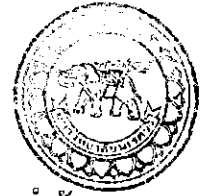


อภิบาลกิจการ



สำนักหอสมุด



การเตรียมน้ำตาลรีตีวซ์จากกากตะกอนน้ำมันปาล์ม  
ด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว  
REDUCING SUGAR PRODUCTION FROM DECANter CAKE  
PALM OIL BY SOLUTION PLASMA PROCESS

นายศักดิ์ดา  
นายศุภชัย

อินกรัต  
แก้วเกลี้ยง

รหัส 55361700  
รหัส 55362769

1392282

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันที่รับเข้า 27 มี.ค. 2561
เลขทะเบียน 17238277 ✓
เลขเรียกหนังสือ ปส

ศ 31 ก  
๒๕๖

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปีการศึกษา 2558



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การเตรียมน้ำตาลรีตีฟจากกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ  
พลาสมาวิทยุภาคของเหลว

ผู้ดำเนินโครงการ นายศักดิ์ อินกรัด รหัส 55361700

นายศุภชัย แก้วเกลี้ยง รหัส 55362769

ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

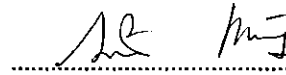
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2558

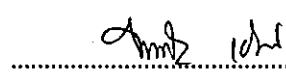
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ผศ.ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)

  
.....กรรมการ

(รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล)

  
.....กรรมการ

(ดร.วัฒนชัย เขาวรัตน์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การเตรียมน้ำตาลรีตีวซ์จากกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ พลาสติกภาควิชาของเหลว		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายศักดิ์ อินกรัต	รหัส	55361700
	นายศุภชัย แก้วเกลี้ยง	รหัส	55362769
ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2558		

#### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ศึกษาการเตรียมน้ำตาลรีตีวซ์จากกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสติกภาควิชาของเหลวโดยใช้กรด 3 คือ กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นของกรดที่ศึกษาคือ 0.02 – 0.16 โมลาร์ ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสติก 15 – 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์มเริ่มต้น 0.5 – 2 กรัม โดยมีการตรวจวัดน้ำตาลรีตีวซ์ด้วยเทคนิค DNS และตรวจวัดค่าซีไอดีด้วยเทคนิค Open Reflux Method

จากผลการทดลองพบว่ากรดซัลฟิวริกให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีตีวซ์สูงกว่ากรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดจะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีตีวซ์สูงขึ้น เมื่อเพิ่มความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสติกจะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีตีวซ์สูงขึ้น และกากตะกอนน้ำมันปาล์มเริ่มต้น 1 กรัม ให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีตีวซ์สูงกว่าที่ 0.5 และ 2 กรัม ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสติกภาควิชาของเหลวคือใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์มเริ่มต้น 1 กรัมต่อตัวทำละลายกรด 100 มิลลิลิตร และความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสติก 30 กิโลเฮิร์ตซ์ จะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีตีวซ์ที่ร้อยละ 67 และจากการตรวจวัดค่าซีไอดีพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสติกทำให้ได้ค่าซีไอดีที่สูงขึ้น

## ABSTRACT

This research studied reducing sugar production from decanter cake palm oil by solution plasma process. The study was performed by using different types of acid including nitric acid, hydrochloric acid, and sulfuric acid. Concentration of acid solution was studied at 0.02 – 0.16 M. Frequency of power supply at 15 – 30 kHz and the concentration of decanter cake palm oil as 0.5 – 2 w/v were used. The total reducing sugar was determined by DNS method at well as COD was analyzed by open reflux method.

The results showed that reducing sugar production from decanter cake palm oil by solution plasma process using sulfuric acid as solvent was high in comparison to those of nitric acid and hydrochloric acid. Percent yield was increased when the concentration of acid solution and frequency of power supply were increased. Furthermore reducing sugar production using 1 g of decanter cake palm oil was higher than those of 0.5 g and 2 g of decanter cake palm oil. The optimum conditions for hydrolysis of decanter cake palm oil to provide the highest percent yield of reducing sugar were 1 g of decanter cake palm oil, 0.16 M sulfuric acid solution and 30 kHz frequency of power supply. In addition, the COD of plasma-treated decanter cake was increased.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ ผศ.ดร.อิศรารุท ประเสริฐสังข์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธีแก้ปัญหา รวมไปถึงข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนความดูแลใส่ใจ ติดตามการดำเนินโครงการ มาโดยตลอดและขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเคมีและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณบุคคลผู้ดูแลและสถานที่ห้องปฏิบัติการเคมีที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแลอบรมสั่งสอน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม  
นายศักดิ์ดา อินกรัต  
นายศุภชัย แก้วเกลี้ยง

พฤษภาคม 2559

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 สถานที่ในดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กากตะกอนน้ำมันปาล์ม.....	5
2.2 เซลลูโลส.....	5
2.3 เฮมิเซลลูโลส.....	7
2.4 ลิกนิน.....	12
2.5 น้ำตาลรีดิวซ์.....	13
2.6 การวิเคราะห์เยื่อใยโดยใช้สารฟอก.....	14
2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาล.....	15
2.8 การวิเคราะห์หาค่าซีไอดี (Chemical Oxygen Demand ; COD).....	15
2.9 กระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว.....	16
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	24
3.2 วิธีการทดลอง.....	26
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 องค์ประกอบของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม.....	31
4.2 ผลของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์.....	31
4.3 ผลของชนิดกรดต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์.....	33
4.4 ผลของความเข้มข้นกรดต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์.....	36
4.5 ผลของความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์.....	38
4.6 ผลของปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์มเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์.....	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก.....	51

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม.....	31
ตารางที่ 4.2 ช่วงของค่า pKa หรือค่าการแตกตัวของกรดในน้ำ.....	34





## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสในลักษณะเชื่อมกันระหว่างชั้น.....	6
รูปที่ 2.3 ชั้นเซลลูโลสแบบผลึกและไม่เป็นผลึก.....	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของไซแลนเอมิเซลลูโลส.....	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของแมนแนนเอมิเซลลูโลส.....	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของไซโลกูลูแคน.....	9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของแมนแนน.....	10
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของกาแลคแตน.....	10
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของอาราบินโนกาแลคแตน.....	11
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของอาราบินแนน.....	11
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของมอนอเมอร์พื้นฐานของลิกนิน.....	12
รูปที่ 2.12 รูปแบบโครงสร้างของส่วนของลิกนินไม้ก๊อก.....	13
รูปที่ 2.13 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค DNS.....	15
รูปที่ 2.14 แบบจำลองของพลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	17
รูปที่ 2.15 แผนภาพของการผลิตพลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	18
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	26
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	29
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เวลาต่างๆ โดยใช้กรดซัลฟิวริก 0.16 โมลาร์	32
รูปที่ 4.2 กลไกการย่อยสลายด้วยหมู่ว่องไวของกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว.....	33
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เวลาและชนิดของกรดที่แตกต่างกัน ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	34
รูปที่ 4.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด.....	35
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เวลาต่างๆโดยใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ (a) กรดไนตริก (b) กรดไฮโดรคลอริก (c) กรดซัลฟิวริก.....	37
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความถี่ที่ต่างกัน.....	39
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงพลังงานต่อพัลส์กับความถี่.....	40
รูปที่ 4.8 ผลของความถี่พลาสมาต่อค่าซีไอดี ที่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์.....	41
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ปริมาณสารตั้งต้นที่ต่างกัน.....	42

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันทั่วโลกมีการขยายตัวของทางด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และการขนส่งเป็นอย่างมาก ทำให้ความต้องการใช้พลังงานโดยเฉพาะพลังงานจากฟอสซิลเพิ่มขึ้นตามด้วย พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ ในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอ มีราคาที่เหมาะสม และมีคุณภาพที่ดี สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และสามารถตอบสนองความต้องการใช้ ในกิจกรรมการผลิตต่างๆ ได้อย่างเพียงพอ ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนของเชื้อเพลิงสูงขึ้นและเกิดวิกฤติภาวะขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิง ดังนั้นในหลายประเทศจึงมีการวิจัยและพัฒนาทางด้านพลังงานทดแทน โดยเฉพาะพลังงานจากเอทานอล (Ethanol) เนื่องจากเอทานอลเป็นพลังงานสะอาด สามารถนำมาทดแทนพลังงานจากฟอสซิลได้เป็นอย่างดี [1-3] กากวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมการเกษตรหรือวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เป็นวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ ส่วนใหญ่มีเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างของผนังเซลล์ [4] โดยทั่วไปจะเป็นกากวัสดุที่เหลือจากการผลิตน้ำมันปาล์ม กากจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยส่วนมากการกำจัดกากวัสดุเหล่านี้จะนำไปเป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยและนำไปทำเป็นอาหารสัตว์ซึ่งถือว่ามีมูลค่าต่ำ [7] จึงได้มีการคิดค้นหาหนทางนำส่วนกากวัสดุเหล่านี้มาเพื่อทำให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่าหลากหลายแนวทาง และหนึ่งนั้นก็คือการนำมาเพิ่มมูลค่าเป็นน้ำตาลกลูโคสเพื่อผลิตเป็นพลังงานทางเลือกจากชีวมวล อาทิเช่น เอทานอล

กระบวนการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันมี 2 วิธี คือ การย่อยสลายทางเคมีด้วยกรด และการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ [5,6] ในกระบวนการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสด้วยกรด อาทิ กรดไฮโดรคลอริกและกรดอะซิติก นิยมดำเนินการในสภาวะที่รุนแรงและอุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายผลิตภัณฑ์น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยสลายโดยเฉพาะน้ำตาลกลูโคส เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงและต้นทุนสูง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ต้องทนต่อการกัดกร่อน การกำจัดกรดออกจากผลิตภัณฑ์มีหลายขั้นตอนและสามารถทำได้ยากสำหรับกระบวนการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ มีความจำเพาะเจาะจงในการเข้าทำปฏิกิริยาจะส่งผลให้ย่อยลิกโนเซลลูโลสได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่มีความบริสุทธิ์ ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ในสภาวะที่ไม่รุนแรง อุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงมาก อย่างไรก็ตามการย่อยสลายแบ่งด้วยเอนไซม์จะมีข้อเสียคือกระบวนการมีความซับซ้อนและต้นทุนของเอนไซม์สูง

กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นกระบวนการใหม่ที่ถูกค้นพบโดย O.Takai [8] ซึ่งได้รับความนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ การบำบัดน้ำเสียการฆ่าเชื้อ และการย่อยสลายสารอินทรีย์ กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตอนุมูลอิสระที่มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี อาทิ อนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical, OH•) อนุมูลไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคัล (Hydroperoxyl radical, HO<sub>2</sub>•) อิเล็กตรอนอิสระ (Free electron, e<sup>-</sup>) และออกซิเจนไอออน (Oxygen ion, O<sup>-</sup>) จากรายงานการวิจัยของ I. Prasertsung และคณะ [9-10] ซึ่งได้ศึกษาการย่อยสลายพอลิแซ็กคาริไรด์ชนิดโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว พบว่าโคโตซานที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมามีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง เนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งถูกผลิตขึ้นในระหว่างกระบวนการพลาสมาและความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาสามารถเกิดการย่อยสลายและทำลายความเป็นผลึกของโคโตซานส่งผลให้เกิดการย่อยสลาย จากรายงานการวิจัยของ O. Pornsunthorntawe และคณะ [11] ซึ่งได้ศึกษาการย่อยสลายโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวร่วมกับการเติมโลหะเชิงซ้อน พบว่าการเติมโลหะเชิงซ้อนชนิดคอปเปอร์-ไอออน (Cu<sup>2+</sup>) ไอรอนไอออน (Fe<sup>2+</sup>) และไอรอนไอออน (Fe<sup>3+</sup>) ส่งผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลและค่าความหนืดของโคโตซานลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้เติมโลหะเชิงซ้อน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมโลหะเชิงซ้อนทำให้ความสามารถในการย่อยสลายโคโตซานด้วยพลาสมาเพิ่มขึ้น จากรายงานดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายพอลิแซ็กคาริไรด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากในกระบวนการไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมี ไม่ซับซ้อน และวัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์ม (Decanter cake palm oil) ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ในการศึกษาการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะดำเนินการภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรงโดยใช้น้ำและกรดเจือจาง โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาคือ ปริมาณสารตั้งต้นที่เหมาะสม เวลาที่ใช้ในการทรีตพลาสมา ชนิดของตัวทำละลาย ความเข้มข้นของตัวทำละลาย และพลังงานพลาสมา สารแขวนลอยลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาจะถูกนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ อาทิ การตรวจวัดผลิตภัณฑ์น้ำตาลรีดิวซ์ และค่า BOD ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปพัฒนากระบวนการการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากลิกโนเซลลูโลสแบบใหม่เพื่อทดแทนกระบวนการที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ การใช้กรด และการใช้เอนไซม์ ที่มีความซับซ้อนและต้นทุนสูง โดยน้ำตาลรีดิวซ์ที่เตรียมได้สามารถนำไปผลิตพลังงานทางเลือกจากชีวมวล อาทิ เอทานอล ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์จากกากตะกอนน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณลักษณะของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม

1.3.2 เตรียมสารแขวนลอยกากตะกอนน้ำมันปาล์มในตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร แล้วนำไป ทรีทด้วยพลาสมาโดยมีตัวแปรดังนี้

1.3.2.1 ปริมาณสารตั้งต้นในช่วง 0-2 กรัม

1.3.2.2 เวลาที่ใช้ในการทรีทพลาสมาในช่วง 0-5 ชั่วโมง

1.3.2.3 ชนิดของตัวทำละลาย คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก

1.3.2.4 ความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดในช่วง 0-0.16 โมลาร์

1.3.2.5 พลังงานของพลาสมาโดยการปรับความถี่ในช่วง 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์

1.3.3 ตรวจวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยพลาสมาวิฤภาคของเหลวและคุณลักษณะของกากตะกอนน้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการทรีทด้วยพลาสมา

1.3.3.1 ตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic Acid Method (DNS)

1.3.3.2 ตรวจวัดค่า Biochemical Oxygen Demand (BOD)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์โดยการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสที่อยู่ในกากของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว ซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่ใช้เวลาไม่มาก และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะมากนัก

## 1.5 สถานที่ในดำเนินงานวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

## 1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ตั้งแต่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 ถึง 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

## 1.7 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัย		ช่วงเวลา																
		ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.						
1.7.1	วางแผนการดำเนินงานวิจัย	←→																
1.7.2	ศึกษาค้นคว้าข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย		←→															
1.7.3	ทำการทดลอง			←→														
1.7.4	วิเคราะห์ผลการทดลอง										←→							
1.7.5	สรุปผลการทดลอง											←→						
1.7.6	จัดทำรูปเล่มรายงาน						←→						←→					

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กากตะกอนน้ำมันปาล์ม [12]

