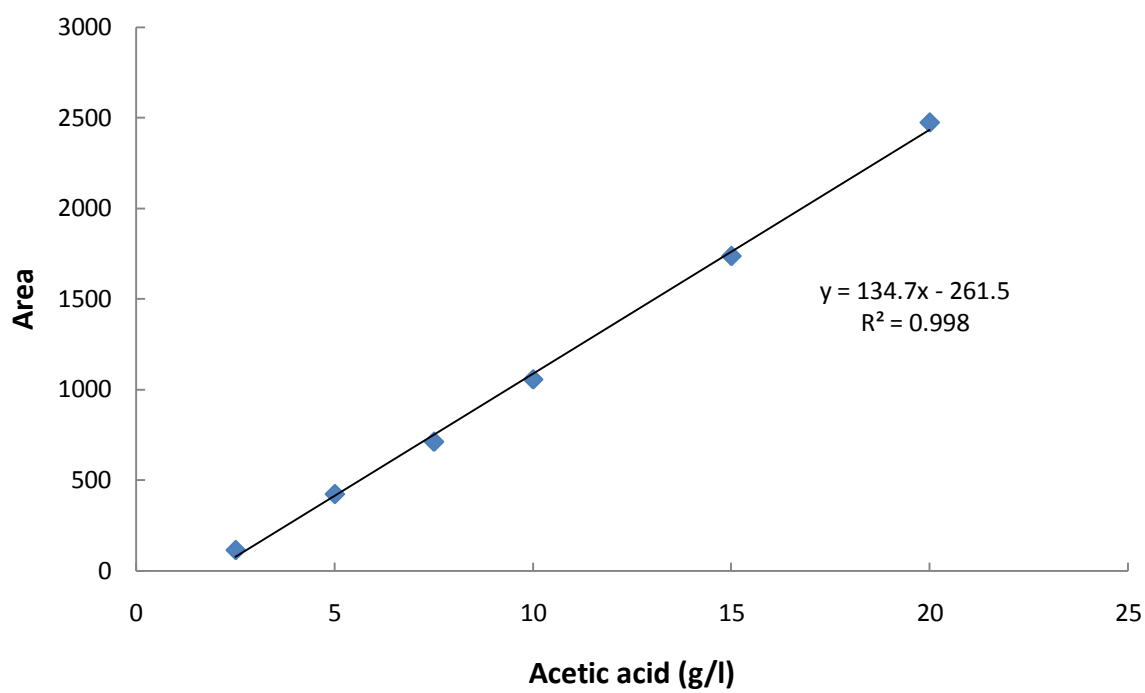
## กราฟมาตรฐาน

ข-1 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสจากเครื่องHPLC





ข-2 กราฟมาตรฐานของกรดอะซิติกจากเครื่อง GC



## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลดิบ

## ค-1. ข้อมูลผลของน้ำหนักหลังการปรับสภาพวัตถุดิบ

การปรับสภาพ	weight(g) หลัง pre-treat (นน. เริ่มต้น 20 g)				S	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
non-pre	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00	0.00
Water (s)	17.39	17.23	17.48	17.37	0.13	0.72
Water (t)	16.90	16.81	16.61	16.77	0.11	0.63
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	17.29	17.40	17.57	17.42	0.09	0.53
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	16.73	16.50	16.70	16.64	0.10	0.62
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	15.48	15.60	15.73	15.60	0.07	0.47
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	13.83	13.60	13.53	13.65	0.06	0.45
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	11.87	11.62	11.69	11.73	0.05	0.46
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	11.41	11.59	11.35	11.45	0.12	1.05
5 NaOH (s)	12.13	12.38	12.47	12.33	0.07	0.59
10 NaOH (s)	11.18	11.29	11.00	11.16	0.15	1.30
15 NaOH (s)	10.08	10.27	10.36	10.24	0.06	0.62
5 NaOH (t)	10.94	10.79	11.00	10.91	0.11	0.97
10 NaOH (t)	8.50	8.89	8.71	8.70	0.11	1.23
15 NaOH (t)	8.85	8.62	8.99	8.82	0.19	2.10
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	12.20	12.48	12.41	12.36	0.06	0.47
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	10.08	10.20	10.37	10.22	0.09	0.92
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	8.63	8.45	8.67	8.58	0.11	1.29
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	9.80	9.77	9.65	9.74	0.06	0.64
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	6.08	6.34	6.25	6.22	0.06	0.98
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	7.40	7.59	7.26	7.42	0.17	2.23
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	8.30	8.11	8.00	8.14	0.07	0.89
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	9.30	9.24	9.02	9.19	0.11	1.25