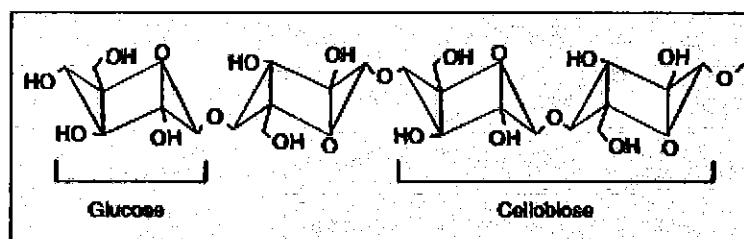
กากตะกอนน้ำมันปาล์มเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ในประเทศไทยส่วนมากมักนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการกลั่นน้ำมันบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 85-87 ร้อยละ 10 จะใช้ในอุตสาหกรรมไบโอดีเซลและส่งออกต่างประเทศ ส่วนที่เหลือป้อนเข้าสู่โรงงานสุปุ่และอาหารสัตว์ประมาณร้อยละ 3-5 ทั้งยังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมในกระบวนการผลิตปุ๋ยหมัก กากตะกอนน้ำมันปาล์มเป็นสารประกอบประเภทลิกโนเซลลูโลส มีองค์ประกอบของน้ำ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก

#### 2.2 เซลลูโลส

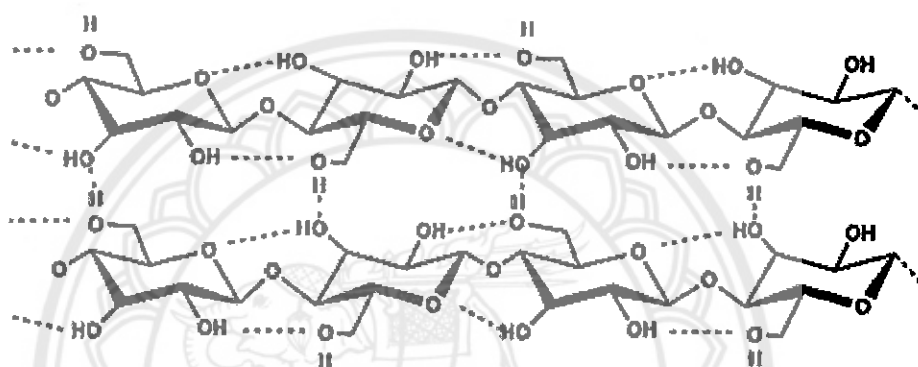
เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่พบมากที่สุดในสารประกอบประเภทลิกโนเซลลูโลส เซลลูโลสเป็นทรัพยากรทดแทนอินทรีย์ที่มีมากที่สุดในโลก พบมากในพืช แบคทีเรีย สาหร่ายทะเล และชีวมวล เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของพืช รวมถึงสัตว์และแบคทีเรียบางชนิดแต่น้อยมากเมื่อเทียบกับพืช แม้ว่าพืชจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบของผนังเซลล์แตกต่างกัน ปริมาณเซลลูโลสจะมีประมาณร้อยละ 35-50 ของน้ำหนักแห้ง และฝ้ายพบเกือบร้อยละ 100 เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) เชิงเส้น ไม่ละลายน้ำ กรดเจือจางและเบสเจือจางที่อุณหภูมิปกติ [12]

##### 2.2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [13-18]

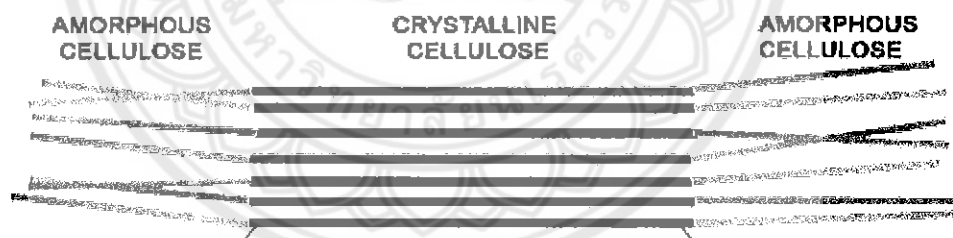
สมการเคมีของเซลลูโลสคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  โดย  $n$  เรียกว่าองศาของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of Polymerization) ปังบอกถึงจำนวนกลูโคสประมาณ 100-10000 โมเลกุล เซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยซ้ำของดี-กลูโคส (D-glucose) เชื่อมต่อกันตำแหน่ง เบต้า-1,4 ด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) เนื่องโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการจัดรูปแบบสลับข้างกันในลักษณะที่เรียกว่าโครงสร้างพอลิเมอร์แบบซินดิโอแทคติก (Syndio tactic) และหน่วยซ้ำของกลูโคสในเซลลูโลสเรียกว่าเซลโลไบโอส (Cellobiose) ดังรูปที่ 2.1 เซลลูโลสธรรมชาติพบแบบผลึกและไม่เป็นผลึก เกี่ยวพันกันอยู่เป็นชั้น ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 โดยส่วนของเซลลูโลสแบบผลึกจะพบหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นเครือข่ายก่อให้เกิดโครงสร้างแบบผลึกแน่น ส่วนเซลลูโลสแบบไม่เป็นผลึกพบหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นแบบอสัณฐาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [14]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสในลักษณะเชื่อมกันระหว่างชั้น [15]



รูปที่ 2.3 ชั้นเซลลูโลสแบบผลึกและไม่เป็นผลึก [16]

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิแตกต่างกันสามารถละลายเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบโพลีเมอร์ที่แตกต่างกัน ชนิดของเซลลูโลสแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.2.1.1 แอลฟา-เซลลูโลส คือ เซลลูโลสที่ละลายในร้อยละ 16.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบโพลีเมอร์มากกว่า 200

2.2.1.2 เบต้า-เซลลูโลส คือ เซลลูโลสที่ถูกสกัดออกหลังจากการทำให้เป็นกลางจากสารละลายกรดและเบส มีองค์ประกอบโพลีเมอร์ประมาณ 10-200

2.2.1.3 แคมม่า-เซลลูโลส คือ ส่วนที่เหลือในสารละลายที่ถูกทำให้เป็นกลาง มีองศาพอลิเมอร์เฉลี่ยน้อยกว่า 10

## 2.2.2 กระบวนการย่อยสลายเซลลูโลส [19-21]

ปฏิกิริยาการย่อยสลายหรือไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบโมเลกุลใหญ่เป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก โดยเซลลูโลสซึ่งเป็นดี-กลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกยากต่อการย่อยสลาย นอกจากนี้ตามธรรมชาติแล้วยังพบลิกนินซึ่งเป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยเซลลูโลสคือ กลูโคส สามารถปัจจุบันนิยมทำ 2 วิธี คือ

2.2.2.1 การย่อยสลายด้วยกรด แบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ คือกระบวนการย่อยสลายด้วยกรดเข้มข้นและกระบวนการย่อยสลายด้วยกรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก เป็นต้น ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายได้ดีที่อุณหภูมิสูง ผลผลิตที่ได้เป็นกลูโคส เฟอร์ฟิวรอล (Furfural) และ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรอล (5-Hydroxymethylfurfural, HMF) โดยเฟอร์ฟิวรอล และ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรอลเป็นสารพิษซึ่งมีผลต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตกลูโคสเป็นสารชนิดอื่นด้วยวิธีการหมัก มีข้อดีคือใช้เวลาน้อยกว่าการย่อยสลายด้วยเอนไซม์และอาจจะไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนการย่อยสลาย

2.2.2.2 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายเป็นผลผลิตจากเชื้อราและแบคทีเรีย เอนไซม์เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่มีชีวิตสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาภายในเซลล์และมีความจำเพาะต่อสารตั้งต้น จึงให้ไม่สูญเสียผลิตภัณฑ์ระหว่างเกิดการย่อยสลาย เอนไซม์ที่มีความสำคัญในการย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสคือ เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase enzyme)

เอนไซม์เซลลูเลสเป็นเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยเซลลูโลส มีความจำเพาะเจาะจงสูง ไม่เกิดสารปนเปื้อนเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ทำหน้าที่ทำลายพันธะไกลโคซิดิกในเซลลูโลส ทำให้เกิดการสลายเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลเลกุลใหญ่ เซลโลไบโอส และกลูโคสตามลำดับ มีข้อดีคือเอนไซม์สามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำได้ มีความบริสุทธิ์สูง ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนต่อการกัดกร่อน

## 2.3 เฮมิเซลลูโลส

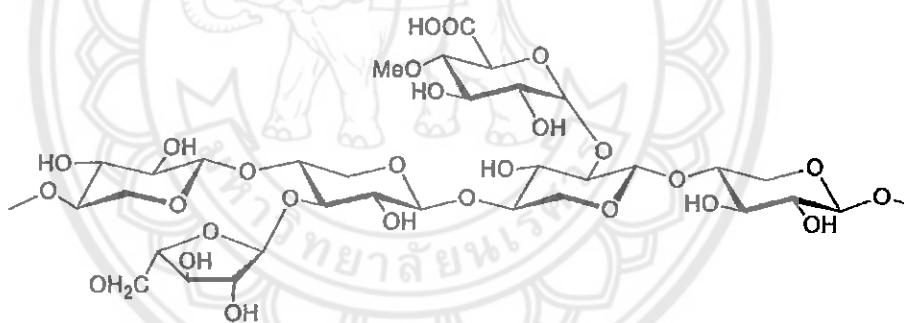
เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งที่พบในสารประกอบประเภทลิกโนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบหลักของเส้นใยพืช เฮมิเซลลูโลสง่ายที่จะทำการย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในกรดเจือจางร้อน หรือสารละลายร้อยละ 5 โซเดียมไฮดรอกไซด์เย็น



### 2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [13, 22-30]

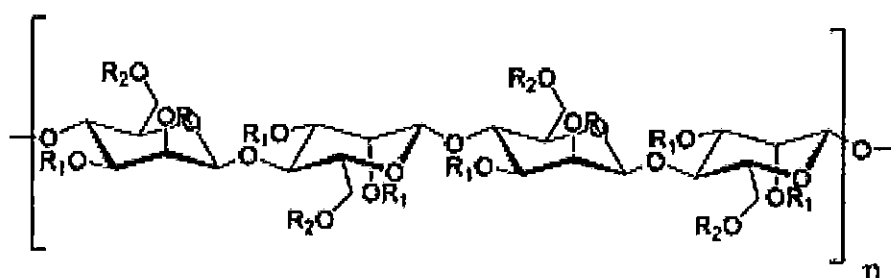
เฮมิเซลลูโลสเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ในพืชที่มีลักษณะเป็นสายโซ่อย่างง่าย ประกอบด้วย ดี-กลูโคส ดี-ไซโลส (D-xylose) ดี-แมนโนส (D-mannose) ดี-กาแลคโตส (D-galactose) และไกลโคซิล (Glycosyl) อื่นเป็นกิ่งเชื่อมต่อกับสายโซ่หลัก เฮมิเซลลูโลสเป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลากหลายชนิด โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสแตกต่างกันไปตามพืชชนิดต่างๆ สายโซ่หลักอาจประกอบไปด้วยไกลโคซิลหนึ่งหรือหลายชนิด และการเชื่อมกันของไกลโคซิลจะแตกต่างกัน โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสเป็นสารประเภทไกลแคน (Glycan) และมีองค์ประกอบหลัก คือ ไซแลน (Xylan) ไซโลกลูแคน (Xyloglucan) กลูโคแมนแนน (Glucomannan) แมนนา (Manna) กาแลคโตแมนแนน (Galactomannan) เซลลูโลส และอื่นๆ

2.3.1.1 ไซแลนเฮมิเซลลูโลส (Xylanhemicellulose) พืชส่วนมากมีไซแลนพบมากในไม้เนื้อแข็ง ดี-ไซโลซิล (D-xylosyl) เชื่อมกับโมเลกุลอื่นเป็นโฮโมพอลิเมอร์สายโซ่หลัก ไซแลนเป็นไกลแคนที่มี 1,4-เบต้า-ดี-ไซโลพิรานอส (1,4-β-D-xylopiranose) เป็นสายโซ่หลักและ กรด 4-ออกซิเมทิลกลูควิโรนิก (4-oxymethylglucuronic acid) เป็นกิ่ง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของไซแลนเฮมิเซลลูโลส [24]

2.3.1.2 แมนแนนเฮมิเซลลูโลส (Mannanhemicellulose) ไม้เนื้ออ่อนจะพบมาก แมนแนนเฮมิเซลลูโลส แมนโนสและกลูโคสเชื่อมด้วยพันธะเบต้าตำแหน่ง 1 กับ 4 เป็นพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันในสายโซ่หลักซึ่งอัตราส่วนระหว่างแมนโนสกับกลูโคสเป็น 1 ต่อ 3 สุ่มตำแหน่งอยู่ในโซ่หลัก กาแลคโตซิล (Galactosyl) เชื่อมกับแมนโนสและกลูโคสด้วยพันธะแอลฟาตำแหน่ง 1 และ 6 และอะซิติก (Acetyl) กระจายกันบนคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของแมนโนส ดังรูปที่ 2.5 องศาพอลิเมอไรเซชันเฉลี่ยมากกว่า 60



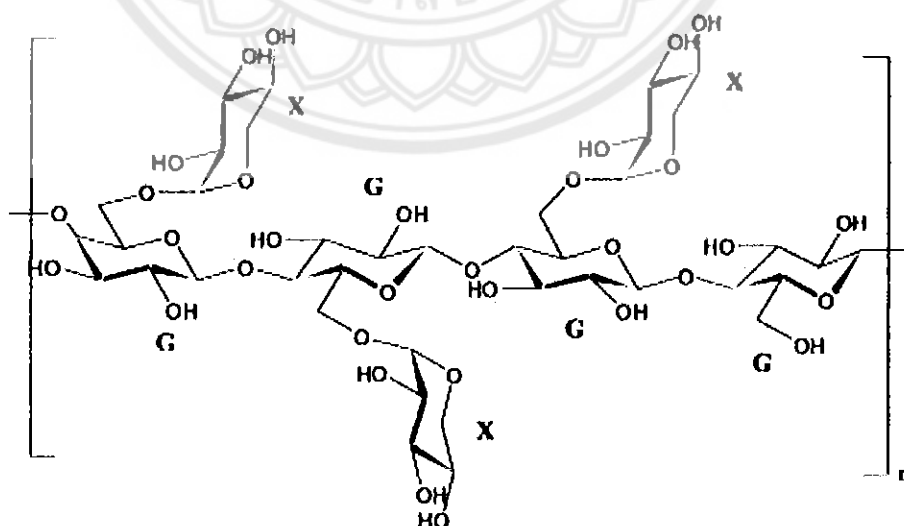
**Mannan:  $\beta$ 1,4-Man**

**$R_1 = \text{H- or Ac-}$**

**$R_2 = \text{H- or } \alpha\text{-Gal}$**

รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของแมนแนนเฮมิเซลลูโลส [25]