ค-2. ข้อมูลองค์ประกอบ (Cellulose) ของวัตถุดิบ

การปรับสภาพ	Cellulose (%)				S	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
non-pre	50.11	49.69	50.04	49.95	0.23	0.45
Water (s)	34.17	34.79	34.00	34.32	0.42	1.21
Water (t)	38.24	38.36	38.19	38.26	0.09	0.23
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	33.78	33.25	33.88	33.64	0.34	1.01
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	34.79	34.44	34.90	34.71	0.24	0.69
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	36.47	35.98	36.29	36.25	0.25	0.68
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	42.47	42.84	42.96	42.76	0.26	0.60
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	37.79	37.23	38.06	37.69	0.42	1.12
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	33.12	33.57	33.48	33.39	0.24	0.71
5 NaOH (s)	47.00	47.40	47.23	47.21	0.20	0.43
10 NaOH (s)	48.98	48.22	48.55	48.58	0.38	0.78
15 NaOH (s)	49.99	49.03	49.42	49.48	0.48	0.98
5 NaOH (t)	52.58	52.25	52.47	52.43	0.17	0.32
10 NaOH (t)	55.99	55.27	55.38	55.55	0.39	0.70
15 NaOH (t)	60.03	60.32	59.59	59.98	0.37	0.61
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	27.36	27.90	27.00	27.42	0.45	1.65
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	27.42	26.76	26.99	27.06	0.34	1.24
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	40.00	39.70	39.91	39.87	0.15	0.39
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	40.78	40.12	40.20	40.37	0.36	0.89
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	32.13	32.47	32.55	32.38	0.22	0.69
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	31.56	31.11	31.95	31.54	0.42	1.33
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	29.99	29.15	29.56	29.57	0.42	1.42
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	29.43	29.57	29.09	29.36	0.25	0.84
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-3. ข้อมูลองค์ประกอบ (Hemicellulose) ของวัตถุดิบ

การปรับสภาพ	Hemicellulose (%)				S	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
non-pre	20.71	20.43	20.99	20.71	0.28	1.35
Water (s)	24.09	24.44	24.26	24.26	0.18	0.72
Water (t)	28.64	28.93	28.88	28.82	0.16	0.54
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.68	5.79	5.53	5.67	0.13	2.30
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	6.95	6.83	6.61	6.80	0.17	2.54
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	7.15	7.2	7.09	7.15	0.06	0.77
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	10.53	10.59	10.65	10.59	0.06	0.57
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	11.15	11.14	11.08	11.12	0.04	0.34
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	14.56	14.35	14.36	14.42	0.12	0.82
5 NaOH (s)	25.56	25.86	25.99	25.80	0.22	0.85
10 NaOH (s)	27.56	27.35	27.95	27.62	0.30	1.10
15 NaOH (s)	30.38	30.27	30.44	30.36	0.09	0.28
5 NaOH (t)	33.99	33.82	33.73	33.85	0.13	0.39
10 NaOH (t)	30.23	30.36	30.17	30.25	0.10	0.32
15 NaOH (t)	27.16	27.14	27.27	27.19	0.07	0.26
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	4.54	4.6	4.36	4.50	0.12	2.78
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	4.16	4.25	4.17	4.19	0.05	1.18
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	0.56	0.57	0.59	0.57	0.02	2.66
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	0.87	0.79	0.83	0.83	0.04	4.82
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	2.45	2.39	2.41	2.42	0.03	1.26
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	2.82	2.87	2.97	2.89	0.08	2.65
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.47	2.59	2.53	2.53	0.06	2.37
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.33	2.21	2.19	2.24	0.08	3.38
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-4. ข้อมูลองค์ประกอบ (Lignin) ของวัตถุดิบ

การปรับสภาพ	Lignin (%)				S	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
non-pre	9.20	9.45	9.35	9.33	0.13	1.35
Water (s)	24.35	24.46	24.68	24.50	0.17	0.69
Water (t)	26.09	26.22	26.45	26.25	0.18	0.69
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	43.35	43.61	43.22	43.39	0.20	0.46
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	46.08	46.15	46.36	46.20	0.15	0.32
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	50.23	50.54	50.92	50.56	0.35	0.68
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	45.56	45.98	45.55	45.70	0.25	0.54
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	47.24	47.35	47.12	47.24	0.12	0.24
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	41.61	41.36	41.42	41.46	0.13	0.31
5 NaOH (s)	20.12	20.25	20.36	20.24	0.12	0.59
10 NaOH (s)	23.35	23.78	23.47	23.53	0.22	0.94
15 NaOH (s)	17.87	17.92	17.74	17.84	0.09	0.52
5 NaOH (t)	4.71	4.98	4.76	4.82	0.14	2.98
10 NaOH (t)	5.98	5.83	6.1	5.97	0.14	2.27
15 NaOH (t)	6.48	6.69	6.46	6.54	0.13	1.95
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	26.45	26.73	26.93	26.70	0.24	0.90
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	25.47	25.98	25.77	25.74	0.26	1.00
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	8.58	8.95	8.81	8.78	0.19	2.13
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	7.98	7.68	7.81	7.82	0.15	1.92
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	13.79	13.45	13.37	13.54	0.22	1.65
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	18.29	18.25	18.11	18.22	0.09	0.52
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	19.90	19.87	19.47	19.75	0.24	1.22
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	15.63	15.27	15.12	15.34	0.26	1.71
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-5. ข้อมูลผลของการย่อยน้ำตาลไซโลสด้วย 2% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> xylose (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	18.717	18.730	18.724	18.724	0.007	0.035
Water (s)	17.992	18.014	17.985	17.997	0.015	0.084
Water (t)	15.479	15.473	15.475	15.476	0.003	0.021
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.200	5.202	5.180	5.194	0.012	0.236
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	4.910	4.926	4.895	4.910	0.015	0.307
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.815	5.803	5.795	5.804	0.010	0.170
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	7.259	7.246	7.256	7.253	0.007	0.095
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	10.568	10.525	10.520	10.538	0.026	0.251
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	10.014	9.989	9.993	9.999	0.014	0.136
5 NaOH (s)	29.539	30.513	29.842	29.965	0.499	1.664
10 NaOH (s)	30.033	28.274	29.668	29.325	0.929	3.166
15 NaOH (s)	30.727	30.949	31.100	30.926	0.188	0.607
5 NaOH (t)	20.900	21.008	20.988	20.965	0.057	0.273
10 NaOH (t)	12.814	12.314	12.708	12.612	0.263	2.087
15 NaOH (t)	15.700	15.744	15.729	15.724	0.023	0.144
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) -->NaOH(s)	12.828	12.668	12.714	12.737	0.083	0.648
NaOH(s) -->H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	13.486	13.470	13.473	13.476	0.009	0.065
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	0.222	0.226	0.228	0.225	0.003	1.376
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	0.231	0.229	0.229	0.230	0.001	0.483
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	0.510	0.508	0.509	0.509	0.001	0.120
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	0.193	0.178	0.177	0.182	0.009	4.816
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	7.775	7.807	7.792	7.791	0.016	0.210
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.121	2.129	2.125	2.125	0.004	0.192
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-6. ข้อมูลผลของการย่อน้ำตาลไซโลสด้วย 6% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 6% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , xylose (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	20.127	20.130	20.116	20.124	0.008	0.039
Water (s)	17.498	17.487	17.476	17.487	0.011	0.064
Water (t)	12.458	12.558	12.513	12.509	0.050	0.401
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	8.348	8.354	8.344	8.349	0.005	0.063
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	8.407	8.419	8.421	8.416	0.008	0.092
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	8.935	8.946	8.941	8.940	0.006	0.063
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	14.331	14.368	14.340	14.346	0.020	0.137
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	15.310	15.314	15.311	15.312	0.002	0.015
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	12.404	12.398	12.403	12.402	0.003	0.026
5 NaOH (s)	34.946	35.005	35.127	35.026	0.092	0.264
10 NaOH (s)	36.413	38.122	37.156	37.230	0.857	2.301
15 NaOH (s)	33.572	33.975	33.519	33.689	0.250	0.741
5 NaOH (t)	27.517	28.995	28.026	28.179	0.751	2.664
10 NaOH (t)	27.062	26.956	26.983	27.000	0.055	0.204
15 NaOH (t)	18.256	18.278	18.264	18.266	0.011	0.060
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	12.908	12.913	12.912	12.911	0.003	0.023
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	12.418	12.404	12.416	12.413	0.007	0.058
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	0.262	0.252	0.260	0.258	0.005	2.012
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	0.287	0.302	0.302	0.297	0.008	2.857
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	0.446	0.429	0.440	0.438	0.009	2.013
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	0.500	0.505	0.501	0.502	0.003	0.511
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	6.299	6.326	6.330	6.318	0.017	0.270
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	6.998	6.999	6.989	6.995	0.005	0.076
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-7. ข้อมูลผลของการย่อยน้ำตาลไซโลสด้วย 10% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> xylose (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	18.917	18.917	18.907	18.913	0.006	0.031
Water (s)	15.236	15.236	15.226	15.226	0.006	0.039
Water (t)	19.898	19.898	19.888	19.896	0.006	0.029
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	8.068	8.068	8.099	8.085	0.018	0.223
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	8.878	8.878	8.876	8.880	0.001	0.012
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	9.190	9.190	9.195	9.189	0.003	0.028
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	10.719	10.719	10.721	10.726	0.001	0.013
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	17.108	17.108	17.111	17.106	0.002	0.011
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	18.975	18.975	18.976	18.977	0.001	0.004
5 NaOH (s)	28.106	28.106	28.054	28.061	0.030	0.107
10 NaOH (s)	40.076	40.076	40.135	40.027	0.034	0.84
15 NaOH (s)	39.524	39.524	39.500	39.526	0.013	0.034
5 NaOH (t)	25.755	25.755	25.731	25.731	0.014	0.053
10 NaOH (t)	24.216	24.216	24.210	24.214	0.003	0.014
15 NaOH (t)	25.235	25.235	25.214	25.229	0.012	0.047
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) -->NaOH(s)	9.533	9.533	9.415	9.462	0.068	0.717
NaOH(s) -->H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	7.718	7.718	7.720	7.720	0.001	0.017
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	0.526	0.526	0.530	0.532	0.002	0.424
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	0.707	0.707	0.691	0.700	0.009	1.297
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	7.534	7.534	7.553	7.542	0.011	0.142
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	7.543	7.543	7.556	7.546	0.007	0.098
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	8.205	8.205	8.215	8.212	0.006	0.074
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	8.230	8.205	8.225	8.234	0.014	0.165
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						