2.3.1.3 ไชโลกลูแคน สายโซ่หลักของไชโลกลูแคนประกอบด้วยดี-กลูโคพีรานอส (D-glucopyranose) เชื่อมกันด้วยพันธะเบต้าตำแหน่ง 1 กับ 4 และแอลฟา-ดี-ไซโลพีรานอส ( $\alpha$ -D-xylopyranose) ที่ตำแหน่งออกซิเจน 6 บนสายโซ่หลัก ดังรูปที่ 2.6 ไชโลกลูแคนองค์ประกอบหลักคือ กลูโคส ไชโลส และกาแลคโตส อัตราส่วน 4 ต่อ 3 ต่อ 1 ในพืชใบเลี้ยงคู่ แอลฟา-ไซโลส ( $\alpha$ -D-xylose) เชื่อมกับตำแหน่งออกซิเจน 6 ของเบต้า-กลูโคส ( $\beta$ -glucose) ที่ตำแหน่งปลายสายกาแลคโตสเชื่อมกับตำแหน่งออกซิเจน 2 ของไซโลสด้วยพันธะเบต้า ถ้ามีฟูโคส (Fucose) จะเชื่อมกับตำแหน่งออกซิเจน 2 ของกาแลคโตสด้วยพันธะแอลฟา บางครั้งพบอาราบินอส (Arabinose) ในปริมาณน้อยมาก แต่ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ไชโลส และกาแลคโตสจะพบได้น้อยกว่า

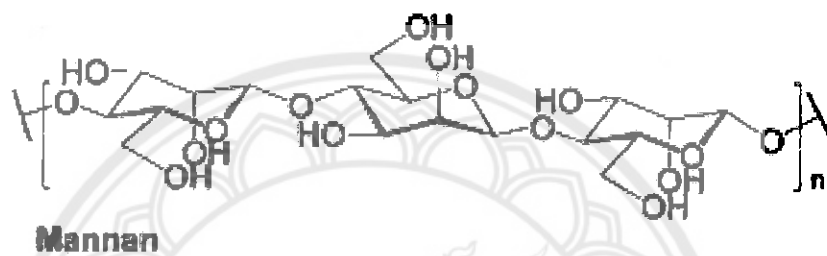


**Representative xyloglucan repeat unit**

**X = Xylose G = Glucose**

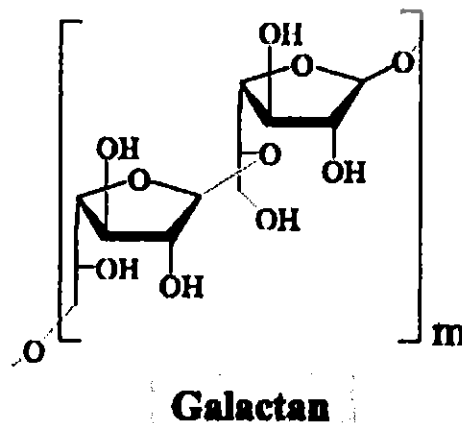
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของไชโลกลูแคน [26]

2.3.1.4 แมนแนน (Mannan) องค์ประกอบคือ แมนแนน กาแลคโตแมนแนน กลูโคแมนแนน กรดกลูควิโรนิกแมนแนน (Glucuronic acid mannan) และอื่นๆ แมนโนสเชื่อมด้วยพันธะเบต้าตำแหน่ง 1 กับ 4 เป็นแมนแนน ดังรูปที่ 2.7 ถ้ากาแลคโตสเชื่อมด้วยพันธะแอลฟาตำแหน่ง 1 กับ 6 เป็นกาแลคโตแมนแนน และกลูโคแมนแนนเป็นกลูโคสและแมนโนสเชื่อมด้วยพันธะเบต้าตำแหน่ง 1 กับ 4 ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 3 เมื่อมีกาแลคโตส 1 โมเลกุลเป็นกิ่งของกลูโคแมนแนนเรียกว่ากาแลคกลูโคแมนแนน (Galactglucomannan)

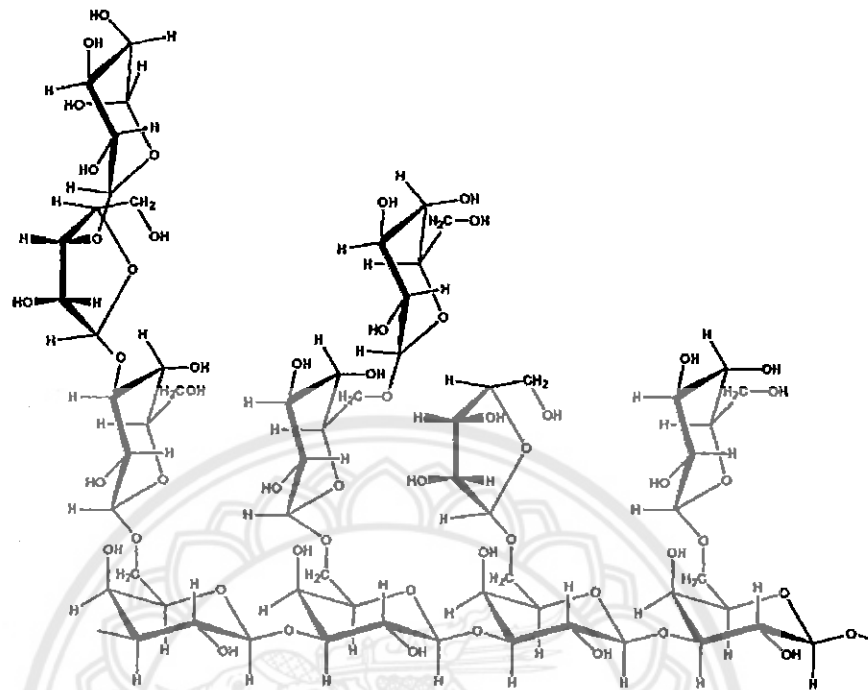


รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของแมนแนน [27]

2.3.1.5 กาแลคแตน (Galactan) และอาราบินอกาแลคแตน (Arabinogalactan) กาแลคโตสเชื่อมด้วยพันธะเบต้าตำแหน่ง 1 กับเกิดเป็นกาแลคแตน ดังรูปที่ 2.8 เมื่อปลายเป็นกาแลคโตสเชื่อมที่ตำแหน่งออกซิเจน 3 หรือ 6 กาแลคโตสเป็นกิ่งเชื่อมที่ตำแหน่งออกซิเจน 3 หรือ 6 อาราบินโนฟิวราโนส (Arabinofuranose) เชื่อมที่ตำแหน่งออกซิเจน 3 หรือ 5 เรียกว่าอาราบินอกาแลคแตนแบบปกติ และกาแลคโตสเป็นกิ่งเชื่อมที่ตำแหน่งออกซิเจน 3 หรือ 3 และออกซิเจน 6 อาราบินโนฟิวราโนสเชื่อมเป็นปลายสายหรือที่ตำแหน่งออกซิเจน 5 เป็นอาราบินอกาแลคแตนอีกชนิดหนึ่ง ดังรูปที่ 2.9

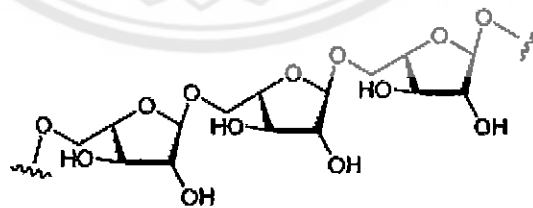


รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของกาแลคแตน [28]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของอาราบินอกาแลคแตน [29]

2.3.1.6 อาราบินแนน (Arabinan) อาราบินแนนทั้งหมดจะประกอบด้วยอาราบินโนส และแอลฟา-แอล-อาราบินโนฟิวราโนซิล ( $\alpha$ -L-arabinofuranosyl) เชื่อมกันที่ตำแหน่งคาร์บอน 5 เป็นสายโซ่หลัก ดังรูปที่ 2.10 อาราบินแนนมีกิ่งมากมายบ้างเป็นอาราบินโนฟิวราโนซิลเชื่อมกันที่ตำแหน่งออกซิเจน 2 หรือ 3 หรือทั้งคู่และส่วนหนึ่งเป็นกิ่งของอาราบินโนส



Arabinan

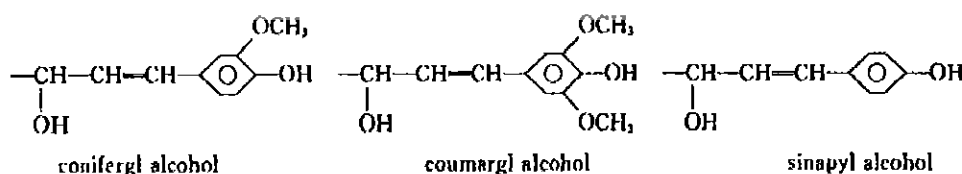
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของอาราบินแนน [30]

## 2.4 ลิกนิน

ลิกนินเป็นหนึ่งในสารอินทรีย์ที่พบมากในพืช เป็นองค์ประกอบเคมีเฉพาะของพืชดอกและพืชเมล็ดเปลือย ปริมาณของลิกนินที่พบในไม้ประมาณร้อยละ 20-40 ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ประกอบไปด้วยหน่วยฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) ในลักษณะเชื่อมโยงกันแบบสุ่มและไม่เป็นเส้นตรง โดยพบควมาริลแอลกอฮอล์ (Coumaryl alcohol) โคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ (Coniferyl alcohol) และไซนาพิลแอลกอฮอล์ (Sinapyl alcohol) เป็นสามมอนอเมอร์หลัก ดังนั้นจึงแบ่งลิกนินออกเป็น 3 ประเภทตามชนิดของมอนอเมอร์ คือ ไซริงจิลลิกนิน (Syringyl lignin) ซึ่งพอลิเมอร์ไรซ์ด้วยไซริงจิลโพรเพน (Syringyl propane) กัวไอซิลลิกนิน (Guaiacyl lignin) ซึ่งพอลิเมอร์ไรซ์ด้วยกัวไอซิลโพรเพน (Guaiacyl propane) และไฮดรอกซีฟีนิลลิกนิน (Hydroxy-phenyl lignin) ซึ่งพอลิเมอร์ไรซ์ด้วยไฮดรอกซีฟีนิลโพรเพน (Hydroxy-phenyl propane) มักพบกัวไอซิลลิกนินในพืชดอก กัวไอซิลกับไซริงจิลลิกนินในพืชใบเลี้ยงคู่ และกัวไอซิล ไซริงจิล ไฮดรอกซีฟีนิลลิกนินในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว [31]

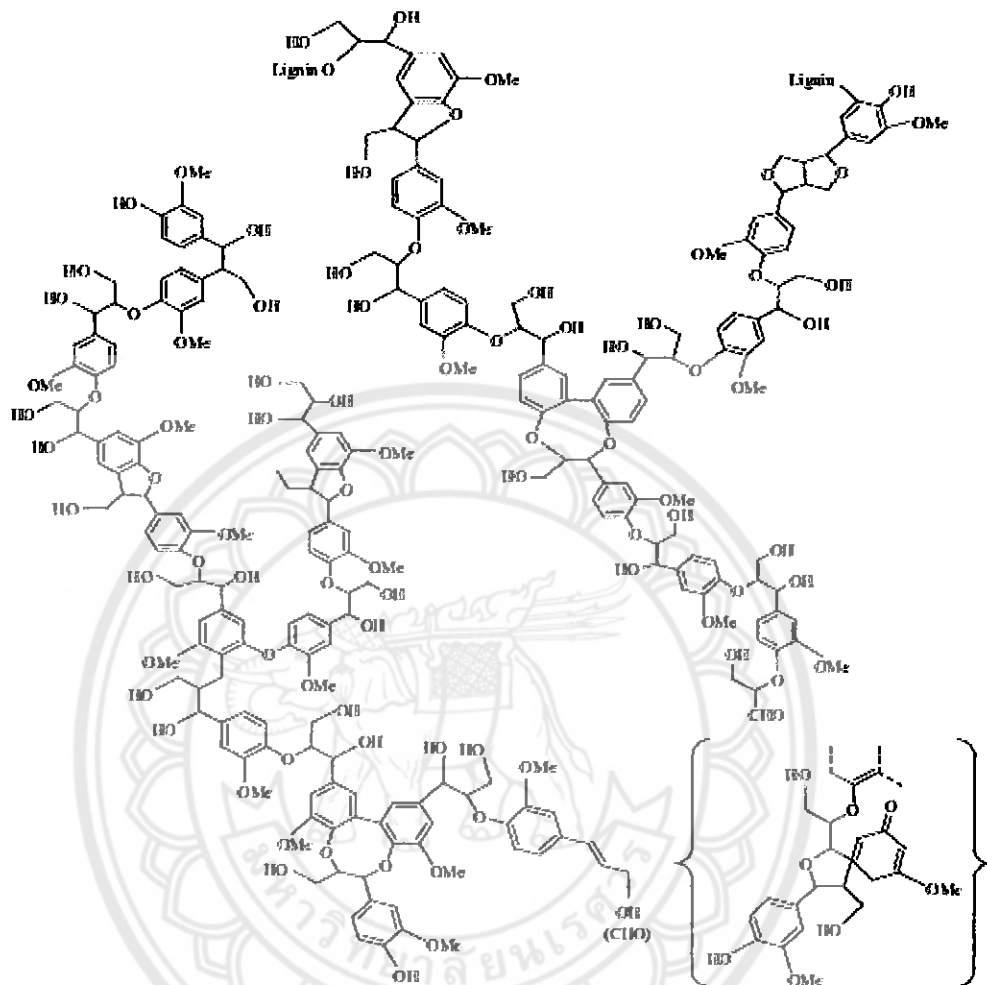
### 2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [31-33]

ลิกนินเป็นพอลิฟีนอลิกพอลิเมอร์ (Polyphenolic polymer) โครงข่ายสามมิติองค์ประกอบของหมู่แทนที่และพันธะจะแตกต่างกันแม้ว่าจะแยกได้จากพืชชนิดเดียวกันด้วยวิธีการต่างกันหรือแยกจากพืชต่างชนิดกัน มีหน่วยฟีนิลโพรเพนเป็นองค์ประกอบพื้นฐานเชื่อมโยงกับหน่วยอื่นในลักษณะที่ผิดปกติของพันธะระหว่าง คาร์บอนกับคาร์บอน และคาร์บอนกับออกซิเจน ลิกนินมีสามโครงสร้างมอนอเมอร์ คือ พี-ฟีนิลมอนอเมอร์ (P-phenyl monomer) จากควมาริลแอลกอฮอล์ (ชนิด H) กัวไอซิลมอนอเมอร์ (Guaiacyl monomer) จากโคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ (ชนิด G) และไซริงจิลมอนอเมอร์ (Syringyl monomer) จากไซนาพิลแอลกอฮอล์ (ชนิด S) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของมอนอเมอร์พื้นฐานของลิกนิน [32]

ประมาณ 2 ใน 3 ส่วนถึง 3 ใน 4 ส่วนของฟีนิลโพรเพนเชื่อมติดกันเป็นโครงสร้างด้วยพันธะอีเธอร์ (Ether bond) มีเพียงส่วนน้อยที่อยู่ในรูปฟีนอลิกไฮดรอกซิลอิสระ (Free phenolic hydroxyl) การเชื่อมพันธะระหว่างหน่วยพื้นฐาน เช่น เบต้า-ออกซิเจนตำแหน่งที่ 4 เบต้าตำแหน่งที่ 5 เบต้าตำแหน่งที่ 1 และอื่นๆ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปแบบโครงสร้างของส่วนของลิกนินไม้ก๊อก [33]