ค-8. ข้อมูลผลของการย่อน้ำตาลกลูโคสด้วย 2% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , glucose (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	3.797	3.801	3.797	3.798	0.002	0.060
Water (s)	3.142	3.122	3.142	3.136	0.011	0.365
Water (t)	3.132	3.133	3.113	3.126	0.011	0.357
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.647	1.628	1.643	1.639	0.010	0.605
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.115	2.064	2.102	2.094	0.027	1.282
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.554	2.531	2.526	2.537	0.015	0.592
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.020	2.984	2.997	3.000	0.018	0.603
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	1.919	1.905	1.907	1.910	0.008	0.418
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	1.161	1.149	1.155	1.155	0.006	0.478
5 NaOH (s)	7.958	7.952	7.954	7.955	0.003	0.038
10 NaOH (s)	12.044	12.039	12.042	12.042	0.003	0.023
15 NaOH (s)	7.987	9.490	9.507	8.995	0.873	9.701
5 NaOH (t)	9.219	9.229	9.218	9.222	0.006	0.065
10 NaOH (t)	14.265	14.252	14.257	14.258	0.006	0.045
15 NaOH (t)	9.314	9.360	9.321	9.332	0.025	0.264
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	2.356	2.394	2.400	2.383	0.024	1.005
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.566	2.541	2.553	2.553	0.012	0.481
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	2.894	2.908	2.904	2.902	0.007	0.244
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.297	2.328	2.462	2.362	0.088	3.709
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	2.397	2.400	2.400	2.399	0.002	0.089
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	2.363	2.350	2.354	2.356	0.007	0.277
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	0.961	0.978	0.956	0.965	0.012	1.213
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.838	1.832	1.828	1.833	0.005	0.269
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-9. ข้อมูลผลของการย่อยน้ำตาลกลูโคสด้วย 6% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 6% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> glucose (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	2.668	2.671	2.677	2.672	0.005	0.173
Water (s)	2.759	2.750	2.764	2.758	0.007	0.244
Water (t)	3.039	3.042	3.039	3.040	0.002	0.058
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.506	2.501	2.497	2.501	0.005	0.182
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.966	2.968	2.971	2.968	0.002	0.076
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.941	2.932	2.933	2.935	0.005	0.155
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.394	2.397	2.397	2.396	0.002	0.076
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.376	2.370	2.384	2.377	0.007	0.289
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.347	2.349	2.350	2.349	0.001	0.052
5 NaOH (s)	6.399	6.398	6.397	6.398	0.001	0.013
10 NaOH (s)	5.744	5.743	5.747	5.745	0.002	0.037
15 NaOH (s)	9.093	9.097	9.096	9.096	0.002	0.025
5 NaOH (t)	9.803	9.814	9.815	9.811	0.006	0.064
10 NaOH (t)	16.249	16.251	16.251	16.250	0.001	0.008
15 NaOH (t)	11.211	11.213	11.220	11.215	0.005	0.044
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) -->NaOH(s)	1.071	1.066	1.071	1.070	0.003	0.266
NaOH(s) -->H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.010	1.024	1.015	1.016	0.007	0.736
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	6.082	6.064	6.065	6.070	0.010	0.167
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	5.726	5.728	5.727	5.727	0.001	0.015
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	1.591	1.591	1.591	1.591	0.000	0.009
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	3.802	3.792	3.793	3.796	0.005	0.142
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.872	3.871	3.881	3.875	0.006	0.148
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.771	1.774	1.771	1.772	0.002	0.089
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-10. ข้อมูลผลของการย่อยน้ำตาลกลูโคสด้วย 10% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> glucose (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	2.158	2.155	2.166	2.160	0.006	0.260
Water (s)	0.811	0.816	0.819	0.815	0.004	0.471
Water (t)	1.057	1.056	1.054	1.056	0.001	0.133
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.730	2.732	2.732	2.731	0.002	0.055
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	4.358	4.361	4.353	4.357	0.004	0.091
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.083	2.076	2.080	2.079	0.004	0.172
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	5.445	5.444	5.444	5.444	0.000	0.008
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	5.008	4.996	4.996	5.000	0.007	0.131
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	4.653	4.653	4.645	4.650	0.005	0.103
5 NaOH (s)	6.078	6.078	6.081	6.079	0.002	0.028
10 NaOH (s)	5.362	5.371	5.371	5.368	0.005	0.096
15 NaOH (s)	6.829	6.831	6.829	6.830	0.001	0.020
5 NaOH (t)	8.070	8.076	8.083	8.076	0.007	0.086
10 NaOH (t)	6.036	6.059	6.047	6.047	0.012	0.190
15 NaOH (t)	7.592	7.607	7.599	7.599	0.007	0.096
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	6.539	6.583	6.547	6.556	0.023	0.352
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	6.095	6.104	6.101	6.100	0.005	0.074
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	6.391	6.398	6.396	6.395	0.004	0.060
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	5.792	5.789	5.790	5.790	0.002	0.026
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	1.038	1.038	1.038	1.038	0.000	0.004
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	1.042	1.043	1.044	1.043	0.001	0.114
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	1.017	1.019	1.018	1.018	0.001	0.061
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.021	1.020	1.005	1.015	0.009	0.862
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-11. ข้อมูลผลของการย่อยกรดอะซิติกด้วย 2% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> acetic acid (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	4.305	4.302	4.310	4.305	0.004	0.095
Water (s)	6.594	6.589	6.588	6.590	0.003	0.044
Water (t)	5.301	5.695	5.559	5.518	0.200	3.621
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.261	5.952	5.341	5.518	0.378	6.852
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.411	5.307	5.348	5.355	0.052	0.973
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	5.661	4.813	5.358	5.277	0.430	8.143
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	4.598	4.646	4.628	4.624	0.024	0.527
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.366	3.624	3.492	3.494	0.129	3.695
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.256	3.057	3.117	3.143	0.102	3.246
5 NaOH (s)	3.682	4.006	3.774	3.820	0.167	4.369
10 NaOH (s)	5.297	5.385	5.349	5.343	0.044	0.828
15 NaOH (s)	3.874	3.900	3.871	3.882	0.015	0.398
5 NaOH (t)	4.110	3.611	3.871	3.864	0.249	6.454
10 NaOH (t)	3.307	3.104	3.164	3.191	0.104	3.271
15 NaOH (t)	3.752	3.454	3.550	3.585	0.152	4.237
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	4.804	4.943	4.857	4.868	0.070	1.439
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	4.572	4.682	4.614	4.623	0.055	1.198
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	1.877	1.821	1.849	1.849	0.028	1.525
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.914	2.743	2.824	2.827	0.085	3.024
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	3.969	3.341	3.386	3.566	0.350	9.822
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	2.207	2.028	2.043	2.093	0.099	4.735
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.668	3.645	3.715	3.676	0.036	0.971
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	1.881	1.841	1.836	1.853	0.024	1.320
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ค-12. ข้อมูลผลของการย่อยกรดอะซิติกด้วย 6% กรดซัลฟิวริก

การปรับสภาพ	Hydrolysis 6% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> acetic acid (g/l)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	S	%RSD
non-pre	3.970	4.033	4.121	4.041	0.076	1.881
Water (s)	5.528	5.491	5.460	5.493	0.034	0.625
Water (t)	6.045	6.065	6.099	6.070	0.028	0.455
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	7.160	7.124	7.240	7.175	0.060	0.830
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	6.765	6.767	6.254	6.595	0.296	4.488
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	7.997	7.183	7.428	4.041	0.418	5.541
0.2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	7.103	7.408	7.415	7.308	0.178	2.437
0.5 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	5.853	6.277	5.361	5.830	0.459	7.864
0.8 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	4.350	4.576	4.458	4.461	0.113	2.541
5 NaOH (s)	5.180	5.051	4.992	5.074	0.096	1.895
10 NaOH (s)	4.100	4.379	3.952	4.144	0.217	5.236
15 NaOH (s)	2.866	3.498	3.352	3.239	0.331	10.221
5 NaOH (t)	4.838	5.093	4.688	4.873	0.205	4.203
10 NaOH (t)	6.166	5.954	6.032	6.050	0.107	1.768
15 NaOH (t)	6.958	7.204	7.057	7.073	0.124	1.752
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(s)	4.531	5.302	4.614	4.816	0.423	8.794
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	4.305	4.614	4.724	4.548	0.217	4.774
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(t)	3.618	3.485	3.559	3.554	0.066	1.868
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	2.274	2.241	2.223	2.246	0.026	1.154
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s) --> NaOH(t)	2.729	2.890	2.698	2.772	0.103	3.719
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t) --> NaOH(s)	2.585	2.800	2.567	2.651	0.129	4.878
NaOH(s) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (t)	3.214	3.870	3.128	3.404	0.406	11.923
NaOH(t) --> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	2.029	2.002	1.993	2.008	0.019	0.945
<p>***หมายเหตุ (s) หมายถึงการปรับสภาพด้วยวิธีการแช่ (t) หมายถึงการปรับสภาพโดยใช้ความร้อน</p>						

ภาคผนวก ง  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



**School of  
Chemical Engineering**

King Mongkut's  
Institute of Technology  
Ladkrabang



**TIChE**

The Thai Institute of  
Chemical Engineering  
and Applied Chemistry



**EIT**

The Engineering  
Institute of Thailand  
Under H.M. The King's  
Patronage



# The 4<sup>th</sup> TIChE

International Conference

## 2014

**"CHANGES:**

*Cleaner Energy,*

*Leaner Processes,*

*Better Living"*

**DATE:**

December  
18-19, 2014

**VENUE:**

Furama Hotel  
Chiangmai, Thailand

**SPONSORS:**



The 4<sup>th</sup> TChE International Conference 2014  
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"  
 Chiang Mai, Thailand, December 18-19, 2014



## Effect of Different Physiochemical Methods Pretreatment on Xylose Amount in Oil Palm Empty Fruit Bunch

Piyanut Piakong<sup>1</sup> and Chayanoot Sangwichien<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chemical Engineering, Faculty of Engineering  
 Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

\* Piyanut Piakong: E-mail piyanut-psu@hotmail.com  
 Chayanoot Sangwichien: E-mail chayanoot.s@psu.ac.th

**Abstract**— Oil palm empty fruit bunch (OPEFB) is a lignocellulosic (cellulose, hemicelluloses and lignin) material from palm oil plantations, potential source of xylose which can be used as a raw material for Xylitol production. The increasing interest on use of lignocellulosic waste for bioconversion to fuels and chemicals are justifiable as these materials are renewable, low cost and widespread sources of sugars. In this study the fractionation of chemical components; cellulose, hemicellulose, and lignin of OPEFB by separation hydrolysis, find the optimal conditions for pretreatment. The optimal condition for the hydrolysis preparation was also investigated by using autoclave for xylose production and determination of chemical compounds, content of sugar and the structure of pretreated hydrolysis were investigated. Hemicelluloses, cellulose and lignin contents of OPEFB were 20.71, 49.95 and 9.33 % respectively. Effect of sodium hydroxide, sulfuric acid and water pretreatment were studied to optimize the pretreatment process in order to obtain a high amount of xylose. The results showed that the chemical content of hemicelluloses (33.85% wt), cellulose (52.43% wt) and lignin (4.82% wt) were obtained when the samples were pretreated with sodium hydroxide (5% wt) with autoclave compared with others. The maximum value of xylose obtained was 38.18 g/l by using the above condition for or alkali pretreatment at 121 °C for 20 min and hydrolysis with 6% sulfuric acid. It was found that the maximum value of glucose concentration was 16.25 g/l by 10% alkali pretreatment.