## 2.5 น้ำตาลรีดิวซ์ [34]

น้ำตาลรีดิวซ์ คือ น้ำตาลที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde) หรือคีโตน (Ketone) เป็นอิสระอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาล และสามารถถูกออกซิไดส์ (Oxidized) ได้ง่ายด้วยสารออกซิไดส์อย่างอ่อนที่ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 ของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทุกชนิดและเมื่อเกิดการรวมตัวกันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของน้ำตาลโมเลกุลหนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 จะทำให้มีหมู่รีดิวซ์ที่เหลืออยู่ สำหรับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุลที่รวมตัวกันแล้วไม่มีหมู่รีดิวซ์เหลืออยู่เรียกว่า น้ำตาลนอนรีดิวซ์

ตัวอย่างของน้ำตาลรีดิวซ์ ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทุกชนิด เช่น กลูโคส กาแล็กโทส และน้ำตาลฟรุกโทส (Fructose) เป็นต้น น้ำตาลโมเลกุลคู่บางชนิด ได้แก่ แล็กโทส (Lactose) น้ำตาล

มอลโทส (Maltose) และน้ำตาลเซลโลไบโอส โครงสร้างของน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่เป็นน้ำตาลรีดิวงซึ่งและนอนรีดิวง

## 2.6 การวิเคราะห์เยื่อใยโดยใช้สารฟอก (Detergent analysis) [43]

เยื่อใยเป็นสารประกอบทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญโดยเฉพาะพืชอาหารสัตว์ สารที่จัดเป็นเยื่อใยในพืชมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

วิธีการที่ใช้วิเคราะห์เยื่อใยที่ใช้ทดแทนวิธีแบบดั้งเดิม Weende method ที่ยังมีข้อบกพร่องในการวิเคราะห์เยื่อใยหยาบ จะมีเยื่อใยบางส่วนที่สามารถละลายได้ในกรด และด่าง จะละลายออกไปคือ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาด และในปี ค.ศ.1960, Dr.Van Soest ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของเยื่อใยต่างๆ โดยใช้สารฟอกและเรียกว่า Detergent fiber Analysis ซึ่งการวิเคราะห์เยื่อใยโดยใช้สารฟอกนี้สามารถแยกส่วนประกอบของเซลล์ออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

2.6.1. องค์ประกอบภายในเซลล์ (Cell content) หรือ Neutral Detergent Soluble (NDS) หมายถึงสารต่างๆที่อยู่ภายในเซลล์ของพืชเป็นส่วนที่สามารถละลายได้ในสารฟอกที่เป็นกลาง ประกอบด้วย แป้ง น้ำตาล โปรตีนที่ละลายได้ง่าย ไขมัน เป็นต้น

2.6.2. องค์ประกอบที่เป็นส่วนประกอบผนังเซลล์ (Cell wall ) หรือ Neutral Detergent Fiber (NDF) หมายถึงสารต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของ ผนังเซลล์พืช ซึ่งไม่สามารถละลายในสารฟอกที่เป็นกลาง ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน โปรตีนที่ไม่ละลายได้ง่าย การวิเคราะห์ทำได้โดยนำตัวอย่างตัดกับสารฟอกที่เป็นกลาง ส่วนที่เหลือซึ่งไม่ละลายในสารละลาย ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.6.2.1 เยื่อใยที่สามารถละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (Acid Detergent Soluble ,ADS) เยื่อใยชนิดนี้คือ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ เป็นสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายน้ำ สามารถละลายได้ดีในกรดอ่อน และด่างอ่อน

2.6.2.2 เยื่อใยที่ไม่สามารถละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (Acid Detergent Fiber, ADF) เยื่อใยชนิดนี้คือ เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์เป็นสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายน้ำ กรดอ่อน และด่างอ่อน การวิเคราะห์ทำได้โดยนำตัวอย่างตัดกับสารฟอกที่เป็นกรด ส่วนที่เหลือซึ่งไม่ละลายในสารละลาย ได้แก่ เซลลูโลส ลิกนิน โดยที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน (Acid Detergent Lignin, ADL) โดยใช้ตัวอย่างที่ได้จากการหา ADF ต้มกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ส่วนที่เหลือซึ่งไม่ละลายในสารละลาย คือ ลิกนิน

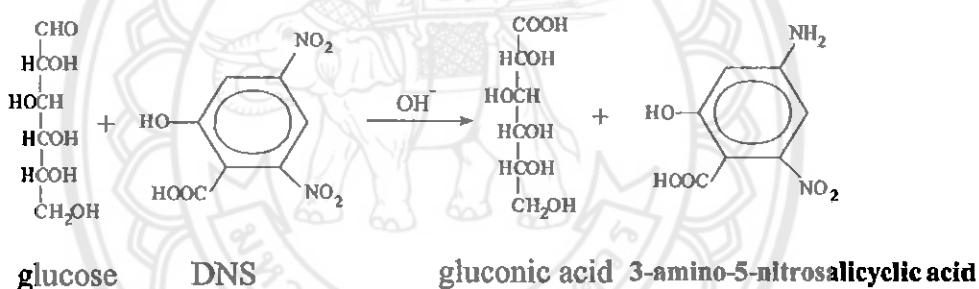
$$\% \text{Hemicellulose} = \% \text{NDF} - \% \text{ADF} \quad (2.1)$$

$$\% \text{Cellulose} = \% \text{ADF} - \% \text{ADL} \quad (2.2)$$

## 2.7 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาล

### 2.7.1 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิคDNS [35-36]

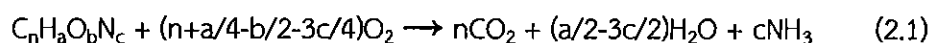
เทคนิค DNS เป็นวิธีที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในสารตัวอย่างที่ได้จากการย่อยสลาย ด้วยสารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก (Dinitrosalicylic acid) ซึ่งมีหมู่ไนโตร 2 หมู่ มีลักษณะสารละลายสีเหลือง เมื่อหมู่ไนโตร 1 หมู่ถูกรีดิวซ์โดยหมู่แอลดีไฮด์ของน้ำตาลด้วยความร้อน และสารละลายต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้สารละลายกรด 3,5 ไดไนโตรซาลิไซลิกเปลี่ยนแปลงเป็นสารละลายกรด 3-อะมิโน-5-ไนโตรซาลิไซลิก (3-amino-5-nitrosalicylic acid) ที่มีสีส้มแกมแดง ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 520 – 570 นาโนเมตร ปฏิกิริยาของเทคนิคDNS แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิค DNS [36]

## 2.8 การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand ; COD) [52]

ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand ; COD) เป็นการวัดปริมาณออกซิเจนเทียบเท่า (Oxygen Equivalent) ที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ในตัวอย่างอย่างสมบูรณ์ด้วยตัวออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong Chemical Oxidant) ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้หลักการที่ใช้ในการออกซิไดซ์คือสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิด (ยกเว้นสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbons) บางชนิด) จะถูกออกซิไดซ์โดยตัวออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong Oxidizing Agents) เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต เป็นต้น ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดและอะมิโนไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียดังสมการที่ 2.1



ในตัวอย่างบางตัวอย่าง ค่าซีโอดีนี้จะสามารถเชื่อมโยงไปถึงค่าที่แสดงปริมาณสารอินทรีย์บางค่าได้ เช่น ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total



Organic Carbon; TOC) และปริมาณสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น โดยที่ค่าซีไอดีจะสูงกว่าหรือเท่ากับค่าบีไอดี ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์หรือทางชีว (Biodegradable Organic Compounds) และสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์หรือทางชีว (Nonbiodegradable Organic Compounds) ดังนั้นค่าซีไอดีจะมีค่าสูงมากกว่าค่าบีไอดีมากขึ้นถ้ามีสารอินทรีย์ที่ยากต่อการสลายทางชีวอยู่มาก ดังนั้นข้อเสียอันหนึ่งของซีไอดีคือการไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์หรือทางชีวและสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์หรือทางชีวได้อีกประการหนึ่งการวิเคราะห์ค่าซีไอดีมีการใช้สารประกอบจำพวกสารปรอทที่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อมหากไม่มีวิธีการทำงานและระบบบำบัดที่ดีเพียงพอ

การหาค่าซีไอดีจะมีประโยชน์อย่างมากในการเฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพน้ำเมื่อได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีและค่าบีไอดีในตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เฝ้าระวังและควบคุมแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการวิเคราะห์หาค่าซีไอดีสั้นกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าบีไอดีมาก ซึ่งเป็นข้อดีของการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ตัวอย่างเช่น เวลาที่ใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ในการวิเคราะห์ค่าซีไอดีเท่ากับ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการวิเคราะห์หาค่าบีไอดีเท่ากับ 5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถทราบผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้มีประโยชน์อย่างมากในการควบคุมและแก้ไขปัญหาในเรื่องของมลพิษทางน้ำได้อย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์ค่าซีไอดีนั้นในปฏิกิริยาการออกซิเดชันสารอินทรีย์ จะต้องใช้ตัวออกซิไดซ์ที่แรงพอในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในตัวอย่าง ซึ่งมีสารหลายชนิดที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ได้ เช่น Potassium Dichromate, Potassium Permanganate เป็นต้น แต่ตัวออกซิไดซ์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ Potassium Dichromate ทั้งนี้เนื่องจาก Potassium Dichromate เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากและสามารถใช้กับตัวอย่างได้หลายชนิดรวมทั้งง่ายต่อการใช้และการดำเนินการวิเคราะห์

## 2.9 กระบวนการพลาสมาวิวัฒนาการของเหลว

### 2.9.1 พลาสมา [37]

พลาสมา ( Plasma ) ถูกจัดเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีสมบัติบางประการที่แตกต่างจากของแข็ง ของเหลวและแก๊ส เมื่อแก๊สถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน คลื่นไมโครเวฟ และรังสียูวี เป็นต้น จะเกิดการแตกตัวของแก๊สที่เป็นกลางกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุหรือไอออน เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน การกระตุ้นส่งผลให้อะตอมสูญเสียสภาพความเป็นกลางและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ปริมาณที่ใกล้เคียงกับประจุบวกส่งผลให้ประจุไฟฟ้าสุทธิของพลาสมาเป็นศูนย์ พลาสมาแสดงพฤติกรรมเหมือนอนุภาคกลาง และมีการอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม

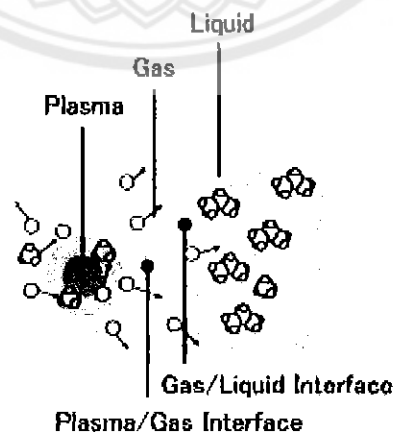
พลาสมาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พลาสมาอุณหภูมิสูงและพลาสมาอุณหภูมิต่ำ พลาสมาอุณหภูมิสูง คือ พลาสมาที่เกิดเมื่อแก๊สได้รับพลังงานสูงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งแก๊สในระบบของพลาสมาประเภทนี้จะเกิดการแตกตัวเกือบสมบูรณ์และระบบประจุสุทธิอยู่ในสภาวะ เช่น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ ไอพ่นเครื่องยนต์ เป็นต้น ส่วนพลาสมาอุณหภูมิต่ำ คือ เกิดเมื่อแก๊สได้รับพลังงานต่ำส่งผลให้เกิดการแตกตัวไม่สมบูรณ์ของไอออนในระบบอุณหภูมิต่ำ เช่น ระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ การปล่อยประจุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นต้น

## 2.9.2 พลาสมาวิฏภาคของเหลว [8, 10, 38]

### 2.9.2.1 หลักการของพลาสมาวิฏภาคของเหลว

พลาสมาวิฏภาคของเหลว คือ กระบวนการผลิตพลาสมาที่ล้อมรอบด้วยของเหลวโดยใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดพลาสมา ซึ่งพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็ว ข้อดีของพลาสมาวิฏภาคของเหลว คือ สามารถใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากสามารถเลือกชนิดของตัวทำละลายและสารละลายที่ใช้ในการผลิตพลาสมาได้

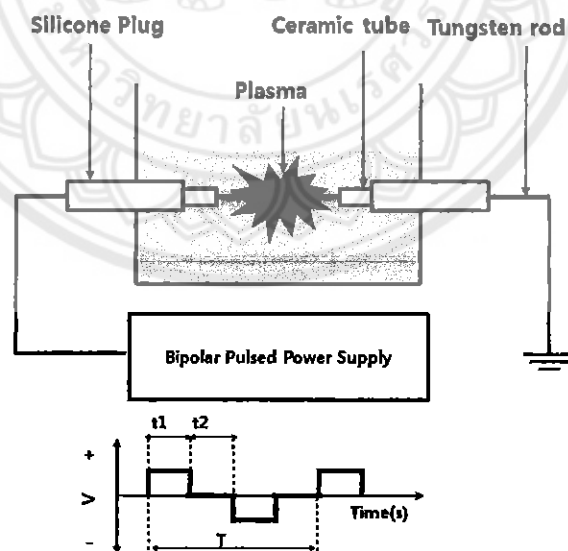
โดยพลาสมาเกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยแก๊สและของเหลว ส่งผลให้เกิดผิวสัมผัสระหว่างสถานะ 2 บริเวณกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อถึงจุดที่สารเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคหรือสถานะพลาสมาที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะทำให้เกิดพองแก๊สขึ้นบริเวณรอบๆพลาสมา ในขณะที่พลาสมาถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจะทำให้พลาสมาหดตัวลงน้อยกว่า โดยอาศัยหลักการถ่ายโอนมวล ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้น สารที่อยู่ในวิฏภาคของเหลวจะแพร่เข้ามาแทนที่และถูกกระตุ้นให้แตกตัวกลายเป็นพลาสมาต่อไป จากหลักการดังกล่าวส่งผลให้พลาสมาภายในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นด้วย



รูปที่ 2.14 แบบจำลองของพลาสมาวิฏภาคของเหลว [8]

### 2.9.2.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวัฏภาคของเหลว [10]

พลาสมาวัฏภาคของเหลวสามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมา ดังรูปที่ 2.15 โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่ให้พลังงาน คือ เพาเวอร์ซัพพลายแรงดัน และความถี่สูงระบบกระแสตรง ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลาย (Power supply) จะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulse) ให้กับระบบ โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าแบบสลับชั่ววอกและลบ เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ในเพาเวอร์ซัพพลายที่มีหน้าที่ในการแปลงระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังถังปฏิกรณ์พลาสมาเพื่อผลิตพลาสมาต่อไป ส่วนที่ 2 คือ ถังปฏิกรณ์พลาสมา โดยทั่วไปแล้วนิยมทำจากแก้วรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 – 10 เซนติเมตร ซึ่งตำแหน่งด้านข้างทั้งสองด้านของถังปฏิกรณ์จะติดตั้งอิเล็กโทรดที่ทำจากทังสเตน ทองแดง หรือเหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกหุ้มด้วยเซรามิกเพื่อป้องกันความร้อนและลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตพลาสมา ในการพลาสมาวัฏภาคของเหลวจะเชื่อมต่อกับเพาเวอร์ซัพพลายเข้ากับอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน โดยใช้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สูง โดยค่าแรงดันและความถี่ที่ใช้ในการผลิตพลาสมาขึ้นอยู่กับกรนำไฟฟ้าของสารละลายภายในเครื่องกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 2.15 แผนภาพของการผลิตพลาสมาวัฏภาคของเหลว [37]