**Keywords:** oil palm empty fruit bunch, lignocelluloses, xylose, and glucose

### I. INTRODUCTION

Lignocellulose biomass is the most abundant organic material on earth and also promising raw material for bio-energy production. The present major bio-material in Thailand was sugarcane molasses, starch from cassava and oil palm empty fruit bunch (OPEFB). The OPEFB was agricultural residue in the process of bio-oil extraction, is an abundant and low-cost lignocellulose material. OPEFB is a suitable renewable raw material for bioconversion into value added products because it is easily accessible, abundant locally and rich in lignocellulose. In the past, OPEFB was often used as fuel to generate steam at the palm oil mills. However, the air-pollution from OPEFB burning caused serious environmental concerns as air-pollution from such activities.

Utilization of the OPEFB gives an added value for this material and a solution for the removal of this abundant waste, solving a problem of the bio-oil industry and increasing the economical yield of the process. The OPEFB has a potential for sugars production, contains cellulose, hemicellulose and lignin. These materials must be hydrolysed into their corresponding monomers to produce xylose and glucose. It has been estimated of fermentable sugars xylose and glucose from OPEFB is about 70% of its main components (Umikalsom et al. 1997) [9]. Xylose can be obtained by selective acid hydrolysis of the hemicellulose fraction of OPEFB. Previous studies of the principal components of empty fruit bunch using quantitative acid hydrolysis give the following composition of the main components as shown in Table 1.



The 4<sup>th</sup> TIChE International Conference 2014  
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"  
 Chiang Mai, Thailand, December 18-19, 2014



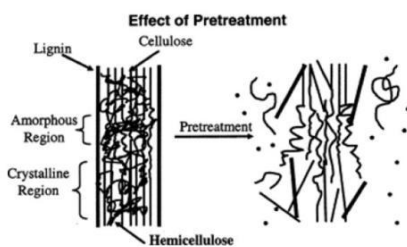
**Table 1**

Main components of oil palm empty fruit bunch fibre (dry basis) from acid hydrolysis: Umikalsom et al. (1997).

Main fraction	Composition (%)
Cellulose	50.4±1.2
Hemicellulose	21.9±1.7
Lignin (acid insoluble)	10.0±1
Ash	0.5±0.02
Others	17.2±4.32

The existence of lignin hinders the penetration of chemical into the hemicellulose and cellulose. Pretreatment generally refers to the disruption of the naturally resistant lignin shield that limits the accessibility of enzymes or chemicals to the hemicellulose and cellulose. The main goal of pretreatment is to break the lignin seal to increase the pore size of the biomass and disrupt the crystalline structure of hemicellulose and cellulose (Figure 1). Pretreatment techniques have generally been divided into three categories: physical, chemical, and biological pretreatment. Each pretreatment method has its own advantages and disadvantages, and no single pretreatment approach is suitable for all biomass species.

**Figure 1: Schematic of goals of pretreatment on lignocellulosic material. [3]**



Although xylose was the main sugar obtained from hemicellulose, other sugars such as glucose and arabinose were also produced in a low amount during the hydrolysis process. Xylose can be used as substrate for production of

a wide variety of compounds by chemical and biochemical processes. Hemicellulosic hydrolysates made from such residues have been frequently utilized in studies for developing a technically and economically viable bioprocess for obtaining xylitol.

## II. MATERIALS AND METHODS

### 1. Raw material

Oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fiber was obtained from local palm oil washed with tap water to remove soil and other particles, sun-dried and ground to a particle size <1 mm. The homogenized OPEFB biomass was then oven-dried at 105 °C for overnight.

### 2. Alkali pretreatment

20 g of dry OPEFB with no physical treatment was soaked in NaOH solution within the concentration 5, 10 and 15% with OPEFB:NaOH ratio of 1:20 (w/v) stirred at ambient temperature for 4 h, and then recovered from the alkali solution. The alkaline treated OPEFB in the wet solid state was heated in an autoclave at 121°C for 20 minutes, neutralized by water washing to remove NaOH on the surface of the OPEFB and then filtered. The neutralized sample of OPEFB was dried in oven at 90°C for 24 hour. The dried OPEFB was crushed to mesh size of 0.75-1 mm by the Hammer mill machine. The compositions of EPFBF were analyzed for hemicellulose, cellulose and lignin by the AOAC method.

### 3. Acid and water pretreatment

20 g of dry OPEFB with no physical treatment was soaked in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution within the concentration 0.2, 0.5 and 0.8% with a OPEFB: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ratio of 1:20 (w/v) and heated in an autoclave at 121°C for 20 minutes, neutralized by water washing to remove H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on the surface of the OPEFB and then filtered. The neutralized sample of OPEFB was dried in oven at 90°C for 24 hour. The dried OPEFB was crushed to mesh size of 0.75-1 mm by the Hammer mill machine. The compositions of OPEFB were analyzed for hemicellulose, cellulose and lignin by the AOAC method after that use the optimum condition to pretreated OPEFB by acid and water.

### 4. Acid hydrolysis

Two g of dried OPEFB was mixed with 2, 6 and 10% concentration of sulfuric acid to a final volume of 40 ml. The acid hydrolysis reactions were carried out in an autoclave. Operating temperature of hydrolysis at 121°C and samples were collected at 20 minutes. After which the hydrolysate was cooled down to room temperature, solids were separated from aqueous solution by filtration. The filtrate was analyzed for determination of glucose.



### 5. Analytical methods

Xylose and glucose in the acid hydrolysate were analyzed by High Performance Liquid Chromatograph (HPLC, SHIMADZU) using SUPELCOSIL LC-NH2 column and RI detector. Aqueous acetonitrile (75%) was used as mobile phase with flow rate of 1.5 ml/min and oven temperature was maintained at 50 °C.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### 1. Characteristics of raw OPEFB material

Lignin is a complex and large molecular structure containing cross-linked polymers of phenolic monomers. It is present in the primary cell wall, imparting structural support, impermeability, and resistance against microbial attack. Alkali pretreatment is able to break the lignin seal to increase the pore size of the biomass and disrupt the crystalline structure of hemicellulose and cellulose. Therefore alkali pretreatment causes weight lost over then acid pretreatment and water pretreatment. From Table 2 showed the weight after pretreatment of OPEFB component of alkali, acid and water pretreatment. The initial weight of OPEFB was 20 g, after pretreatment in an autoclave at 121°C for 20 minutes and dry in oven, the remaining weight was shown in Table 2.

To identify the composition of the raw material OPEFB before chemical pretreatment, the contents of cellulose, hemicellulose, and lignin were analyzed according to the AOAC method. The chemical composition is shown in Fig 2. Fig. 2 also showed OPEFB treated by difference chemical such as NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and water compared with untreated OPEFB. It was result

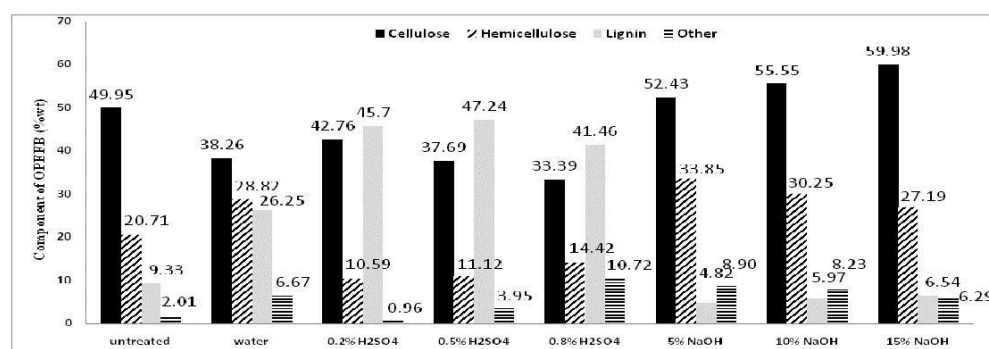
found that the largest amount of cellulose and hemicellulose of OPEFB treated by NaOH were 59.98 and 33.85% respectively with a minimal amount of lignin as well. When pretreated with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and water, the amount of cellulose decreased because H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and water can degrade hemicellulose and also hydrolysis of cellulose. As a result, the amount of cellulose decreased.

**Table 2 Weight after pretreatment of OPEFB component of differential pretreatment**

Pretreatment	Weight after pretreatment (g)
Untreated	20.00
Water	16.77
0.2% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	13.65
0.5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11.73
0.8% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11.45
5% NaOH	10.91
10% NaOH	8.71
15% NaOH	8.22

\*\* Weight after pretreatment: The initial weight was 20 g.

**Figure 2 Component in OPEFB after pretreated by chemical methods (with water, 0.2-0.8% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 5-15% NaOH) and untreated at 121°C, reaction time of 20 minutes**



The 4<sup>th</sup> TIChE International Conference 2014  
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"  
 Chiang Mai, Thailand, December 18-19, 2014



Acid hydrolysis with  $H_2SO_4$  concentration maintained 6% at 121°C, reaction time of 20 minutes. It was observed that release of xylose and glucose that show in Table 3 and Table 4. The result found that the amount of xylose of OPEFB treated by 5% NaOH was highest (38.18 g/l) and highest glucose 16.25 g/l when pretreated with 10% NaOH.

**Table 3 The amount of xylose**

Pretreatment method	Xylose (g/l)		
	Hydrolysis with $H_2SO_4$		
	2%	6%	10%
Untreated	18.72	20.12	18.91
Water	15.48	12.50	19.90
0.2% $H_2SO_4$	9.19	14.34	10.73
0.5% $H_2SO_4$	10.54	15.31	17.11
5% NaOH	20.97	38.18	25.73
10% NaOH	12.61	27.00	24.21
15% NaOH	15.72	18.27	25.23

**Table 4 The amount of glucose**

Pretreatment method	Glucose (g/l)		
	Hydrolysis with $H_2SO_4$		
	2%	6%	10%
Untreated	3.80	2.67	3.80
Water	3.13	3.04	1.06
0.2% $H_2SO_4$	3.00	2.40	5.44
0.5% $H_2SO_4$	1.91	2.38	5.00
5% NaOH	9.22	9.81	8.08
10% NaOH	14.25	16.25	6.05
15% NaOH	9.33	11.22	7.60

Pretreatment of OPEFB by NaOH was suitable to increase the amount of hemicellulose for hydrolysis to achieve high xylose and glucose yield compared with untreated OPEFB as reported by Rahman et al (2007)[7]. Optimum  $H_2SO_4$  concentration and reaction time obtained under operating temperature of 120°C was 6% and 15 min, respectively. It was observed in this study that release of xylose and glucose were higher as shown in table 5.