พลาสมาสามารถสร้างหมว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยหมว่องไวที่เกิดขึ้นเป็นสารตัวนำไฟฟ้าเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจะแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถนำไฟฟ้าได้เรียกว่าหมว่องไว โดยหมว่องไวที่มักเกิดขึ้นระหว่าง

กระบวนการพลาสมา เช่น Hydroxyl radical ( $\text{OH}^{\cdot}$ ) Hydroperoxyl radical ( $\text{H}_2\text{O}_2^{\cdot}$ ) Free electron ( $e^-$ ) หรือ oxide anion ( $\text{O}^-$ ) เป็นต้น นอกจากนี้ชนิดของไอออนหรืออนุภาคยังมีผลต่อความสามารถในการสร้างหมว่องไว สีของแสงพลาสมาที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงคลื่นที่แผ่กระจายออกมาซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Optical Emission Spectrometer (OES)

### 2.9.2.3 การประยุกต์ใช้พลาสมาวัฏภาคของเหลว

ในปัจจุบันพลาสมาวัฏภาคของเหลวได้รับความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุและบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้ในสภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้องซึ่งทำให้ต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสมาวัฏภาคของแก๊ส

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2013 เบญจมาศ เขียรศิลป์ และคณะ [38] ได้ศึกษาการผลิตไบโอบิวทานอล จากกากตะกอนน้ำมันปาล์ม ด้วยแบคทีเรีย *Clostridium beijerinckii* แบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการไฮโดรไลซิสจะนำกากตะกอนน้ำมันปาล์มน้ำหนัก 50 กรัม ละลายในตัวทำละลาย 7 ชนิด ได้แก่ น้ำ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร และความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร จากนั้นนำไปปั่นจนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นฆ่าเชื้อโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากผลการศึกษาพบว่ากรดไนตริกมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เมื่อความเข้มข้นของกรดเท่ากับร้อยละ 1.05 โดยปริมาตร ได้น้ำตาลรวมมากกว่า 20 กรัมต่อลิตร จากนั้นทำการปรับสภาพ 3 แบบ ได้แก่ การปรับ pH เป็น 6.5 การกำจัดสารพิษด้วยถ่านกัมมันต์ และการกำจัดสารพิษด้วยปูนขาว กระบวนการหมักจะเป็นศึกษาการผลิตไบโอบิวทานอลจากไฮโดรไลซิสที่ทำการปรับสภาพแล้วนำไปหมักกับแบคทีเรีย *Clostridium beijerinckii* และอาหารเลี้ยง TYA (ทริบโทนิยีสต์เอกแทริกอะซิเตรต) แบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นย้ายเซลล์เพื่อเลี้ยงในอาหารเลี้ยงในสภาวะปราศจากไนโตรเจนเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์จะให้ปริมาณบิวทานอลมากที่สุดเท่ากับ 3.12 กรัมต่อลิตร เนื่องจากกำจัดสารพิษที่ทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย และมีการสูญเสียน้ำตาลกับกรดอะซิติกน้อยกว่าการใช้ปูนขาว เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิต จึงศึกษาเพื่อหาแหล่งให้ไนโตรเจนที่เหมาะสมด้วยแบคทีเรีย *Clostridium beijerinckii* จากผลผลิตพลอยได้ทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ เวย์โปรตีน โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง และยูเรีย โดยเปรียบเทียบกับการใช้เป็นแหล่งให้ไนโตรเจนอีสต์สกัด จากผลการศึกษาพบว่าการใช้เวย์โปรตีนมี

ประสิทธิภาพการผลิตดีที่สุดในปีเกิดบิวทานอลมากที่สุดเท่ากับ 2.32 กรัมต่อลิตร จากนั้นมีการเติมสารอนินทรีย์ 4 ชนิด ได้แก่ แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมไนเตรต แอมโมเนียมซัลเฟต และแอมโมเนียมอะซิเตต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตจากผลการศึกษาพบว่าการใช้เวย์โปรตีนร่วมกับแอมโมเนียมซัลเฟตมีประสิทธิภาพการผลิตดีที่สุดในปีเกิดบิวทานอลมากที่สุดเท่ากับ 2.87 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเกิดกรดที่มีปริมาณที่เหมาะสมต่อการหมัก และมีการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตบิวทานอลด้วยแบคทีเรีย *Clostridium beijerinckii* โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณเวย์โปรตีนและแอมโมเนียมซัลเฟต จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมที่สุด คือ 7 เกิดบิวทานอลมากที่สุดเท่ากับ 3.42 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเกิดกรดที่มีปริมาณที่เหมาะสม

ในปี ค.ศ. 2014 M. S. Kalil และคณะ [39] ได้ศึกษาการผลิตไบโอบิวทานอลในกระบวนการหมักอะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลจากกากตะกอนเมล็ดปาล์ม ด้วยแบคทีเรีย *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 กระบวนการไฮโดรไลซิสจะนำกากตะกอนเมล็ดปาล์มน้ำหนัก 700 กรัม ละลายในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยปริมาตร ปริมาตร 2 ลิตร พบว่าลิกโนเซลลูโลสไม่สามารถเกิดการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์ เกิดน้ำตาลทั้งหมด 35.97 กรัมต่อลิตร มีองค์ประกอบเป็นกลูโคส 1.95 กรัมต่อลิตร ไซโลส 0.36 กรัมต่อลิตร และแมนโนส 33.6 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังตรวจสอบสารยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 จึงทำการกำจัดสารยับยั้งโดยใช้ XAD-4 resin 75 กรัม ดูดซับสารพิษจากไฮโดรไลเซส 500 มิลลิลิตร อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าตัวดูดซับทำให้เกิดน้ำตาลมากขึ้นเป็น 43.24 กรัมต่อลิตร มีองค์ประกอบเป็นกลูโคส 3.58 กรัมต่อลิตร และแมนโนส 39.66 กรัมต่อลิตร แต่ไม่พบไซโลส ในกระบวนการหมักจะเป็นศึกษาการผลิตไบโอบิวทานอลจากไฮโดรไลเซสที่ทำการปรับสภาพแล้วนำไปหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนกับแบคทีเรีย *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 ด้วยอาหารเลี้ยง TYA (ทริปโทนิสต์เอกแทริกอะซิเตต) แบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นเวลา 5 วัน โดยให้มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลต่อลิตร พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ pH เท่ากับ 6.28 อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และขนาดของหัวเชื้อร้อยละ 15.9 จะเกิดบิวทานอล 0.1 กรัมต่อลิตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพผลิตบิวทานอลจึงมีการพัฒนากระบวนการกำจัดสารยับยั้ง ได้แก่ การใช้ถ่านกัมมันต์ 25 กรัมต่อไฮโดรไลเซส 1 ลิตร กวนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับ XAD-4 resin และการใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับ XAD-4 resin 2 รอบ พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับ XAD-4 resin 2 รอบเกิดน้ำตาลเพิ่มเป็น 44.81 กรัมต่อลิตร และเกิดบิวทานอล 0.39 กรัมต่อลิตรจากนั้นจึงศึกษาถึงผลของการเจือจางไฮโดรไลเซส พบว่าเมื่อเจือจางไฮโดรไลเซสที่ร้อยละ 70 สามารถเพิ่มการผลิตบิวทานอลได้ถึง 8.2 เท่า

ในปี ค.ศ. 2014 S. Fan และคณะ [40] ได้ศึกษาการผลิตน้ำตาลผลผลิตสูงจากกากตะกอนเมล็ดปาล์มด้วยการฉายรังสีไมโครเวฟและการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจาง พบว่าปีที่ผ่านมามีความสนใจและทุ่มเทอย่างมากเพื่อการแปลงของคาร์โบไฮเดรตที่ได้มาจากชีวมวลเป็นน้ำตาล เช่น กลูโคส ฟรุกโตส และแมนโนส ซึ่งน้ำตาลเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญที่จะถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีมูลค่าเพิ่มสูง ในงานวิจัยนี้กากตะกอนเมล็ดปาล์ม (DPKG) จะถูกย่อยสลายโดยเครื่องฉายรังสีไมโครเวฟและสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง ได้ศึกษาอย่างเป็นระบบโดยใช้วิธีการและการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ซึ่งได้ร้อยละผลผลิตแมนโนสสูงสุด 92.11 ในสภาวะที่ดีที่สุดที่ประสบความสำเร็จคือที่ 148 องศาเซลเซียส ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.75 นอร์มอล เวลา 10 นาที 31 วินาที และปริมาณสารตั้งต้นต่อตัวทำละลาย (SS) อัตรา (w/v) 1: 49.69 นอกจากนี้น้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการหมักเป็นร้อยละ 77.11 ที่ 170 องศาเซลเซียส ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.181 นอร์มอล เป็นเวลา 6 นาทีที่ 6 วินาที และอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อตัวทำละลาย (w/v) 1:40 การวิจัยนี้ถูกวางให้ทำการหาสภาวะที่ดีที่สุดต่อไป การเลือกใช้กากตะกอนเมล็ดปาล์มเพราะประหยัดและได้ร้อยละผลผลิตสูง และยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการผลิตแมนโนส และน้ำตาลอื่นๆ

ในปี ค.ศ. 2012 I. Prasertsung และคณะ [9] ได้ศึกษาการเตรียมโคโตซานน้ำหนักรวมเลกุลต่ำโดยใช้ระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยจะนำผงโคโตซานละลายในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 โมลาร์ในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร ทรีทด้วยระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มีทั้งสแตนด์ออลิเล็กโทรดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 0.2 มิลลิเมตร ให้พลังงานด้วยพาวเวอร์ซัพพลายกระแสตรงชนิดไบโพลาร์ที่สภาวะความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ความต่างศักย์ 1.6 กิโลวัตต์ ความกว้างของพัลส์ 2 ไมโครวินาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-300 นาที พบว่าความหนืดของโคโตซานลดลงตามระยะเวลาที่ทรีทด้วยพลาสมาจาก 30.47 เป็น 3.46 มิลลิปาสคาลวินาที ในระยะเวลา 300 นาที และมวลโมเลกุลจากของโคโตซานลดลงตามระยะเวลาที่ทรีทด้วยพลาสมาจาก  $2.1 \times 10^5$  เป็น  $3.2 \times 10^4$  ดาลตัน ในระยะเวลา 300 นาที ซึ่งให้เห็นว่าโคโตซานถูกย่อยสลายภายใต้ระบบพลาสมา เนื่องจากพลาสมาสามารถสร้างหมู่ว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ เช่น Hydroxyl radical ( $\text{OH}^\cdot$ ) Hydroperoxyl radical ( $\text{H}_2\text{O}_2^\cdot$ ) Free electron ( $e^-$ ) หรือ oxide anion ( $\text{O}^-$ ) เป็นต้น โดยหมู่ว่องไวนั้นสามารถทำการย่อยสลายโคโตซานได้อย่างรวดเร็ว และจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR ยังพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของโคโตซานเนื่องจากพลาสมาจากลักษณะพิกซ์ที่เกิดขึ้น

ในปี ค.ศ. 2013 I. Prasertsung และคณะ [10] ได้ศึกษาการย่อยสลายเบต้าโคโตซานด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยจะนำเบต้าโคโตซานละลายในสารละลายกรดอะซิติก

ความเข้มข้น 1 โมลาร์ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยมวลต่อปริมาตร ทรีทด้วยระบบพลาสมาวิทยาของเหลวที่มีทั้งสเดนเป็นอิเล็กโทรดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 0.2 มิลลิเมตร ให้พลังงานด้วยพาวเวอร์ซัพพลายกระแสตรงชนิดไบโพลาร์ที่สภาวะความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ความต่างศักย์ 1.6 กิโลวัตต์ ความกว้างของพัลส์ 2 ไมโครวินาที ความดันของแก๊ส 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-300 นาที พบว่าความหนืดของโคโคซานลดลงตามระยะเวลาที่ทรีทด้วยพลาสมาจาก 89.5 มิลลิพาสคาลวินาที ลดลงอย่างรวดเร็วเป็น 11.0 มิลลิพาสคาลวินาที ในระยะเวลา 120 นาที และลดลงช้าๆอย่างต่อเนื่องเป็น 2.9 มิลลิพาสคาลวินาที และมวลโมเลกุลจากของโคโคซานลดลงตามระยะเวลาที่ทรีทด้วยพลาสมาจาก  $5.5 \times 10^5$  ดาลตัน ลดลงอย่างรวดเร็วเป็น  $1.5 \times 10^5$  ในระยะเวลา 30 นาที และลดลงอย่างต่อเนื่องเป็น  $1.9 \times 10^4$  ดาลตัน ในระยะเวลา 300 นาที ในลักษณะปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.4911 นาที<sup>-1</sup> ซึ่งให้เห็นว่าโคโคซานถูกย่อยสลายภายใต้ระบบพลาสมา เนื่องจากพลาสมาสามารถสร้างหมู่ไอออนในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลาย โดยหมู่ไอออนนั้นสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันโคโคซานได้อย่างรวดเร็ว จากการตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD พบว่าลักษณะพีคที่ 15.1 องศา และ 21.4 องศา มีลักษณะของส่วนผสมของเทนดอนไฮเดรตพอลิเมอร์และแอนนิลพอลิเมอร์ หลังจากการทรีทด้วยพลาสมาเป็นระยะเวลา 180-300 นาที มีลักษณะพีคที่ลดลง ซึ่งให้เห็นว่าเบต้าโคโคซานมีลักษณะความเป็นผลึกลดลงเกิดเป็นลักษณะอสัณฐานขึ้น จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR ยังพบว่าลักษณะหลักๆของโคโคซานยังคงอยู่แต่พันธะไฮโดรเจนอ่อนลงจากการทรีทด้วยพลาสมาที่ความยาวคลื่น 1410 และ 1380 เซนติเมตร<sup>-1</sup> และความสามารถการละลายน้ำของโคโคซานเพิ่มขึ้นจากการทรีทด้วยพลาสมา