**Table 5 The amount of xylose and glucose**

Sample	Concentration of analyzed, g/l	
	Xylose	Glucose
This research	38.18	16.25
Data reported by Rahman et al.	29.40	2.34

#### IV. CONCLUSION

Alkali pretreatment of OPEFB biomass was carried out with NaOH solution conditions to obtain high value of hemicellulose. It was found that under optimum conditions, hemicellulose yield was 33.85% when operating temperature, reaction time and NaOH concentration were 121 °C, 20 min and 5%, respectively.

This condition comparison of component in OPEFB after pretreated by chemical methods and untreated, found that pretreatment of OPEFB by NaOH was suitable to increase the amount of hemicellulose for hydrolysis to achieve high xylose yield. Xylose, 38.18 g/L was achieved when reaction was carried out at 121 °C for time period of 20 min with  $H_2SO_4$  concentration maintained at 6%.

Thus it is to be mentioned that under controlled treatment conditions, OPEFB waste can be fruitfully utilized as a potential source of xylose, which can be a starting raw material for production of ethanol by microbial conversion process.

The conditions employed in the chosen pretreatment method will affect various substrate characteristics, which, in turn govern the susceptibility of the substrate to hydrolysis of the released sugars. Therefore, pretreatment of biomass is an extremely important step in the synthesis of biofuels from lignocellulosic biomasses, and there is a critical need to understand the fundamentals of various processes, which can help in making a suitable choice depending on the structure of the biomass substrate and the hydrolysis agent. Various pretreatment techniques change

The 4<sup>th</sup> TIChE International Conference 2014  
 "Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living"  
 Chiang Mai, Thailand, December 18-19, 2014



the physical and chemical structure of the lignocellulosic biomass and improve hydrolysis rates of OPEFB. Pretreatment was a novel procedure for which the elimination of mostly lignin enhanced the surface area and the porosity within the OPEFB, thus providing more cellulase accessibility toward the cellulosic structure for high glucose production as a fermentable sugar. This phenomenon further confirms that NaOH pretreatment is better than H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pretreatment because alkali pretreatment process is to break down the lignin structure and disrupt the crystalline structure of cellulose and hemicellulose so that the acids or enzymes can easily access.

#### Acknowledgment

The authors would like to thank Faculty of Engineering, Prince of Songkla University for financially support.

#### REFERENCE

- [1] Aziz, A.A., Das, K., Husin, M. and Mokhtar, A. Effect of physical and chemical Pretreatment on xylose and glucose production from oil palm pressed fiber. *J.Oil Palm Res.* 14, 2002, 10-17.
- [2] Bai-Yan C., Jing-Ping G., Hong-Zhi L., Ke-Ke C. and Wen-Xiang P. Statistical optimization of dilute sulfuric acid pretreatment of corncob for xylose recovery and ethanol production, biomass and bio energy. 36, 2012, 250-257.
- [3] Zhang, B and Shahbazi, A. Recent Developments in Pretreatment Technologies for Production of Lignocellulosic Biofuels, *Petroleum & Environmental Biotechnology.* 2011, 1-8.
- [4] Delgenes, J.P., Moletta, R. and Navarro, J.M. Effect of lignocelluloses degradation products on ethanol fermentation of glucose and xylose by *Saccharomyces cerevisiae*, *Zymomonas mobilis*, *Pichia stipitis*, and *Candida shehatae*. *Enzyme Microb Tech.* 19, 1996, 220-225.
- [5] Dongxu Z., Yee L.O., Zhi L., Jin C.W. Optimization of dilute acid-catalyzed hydrolysis of oil palm empty fruit bunch for high yield production of xylose, *Chemical Engineering Journal.* 181– 182, 2012, 636– 642.
- [6] Rahman, S.H.A., Choudhury, J.P. and Ahmad, A.L. Production of xylose from oil palm empty fruit bunch. *Biochemical Engineering Journal.* 30, 2006, 97-103.
- [7] Rahman, S.H.A., Choudhury, J.P. Ahmad, A.L. and Kamaruddin, A.H. Studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose. *Bioresource Technology.* 98, 2007, 554-559.
- [8] Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y., Holtzapple, M., and Ladisch, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology.* 96, 2005, 673-686.
- [9] Seonghun, K., Jang, M.P., Seo, J.W. and Chul, H.K. Sequential acid-/alkali-pretreatment of empty palm fruit bunch fiber. *Bioresource Technology.* 109, 2012, 229–233.
- [10] Umikalsom, M.S., Ariff, A.B., Zulkifli, H.S., Tong, C.C., Hass, M.A. and Karim, M.I.A. The treatment of oil palm empty fruit bunch for subsequent as substrate for cellulose production by *Chaetomium globosum*. *Bioresource Technology.* 62, 1997, 1-9.
- [11] Yunus, R., Salleh, S.F., Abdullah, N., Biak, D.R. Effect of ultrasonic pretreatment on low temperature acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch. *Bioresour Technol.* 101, 2010, 9792–979