ในปี ค.ศ. 2013 B. Liu และคณะ [41] ได้ศึกษาการใช้ไมโครเวฟช่วยในกระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสเป็น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอิวรอล (HMF) ในไอออนิกเหลวเร่งด้วยเซอร์โคเนียมคลอไรด์ ( $ZrCl_4$ ) ได้ตรวจสอบในการค้นหาของกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ประการแรกโลหะคลอไรด์เรพรีเซนเททีฟบางชนิดถูกนำมาใช้เพื่อเร่งการแปลงของน้ำตาลกลูโคสเป็นไฮดรอกซีเมทิลเฟอิวรอล และแสดงให้เห็นว่าเซอร์โคเนียมคลอไรด์ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ โดยเซลลูโลสถูกละลายทั้งหมดใน [Bmim]Cl เติมร้อยละ 10 เซอร์โคเนียมคลอไรด์ในระบบปฏิกิริยาภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟที่ 400 สังเกตเห็นว่า ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 2.2 ถึง 36.1 ตลอดระยะเวลา 1 นาที ถึง 2 นาที ซึ่งให้เห็นว่าการย่อยสลายเซลลูโลสเป็นกลูโคสยังถูกเร่งปฏิกิริยาอย่างง่ายตายด้วยเซอร์โคเนียมคลอไรด์ จากนั้นร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมด ค่อยๆลดลงจาก 39.4 ถึง 5.4 แต่ร้อยละผลได้ไฮดรอกซีเมทิลเฟอิวรอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 0.6 ถึง 51.4 ที่ 1 นาที ถึง 3.5 นาที จากนั้นแปลงเซลลูโลสโดยตรงเป็นไฮดรอกซีเมทิลเฟอิวรอลเร่งปฏิกิริยาด้วยเซอร์โคเนียมคลอไรด์ภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟ (MI) ภายใต้สภาวะที่ดีที่สุดเป็นร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงถึง 51.4 ที่ได้รับจากเซลลูโลสใน 3.5 นาทีภายใต้

การฉายรังสีไมโครเวฟ 400 วัตต์ การทดลองที่ควบคุมชี้ให้เห็นว่าทั้งของเหลวไอออนิก รังสีไมโครเวฟ และเซอร์โคเนียมคลอไรด์ แสดงถึงผลการส่งเสริมในการแปลงเซลลูโลสอย่างมีประสิทธิภาพเป็นไฮดรอกซิเมทิลเฟอพิวอรอล อีกทั้งผลความสามารถนำมาใช้ใหม่สำหรับทำครั้งถูกแสดงว่าร้อยละผลได้ไฮดรอกซิเมทิลเฟอพิวอรอลเกือบคงที่ประมาณ 50 ดังนั้นระบบตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่นี้สามารถนำกลับมาใช้โดยไม่สูญเสียการทำงานเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นผลดีกับการประยุกต์ใช้ที่มีศักยภาพสำหรับการสังเคราะห์ขนาดใหญ่และมุมมองของอุตสาหกรรม งานชิ้นนี้จึงเป็นกระบวนการที่มีความหมายสำหรับการแปลงคาร์โบไฮเดรตเป็นเคมีภัณฑ์

ในปี ค.ศ. 2013 T. Tantiplapol และคณะ [42] ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะพลาสมาวิภาคของเหลวต่ออัตราการย่อยสลายและคุณสมบัติของโคโตซาน โดยจะนำเอาตัวโคโตซานละลายในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 โมลาร์ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยมวลต่อปริมาตร ทรีทด้วยระบบพลาสมาวิภาคของเหลวมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 0.2 มิลลิเมตร ให้พลังงานด้วยพาวเวอร์ซัพพลายกระแสตรงชนิดไปโพลาไรท์ที่สภาวะความต่างศักย์ 1.6 กิโลวัตต์ ความกว้างของพัลส์ 2 ไมโครวินาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 25-30 องศาเซลเซียส ทำการศึกษาสภาวะที่มีทั้งสแตนท์ ทองแดง และเหล็กเป็นอิเล็กโทรด ที่ความถี่ 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์ ในเวลา 0-210 นาที ตามลำดับ พบว่าทองแดง และเหล็ก สามารถให้อิออนของทองแดงและเหล็กด้วยกระแสไฟฟ้า และโคโตซานที่ทรีทด้วยอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ นั้นสามารถลดมวลโมเลกุลได้ดีที่สุดจาก  $1.3 \times 10^5$  เป็น  $1.3 \times 10^4$  ดาลตัน เนื่องจากเหล็กให้อิออนทำให้เกิดปฏิกิริยาฟีนตันได้เป็น Hydroxyl radical ( $\text{OH}^\cdot$ ) ที่มีส่วนช่วยในการย่อยสลาย จากนั้นปรับค่าความถี่ 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าที่ความถี่สูงสามารถลดมวลโมเลกุลได้ดียิ่งขึ้น โดยที่สามารถลดมวลโมเลกุลได้ดีที่สุดจาก  $1.3 \times 10^5$  เป็น  $6.8 \times 10^3$  ด้วยอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ  $0.239 \text{ นาที}^{-1}$  เนื่องจากพลังงานที่ให้แก่ระบบมากขึ้นทำให้เกินหม้อว่องไวจำนวนมากขึ้น จากการตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD พบว่าลักษณะพีคที่ 15.1 องศา และ 21.4 หลังจากการทรีทด้วยพลาสมาที่มีเหล็กเป็นอิเล็กโทรดความถี่ 15 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ มีลักษณะพีคไม่สามารถสังเกตเห็นได้เลย ชี้ให้เห็นว่าอิเล็กโทรดเหล็กมีความสามารถในการทำลายผลึกของโคโตซานอย่างมีประสิทธิภาพ จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR ยังพบว่าพันธะไฮโดรเจนอ่อนลงจากการทรีทพลาสมาด้วยอิเล็กโทรดเหล็กความถี่ 15 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความยาวคลื่น 1410 และ 1370 เซนติเมตร<sup>-1</sup> และร้อยละผลได้ของโคโตซานที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากถึงร้อยละ 60 เมื่อทรีทด้วยพลาสมาที่มีเหล็กเป็นอิเล็กโทรดจากที่แทบจะไม่สามารถละลายน้ำได้เมื่อไม่ได้ทำการทรีทด้วยพลาสมา



### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- 3.1.1 เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
- 3.1.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว (PEKURIS, Japan)
- 3.1.3 ปฏิกรณ์ ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.4 ซีวอิเล็กโทรดเหล็ก
- 3.1.5 ซ้อนตักสาร
- 3.1.6 เครื่องซังสาร (Denver instrument, Germany)
- 3.1.7 ถ้วยอบตัวอย่างพร้อมฝาปิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ลึก 40 มิลลิเมตร
- 3.1.8 ตู้อบแห้ง
- 3.1.9 ตู้อบแห้งแบบลมหมุน
- 3.1.10 โถดูดความชื้น
- 3.1.11 เครื่องย่อย (Heating Mantle apparatus)
- 3.1.12 ขวดกั้นกลม
- 3.1.13 ถ้วยกระเบื้องกุช
- 3.1.14 ปีมสุญญากาศ
- 3.1.15 เตาเผา 500 องศาเซลเซียส
- 3.1.16 แท่งแก้ว
- 3.1.17 ปีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.1.18 ขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.19 ไมโครปิเปต ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร และ 1-10 มิลลิลิตร (Eppendorf, Germany)
- 3.1.20 เครื่อง UV-VIS (HELIOS OMEGA, Thailand)

19278279

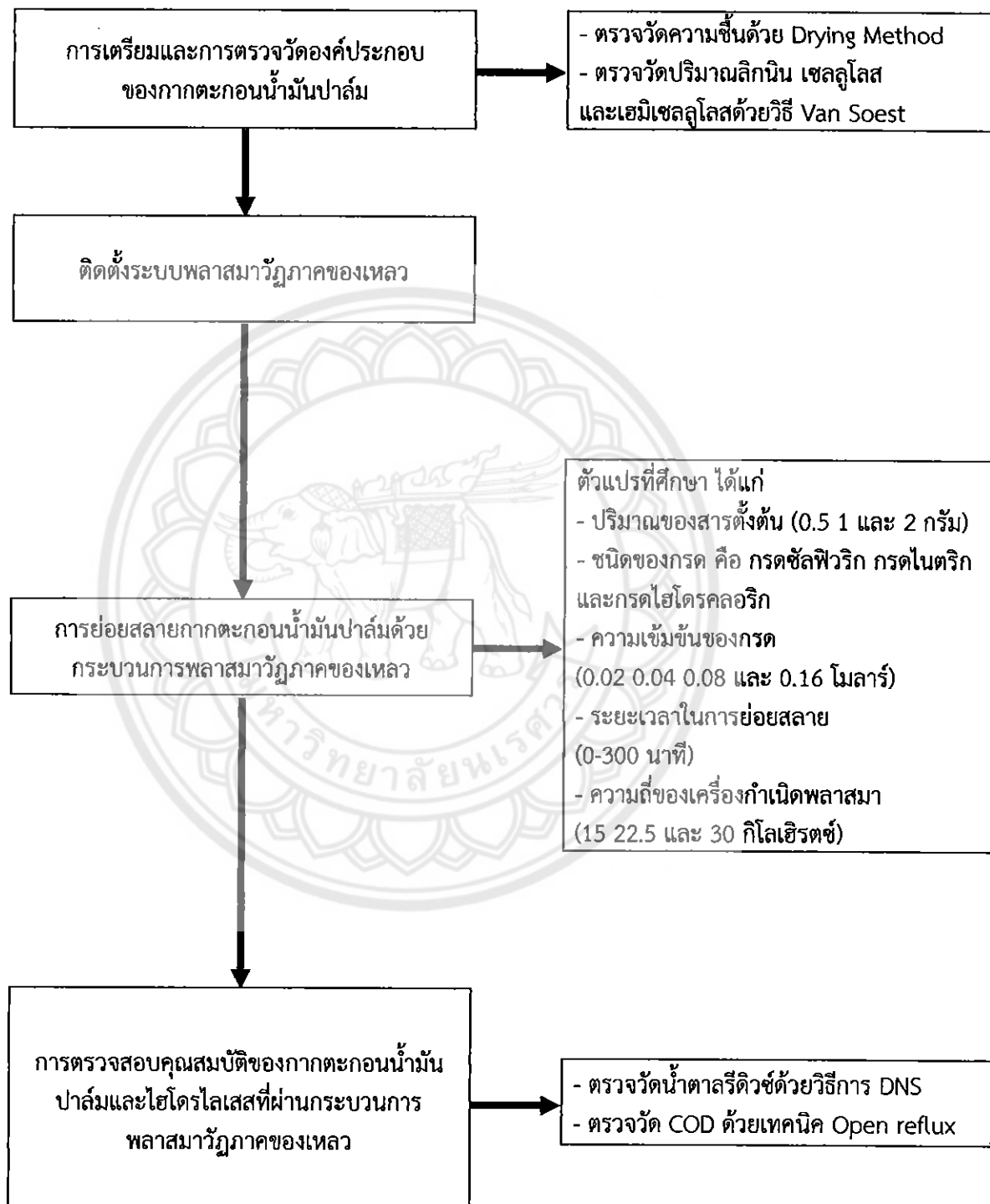


สำนักหอสมุด

27 ส.ค. 2561

- 3.1.21 กากตะกอนน้ำมันปาล์ม
- 3.1.22 โซเดียมลอริลซัลเฟต
- 3.1.23 ไดโซเดียมเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซีเตต
- 3.1.24 บอแรกซ์
- 3.1.25 ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต
- 3.1.26 ไตรเอทิลีนไกลคอล
- 3.1.27 ซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์
- 3.1.28 กรดซัลฟิวริก (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.29 กรดไนตริก (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.30 กรดไฮโดรคลอริก (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.31 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (RCI Labscan, Thailand)
- 3.1.32 โพลีแซลีน-โซเดียม ทาร์เทรต (Ajex Finechem, New Zealand)
- 3.1.33 กรด 3,5-ไดไนโตรซาลิไซลิก (SIGMA-ALDRICH, USA)
- 3.1.34 โซเดียมซัลเฟต แอนไฮดรัส (Fisher Chemical, UK)
- 3.1.35 ฟีนอล (Merck KGaA, Germany)
- 3.1.36 โพลีแซลีนไดโครเมต
- 3.1.37 ซิลเวอร์ซัลเฟต
- 3.1.38 เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต
- 3.1.39 เฟอร์โรอิน
- 3.1.40 อะซีโตน
- 3.1.41 น้ำกลั่น

## 3.2 วิธีการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษากระบวนการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การเตรียมและการตรวจวัดองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม

ทำการล้างกากตะกอนน้ำมันปาล์ม และแยกน้ำโดยวิธีการกรองสุญญากาศ อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง บดให้ละเอียด โดยจะทำการตรวจวัดองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม

##### การตรวจวัดความชื้น

การตรวจวัดความชื้นด้วย Drying Method [47] นำตัวอย่างตัวอย่างพร้อมฝาที่ล้างสะอาด และแห้งอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นใส่ในโถดูดความชื้นและทิ้งให้เย็น ไม่เกิน 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งบนตีกน้ำหนัก ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดขนาด 1 มิลลิเมตร ประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยอบ บันทึกรน้ำหนัก ปิดฝาล้าง แล้วเขย่าเล็กน้อยให้ตัวอย่างกระจายอยู่สม่ำเสมอ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 16 - 18 ชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่ โดยให้มีระยะห่าง 1 นิ้ว ต่อความจุของตู้ 1 ลิตร ขณะที่อบต้องเปิดฝาล้าง นำถ้วยอบออกใส่ในโถดูดความชื้นและปิดฝาล้าง แล้วปล่อยให้เย็น ไม่เกิน 2 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก สามารถคำนวณร้อยละความชื้นได้ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักถ้วยและตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักถ้วยและตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100 \quad (3.1)$$

##### การตรวจวัดปริมาณลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

ปริมาณลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี Van Soest [43] เตรียมสารละลาย NDF โดยโคโคเดียมเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซีเตต 18.61 กรัม และ บอแรกซ์ 6.81 กรัม ลงในบีกเกอร์แล้วผสมน้ำกลั่นเล็กน้อย ให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายหมด จากนั้นเติมโซเดียมลอร์ริลซัลเฟต 30 กรัม และ ไตรเอทิลีนไกลคอล 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมโคโคเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 4.56 กรัม ลงในบีกเกอร์แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เตรียมสารละลาย ADF โดยซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 200 กรัม เติมน้ำกลั่น 1.5 ลิตร ผสมกับกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นร้อยละ 13.2 โดยปริมาตร ปริมาณ 2 ลิตร และน้ำกลั่น 6.7 ลิตร จากนั้นวิเคราะห์ร้อยละ NDF โดยชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ขวดก้นกลม เติมสารละลาย NDF 100 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดภายใน 10-15 นาทีลดความร้อนให้มีการเดือดเพียงเล็กน้อย ล้างเศษตัวอย่างที่ติดตามขอบขวดน้ำกลั่นแล้วต้มต่อ 1 ชั่วโมง จากนั้นแล้วกรองด้วยถ้วยกรองโดยใช้บีมสุญญากาศ ขณะกรอง

ล้างด้วยน้ำร้อนและล้างด้วยอะซิโตน อบตัวอย่างพร้อมถ้วยที่ 100 องศาเซลเซียส ตลอดคืน นำถ้วยอบออกใส่ในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำเพื่อวิเคราะห์ร้อยละ ADF โดยใช้สารละลาย ADF แทน สามารถคำนวณร้อยละ NDF และ ADF ได้ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์ร้อยละ ADL โดยนำสารที่เหลือจากการวิเคราะห์ร้อยละ ADF เดิมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 72 โดยปริมาตร ปริมาณ 40 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนเป็นครั้งคราวให้ทั่ว ตั้งทิ้งไว้ 3 – 4 ชั่วโมง จากนั้นกรองโดยใช้ความร้อนล้างด้วย Acetone ทำการอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส ตลอดคืน นำถ้วยอบออกใส่ในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก จากนั้น เเผาที่ 500 องศาเซลเซียส ตลอดคืน นำถ้วยอบออกใส่ในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก สามารถคำนวณร้อยละ ADL ได้ดังสมการที่ 3.4

$$\text{ร้อยละ NDF} = (CN - C) \times 100/S \quad (3.2)$$

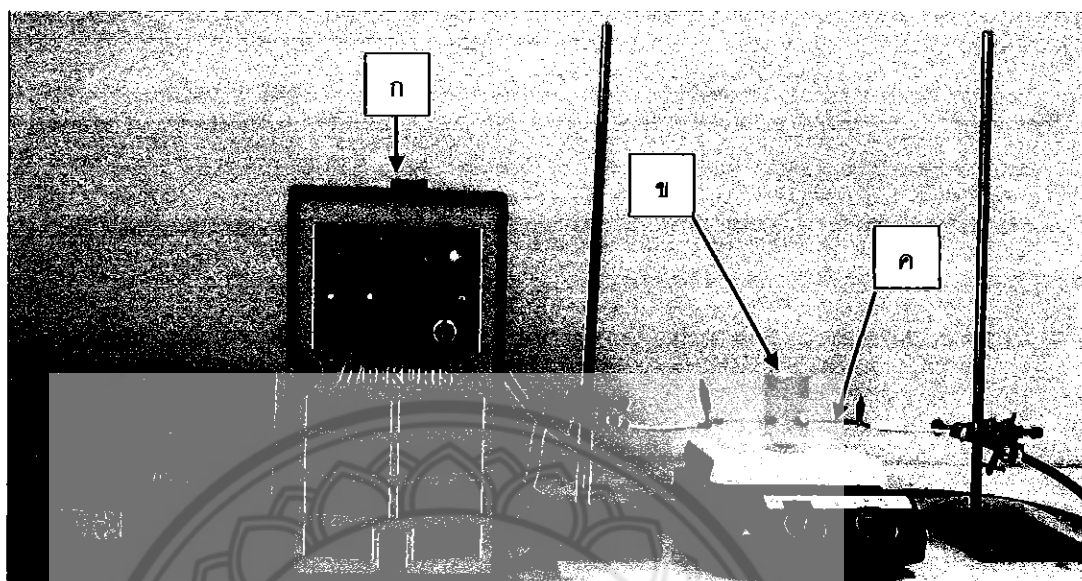
$$\text{ร้อยละ ADF} = (CA - C) \times 100/S \quad (3.3)$$

$$\text{ร้อยละ NDL} = (CL - CAS) \times 100/S \quad (3.4)$$

เมื่อ C = น้ำหนักถ้วยอบ  
 CN = น้ำหนักถ้วยอบและเยื่อใย NDF  
 CA = น้ำหนักถ้วยอบและเยื่อใย ADF  
 CL = น้ำหนักถ้วยอบและลิกนิน  
 CAS = น้ำหนักถ้วยอบและเถ้า  
 S = น้ำหนักตัวอย่าง

### 3.3.2 การติดตั้งระบบพลาสมาวิภาคของเหลว

กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวเกิดขึ้นเป็นระบบเปิดภายในปฏิกรณ์แก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีขั้วอิเล็กโทรดเหล็กติดตั้งอยู่ในแนวระนาบเดียวกันของทั้งสองข้างของปฏิกรณ์ มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองประมาณ 0.2 มิลลิเมตร และมีฉนวนซึ่งเป็นเซรามิกหุ้มอยู่ที่อิเล็กโทรดเหล็กออกมาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร เชื่อมต่อขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเข้ากับพาวเวอร์ซัพพลายระบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ โดยปฏิกรณ์ตั้งอยู่บนเครื่องปั่นกวาน



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาวิภาคของเหลว

- ก. เพาเวอร์ซัพพลาย
- ข. ถังปฏิกรณ์พลาสมา
- ค. ขั้วอิเล็กโทรด

### 3.3.3 การย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว

เตรียมผงกากตะกอนน้ำมันปาล์ม ทำการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว ที่มีความต่างศักย์สเกล 3 ความกว้างพัลส์ 3 ไมโครวินาที และใช้อิเล็กโทรดเหล็ก โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณสารตั้งต้น 0.5 1 และ 2 กรัม ชนิดของกรดที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นของสารละลายกรด 0.02 0.04 0.08 และ 0.16 โมลาร์ ระยะเวลาในการย่อยสลาย 0-300 นาที ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์

### 3.3.4 การตรวจสอบคุณสมบัติของกากตะกอนน้ำมันปาล์มและไฮโดรไลเสตส์ที่ผ่าน

กระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว

#### การวัดน้ำตาลรีดิวซ์

การวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สามารถตรวจสอบด้วยเทคนิค DNS (Dinitrosalicylic acid colorimetric method) เตรียมสารละลาย DNS reagent โดยละลายกรด 3,5-ไดไนโตรซาลิไซลิก 1 กรัม ฟีนอล 0.2 กรัม โพแทสเซียม-โซเดียม ทาร์เทรต 30 กรัม โซเดียมซัลเฟต แอนไฮดรัส 0.05 กรัม ในน้ำกลั่นน้อยกว่า 100 มิลลิลิตร เมื่อละลายสมบูรณ์ได้สารละลายสีเหลือง เติมน้ำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร สร้างกราฟมาตรฐานจาก

กลูโคสที่ความเข้มข้น 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 และ 0.9 โมลาร์ ขั้นตอนการวัดน้ำตาลรีดิวซ์จะนำไฮโดรโลเอสปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เติมสารละลาย DNS reagent 0.5 มิลลิลิตร ต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร นำค่าเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน สามารถคำนวณหาร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ (Total reducing sugar, TRS) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์} = \frac{\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่วัดได้}}{\text{ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์มในสารละลาย}} \times 100 \quad (3.5)$$

การตรวจวัดค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand ; COD) [52]

สารประกอบอินทรีย์สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ด้วยตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีในที่นี่จะใช้โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate;  $K_2Cr_2O_7$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) ในสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยใช้ซิลเวอร์ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะที่ร้อนและมีความเป็นกรดสูง สารผสมระหว่างกรดโครมิกและกรดซัลฟิวริกจะออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ในสารละลาย การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีทำได้โดยการหาปริมาณของโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างแล้วคำนวณเทียบเป็นปริมาณออกซิเจนโพแทสเซียมไดโครเมตที่ทราบปริมาณและความเข้มข้นที่แน่นอนและจะถูกเติมลงในน้ำตัวอย่างในปริมาณที่มากเกินไปพอแต่ทราบปริมาณที่แน่นอน หลังจากการรีฟลักซ์ตัวอย่างที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือซึ่งยังไม่ถูกรีดิวซ์ในสารละลายหลังจากการรีฟลักซ์หาได้โดยการติเตรทกับสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Standard Ferrous Ammonium Sulfate Solution) โดยใช้เฟอโรอิน (Ferrouin) เป็นอินดิเคเตอร์ สามารถการคำนวณหาค่าซีโอดีได้ดังสมการ 3.6

$$\text{COD} = (A-B)(8000M)/C \quad (3.6)$$

เมื่อ COD = ค่าซีโอดี หน่วยเป็นมิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร

A = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการติเตรทแบบลงค  
หน่วยเป็นมิลลิลิตร

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการติเตรทตัวอย่าง  
หน่วยเป็นมิลลิลิตร

M = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต  
หน่วยเป็นโมลาร์

C = ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ หน่วยเป็นมิลลิลิตร

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 องค์ประกอบของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม สามารถวิเคราะห์ความชื้นด้วย Drying Method [47] และลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี Van Soest [43] ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงองค์ประกอบของกากตะกอนน้ำมันปาล์ม

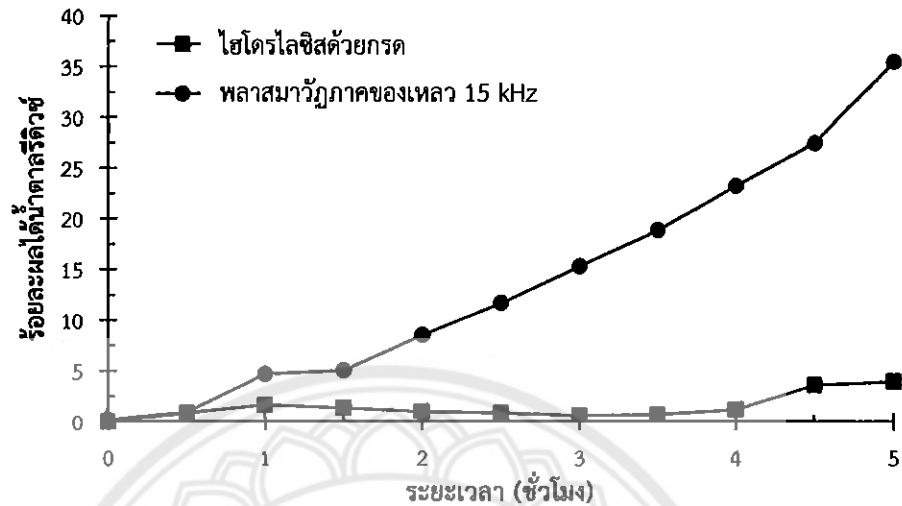
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยมวล
เซลลูโลส	28.12
ลิกนิน	7.45
ความชื้น	6.00
เฮมิเซลลูโลส	5.06
อื่นๆ	53.37

จากตารางที่ 4.1 พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส และจะเห็นว่ามีส่วนประกอบอื่นๆ ในกากตะกอนน้ำมันปาล์มซึ่งเป็น โปรตีน แป้ง ไขมัน เพกทิน และเถ้า ซึ่งเป็นสารที่สามารถละลายได้ในสารฟอกที่เป็นกลาง โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การย่อยสลาย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีลิกนินที่จะเป็นตัวป้องกันการเข้าไปทำปฏิกิริยาย่อยสลายที่บริเวณผิวของเซลลูโลส

#### 4.2 ผลของพลาสมาวิทยุภาคของเหลวต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

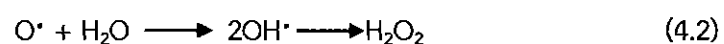
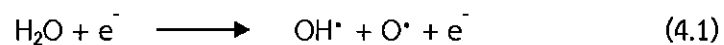
จากการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ใช้เวลาการย่อยสลาย 5 ชั่วโมง ซึ่งเปรียบเทียบผลของพลาสมาที่มีต่อการย่อยสลาย วัดค่าอุณหภูมิของระบบได้ที่ 80 องศาเซลเซียส จึงทำการทดลองโดยย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มในกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ โดยการให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้การไฮโดรไลซิสเพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 4.1 พบว่าการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ให้ปริมาณร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ 3.97 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลาสมาวิทยุภาคของเหลวให้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ 0 ถึง 5 ชั่วโมง และเกิดร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงถึง 35 ซึ่งแสดงให้เห็นผลของพลาสมาที่ส่งเสริมการย่อยสลายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

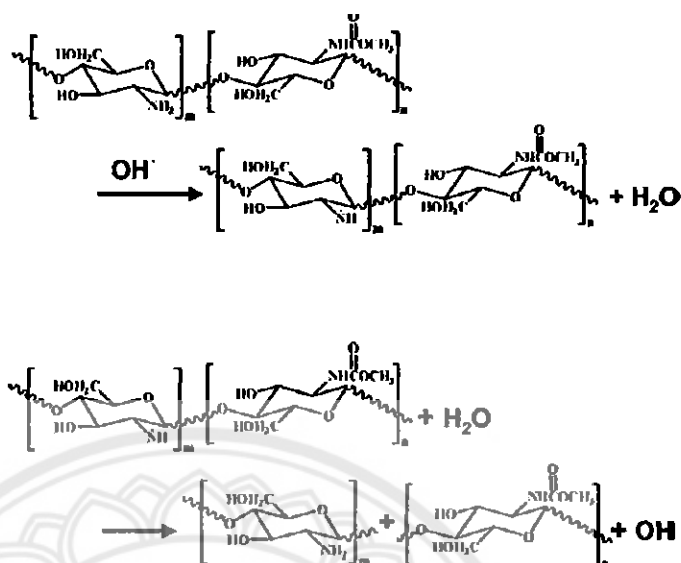




รูปที่ 4.1 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีตีวซ์ที่เวลาต่างๆ โดยใช้กรดซัลฟิวริก 0.16 โมลาร์

ในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มเพื่อให้ได้น้ำตาลรีตีวซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว นั้น นอกจากจะใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยตัวทำละลายกรดแล้ว ยังอาศัยกลไกการย่อยสลายในระหว่างการดำเนินการย่อยสลายด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวเข้าร่วมด้วย จากรายงานการวิจัยของ I. Prasertsung และคณะ [9] ได้ศึกษาการย่อยสลายโคโคซานด้วยพลาสมาวิภาคของเหลวซึ่งโคโคซานมีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ลักษณะคล้ายคลึงกับกากตะกอนน้ำมันปาล์ม โดยพลาสมาจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันจากการแตกตัวของน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายหลักเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^*$ ) ดังสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันอิสระที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของพลาสมา ซึ่งสามารถทำลายพันธะไกลโคซิดิกของคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ ส่งผลทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง โดยกลไกการย่อยสลายจะเริ่มจากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเกิดการชนและดึงไฮโดรเจนอะตอมออกเป็นน้ำที่ตำแหน่ง 2 จากนั้นหมู่ฟังก์ชันจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่ชนทำให้เกิดความไม่เสถียรและพันธะไกลโคซิดิกถูกทำลายลงด้วยแรงดึงของหมู่ฟังก์ชัน เมื่อสายโซ่ถูกตัดจะมีโมเลกุลไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนอิสระเข้ามาสร้างพันธะเกิดเป็นรูปแบบโครงสร้างดั้งเดิมเพียงแต่มีความยาวสายโซ่ที่สั้นลงแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจากกลไกการย่อยสลายจะชี้ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้พลาสมาวิภาคของเหลวจะช่วยส่งเสริมการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและโครงสร้างคล้ายคลึงกับโคโคซานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

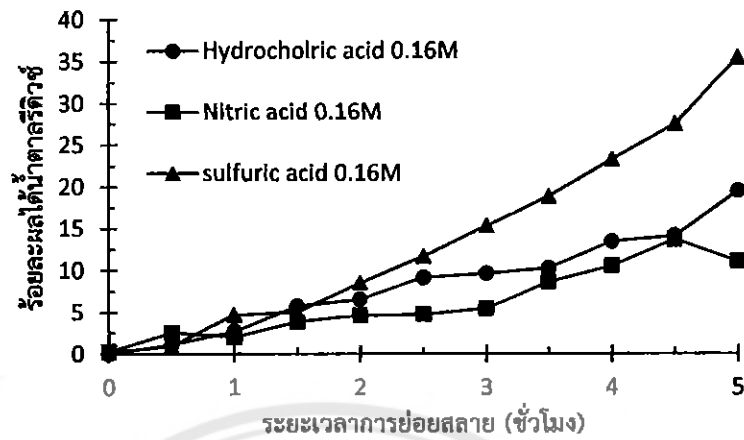




รูปที่ 4.2 กลไกการย่อยสลายด้วยหมู่ฮวงไวของกระบวนการพลาสมาวิฏภาคของเหลว [9]

#### 4.3 ผลของชนิดกรดต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

เนื่องจากการย่อยสลายสามารถเกิดจากกรดหลากหลายชนิด ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาชนิดของกรดที่มีความเหมาะสมในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิฏภาคของเหลว โดยกรดที่ใช้ศึกษาได้แก่ กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก โดยการศึกษานี้จะควบคุมสภาวะตัวทำละลายกรดไว้ที่ความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ที่ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากรดไนตริกจะแบ่งกราฟเป็น 2 ช่วงคือช่วงเวลาที่ 0 ถึง 2 ชั่วโมงจะเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นในปริมาณเล็กน้อย ส่วนช่วงเวลาที่ 3 ถึง 5 จะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่ 4.5 ชั่วโมงเป็นร้อยละ 13.6 ส่วนกรดไฮโดรคลอริกจะแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วงคือช่วงเวลาที่ 0 ถึง 3 ชั่วโมงจะเกิดน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องช่วงเวลาที่ 3 ถึง 4 ชั่วโมงจะเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นเพียงเล็กน้อยจากนั้นช่วงเวลาที่ 4 ถึง 5 ชั่วโมงจะมีแนวโน้มการเกิดน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอีกครั้งทำให้ได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่ร้อยละ 19.5 ที่เวลา 5 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลจากการใช้กรดซัลฟิวริกพบว่าเกิดน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เวลา 0 ถึง 5 ชั่วโมง และเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นสูงสุดร้อยละ 35 ทั้งนี้เนื่องจากกรดทั้ง 3 ชนิดเป็นกรดแก่ที่มีความสามารถในการแตกตัวได้ 100 เปอร์เซ็นต์ในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ ความสามารถในการแตกตัวในตัวทำละลายนั้นจะแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่เวลาและชนิดของกรดที่แตกต่างกัน ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

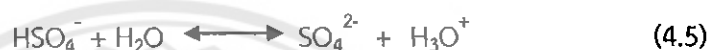
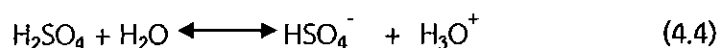
ตารางที่ 4.2 ช่วงของค่า pKa หรือค่าการแตกตัวของกรดในน้ำ [48]

Strongest Acid	Acid	pKa	Conjugate Base	Weakest Base
	HI	-10	I <sup>-</sup>	
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-9	HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	
	HCl	-7	Cl <sup>-</sup>	
	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> SO <sub>3</sub> H	-6.5	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	-1.7	H <sub>2</sub> O	
	HNO <sub>3</sub>	-1.4	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
	CF <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H	0.2	CF <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	4.6	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub>	
	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H	4.8	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	9.2	NH <sub>3</sub>	
	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	9.9	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sup>-</sup>	
	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	10.6	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	
	H <sub>2</sub> O	15.7	OH <sup>-</sup>	
	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	16	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	
	CH ≡ CH	25	CH ≡ C <sup>-</sup>	
	NH <sub>3</sub>	38	NH <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
	CH <sub>2</sub> = CH <sub>2</sub>	44	CH <sub>2</sub> = CH <sup>-</sup>	
Weakest Acid	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	50	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Strongest Base

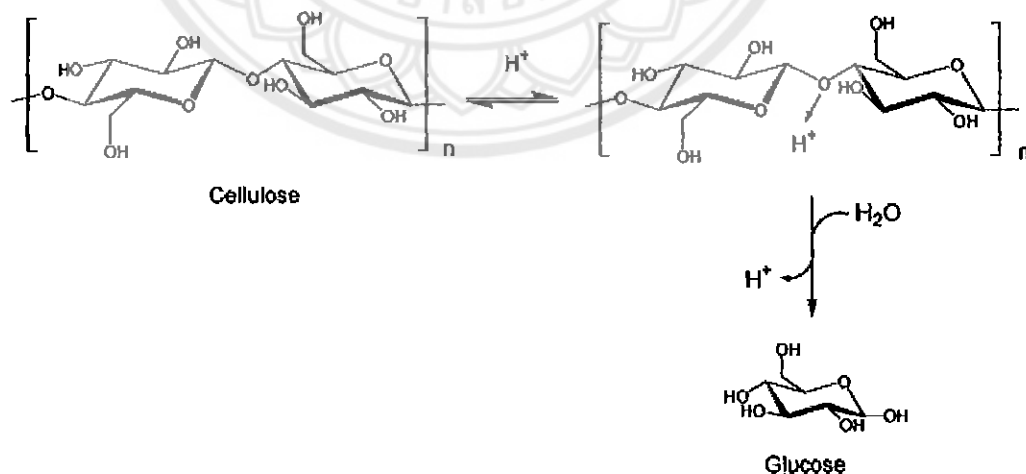
จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นค่าการแตกตัวของกรดในน้ำ (pK<sub>a</sub>) และสามารถคำนวณค่าคงที่การแตกตัวในตัวทำละลาย (K<sub>a</sub>) ที่จะสามารถบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการแตกตัวของกรดในสารละลายจากค่าการแตกตัวของกรดในน้ำ ดังสมการที่ 4.3

$$pK_a = -\log K_a \quad (4.3)$$

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่ากรดทั้ง 3 ชนิดเป็นกรดแก่ที่สามารถแตกตัวได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีค่ามากกว่าค่าการแตกตัวของกรดอ่อน ( $10^{-14}$  ถึง  $10^0$ ) จากสมการที่ 4.2 สามารถหาค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก จะมีค่าประมาณ  $10^{15}$  และ  $10^8$  ตามลำดับ และเนื่องจากค่าคงที่การแตกตัวในตัวทำละลายของกรดซัลฟิวริกมีค่าที่มากที่สุด จึงทำให้กรดซัลฟิวริกมีความสามารถในการแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออนได้มากที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของกรดซัลฟิวริกในน้ำจะแสดงในสมการที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



เมื่อพิจารณาจากสมการการแตกตัวพบว่าหนึ่งโมเลกุลของกรดซัลฟิวริกจะประกอบด้วยอะตอมไฮโดรเจนจำนวน 2 อะตอม เมื่อกรดซัลฟิวริกแตกตัวในน้ำในลักษณะกรดแก่จะทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเนียมไอออนหนึ่งโมเลกุล จากนั้นไฮโดรเจนซัลเฟตไอออนสามารถแตกตัวในน้ำในลักษณะกรดอ่อนทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเนียมไอออนอีกหนึ่งโมเลกุล ซึ่งไฮโดรเนียมไอออนจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ เมื่อพิจารณากลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยไฮโดรเนียมไอออนที่ได้จากการแตกตัวของกรดเพื่อทำลายพันธะไกลโคซิดิก เริ่มจากไฮโดรเนียมไอออนเข้ามาชนและเกิดพันธะที่ตำแหน่งออกซิเจนอะตอมของพันธะไกลโคซิดิกเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล จากนั้นพันธะไกลโคซิดิกจะถูกทำลายด้วยแรงของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล เมื่อสายโซ่ถูกตัดจะมีโมเลกุลของน้ำเข้ามาสร้างพันธะเกิดเป็นรูปแบบโครงสร้างดั้งเดิมเพียงแต่มีความยาวสายโซ่ที่สั้นลง แสดงในรูป 4.4



รูปที่ 4.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด [46]

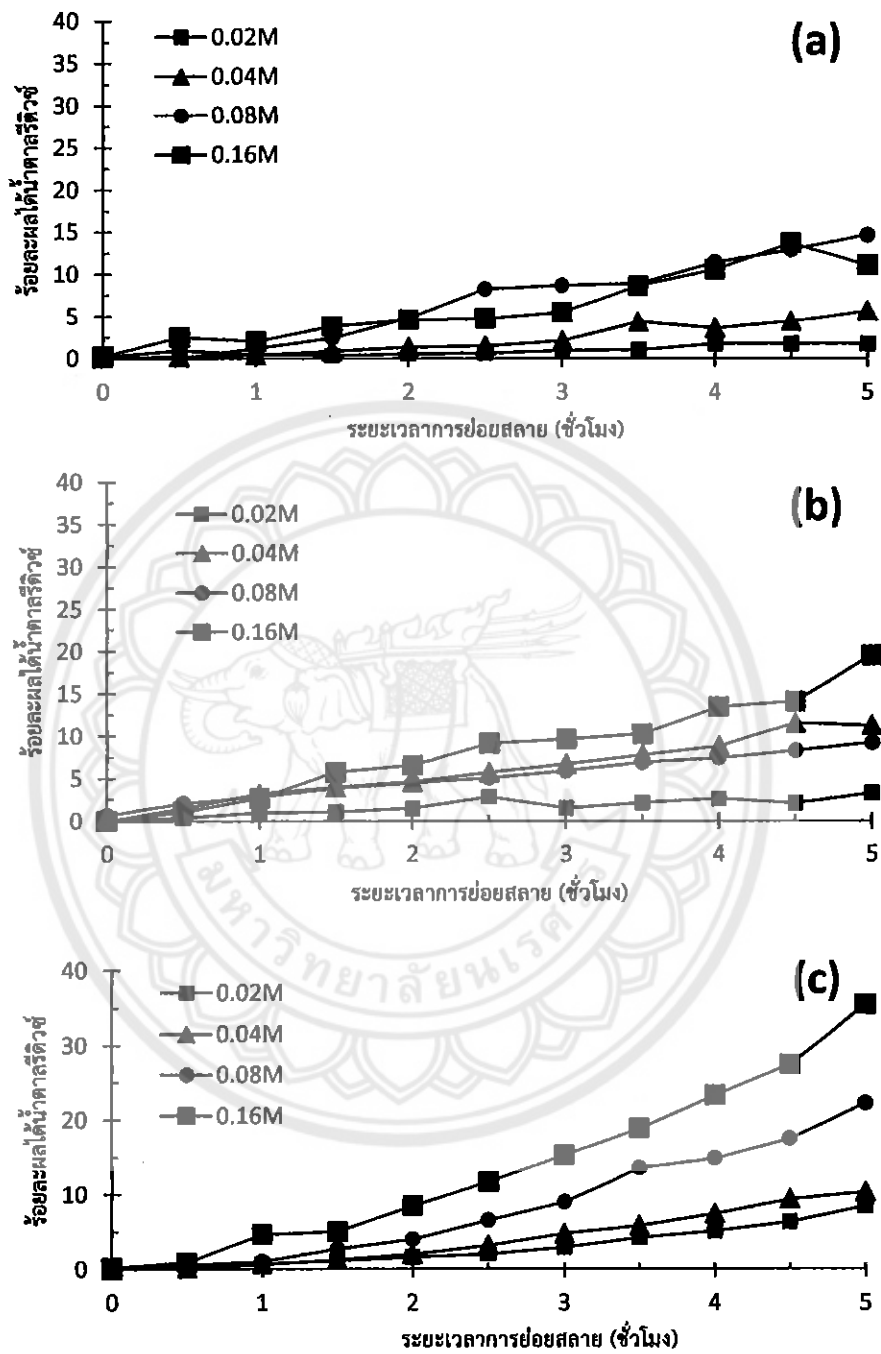
จากงานวิจัยของ Y. Zheng และคณะ [44] ตัวทำละลายกรดสามารถละลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ดี ซึ่งส่งผลให้การย่อยสลายมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และจากงานวิจัยของ E.I. Evstigneev [45] การละลายของลิกนินจะขึ้นอยู่กับค่า pH และ  $pK_a$  ของสารละลาย ดังสมการที่ 4.6 จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เห็นว่ากรดส่งผลต่อการละลายตามลำดับ การละลายที่ดีขึ้นจะส่งผลถึงการสัมผัสกันที่ดีขึ้นของกากตะกอนน้ำมันปาล์มและหมู่วางจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ได้เร็วขึ้น

$$S_{f=0.5} = F(pK_a/pH + pK_a) \quad (4.6)$$

เมื่อพิจารณาจากกลไกการเกิดปฏิกิริยารวม ความสามารถในการแตกตัวของกรด และความสามารถในการละลายลิกนิน แสดงให้เห็นว่ากรดซัลฟิวริกจะส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซิส กากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลวและส่งผลให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์ดีกว่า กรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก

#### 4.4 ผลของความเข้มข้นกรดต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

เนื่องจากความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดมีผลต่อการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์ม ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดที่เหมาะสมในการย่อยสลายกากตะกอน น้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิฤภาคของเหลว จากรูปที่ 4.5 (a) จะเห็นได้ว่ากรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 0.02 โมลาร์และ 0.04 โมลาร์จะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณเล็กน้อยคือ ร้อยละ 1.7 และร้อยละ 5.6 ที่เวลา 5 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.08 โมลาร์และ 0.16 โมลาร์จะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 14.6 ที่เวลา 5 ชั่วโมงและร้อยละ 13.6 ที่เวลา 4.5 ชั่วโมงตามลำดับ รูปที่ 4.5 (b) แสดงผลของกรดไฮโดรคลอริกพบว่าที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณเพียงเล็กน้อยคือร้อยละ 3.2 ที่เวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 11.5 ที่เวลา 4.5 ชั่วโมง และ 0.08 โมลาร์ให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 9.1 ที่เวลา 5 ชั่วโมง และที่ความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ให้ ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 19.5 ที่เวลา 5 ชั่วโมงซึ่งมากกว่าที่ความเข้มข้น 0.02 0.04 0.08 โมลาร์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ก็จะ เพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 4.5 (c) แสดงผลของกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์และ 0.04 โมลาร์จะ ให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณเล็กน้อยและใกล้เคียงกันคือร้อยละ 8.4 และร้อยละ 10.3 ตามลำดับ ที่เวลาที่ใช้ในการทรีท 5 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ เพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 22.2 ที่เวลา 5 ชั่วโมงและที่ความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้นร้อยละ 35.5 ซึ่งผลที่ได้ทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีตีวซ์ที่เวลาต่างๆโดยใช้ความเข้มข้นที่ต่างกัน ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ (a) กรดไนตริก (b) กรดไฮโดรคลอริก (c) กรดซัลฟิวริก

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของกรดสูงจะทำให้มีปริมาณ  $H^+$  มากขึ้น และค่า pH ลดลงทำให้ลิกนินละลายได้มากขึ้น ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเซลลูโลสที่รวดเร็วขึ้น นอกจากนั้นแล้วการเพิ่มความเข้มข้นของกรดจะเกิดการแตกตัวของกรดเป็นไฮโดรเนียมไอออนได้มากขึ้นตามปริมาณของกรดที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ที่ทำลายพันธะไกลโคไซด์ระหว่างโมเลกุลของกากตะกอนน้ำมันปาล์มทำให้อยู่สลายเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากขึ้น ซึ่งกลไกจากย่อยสลายได้อธิบายและแสดงในรูปที่ 4.4

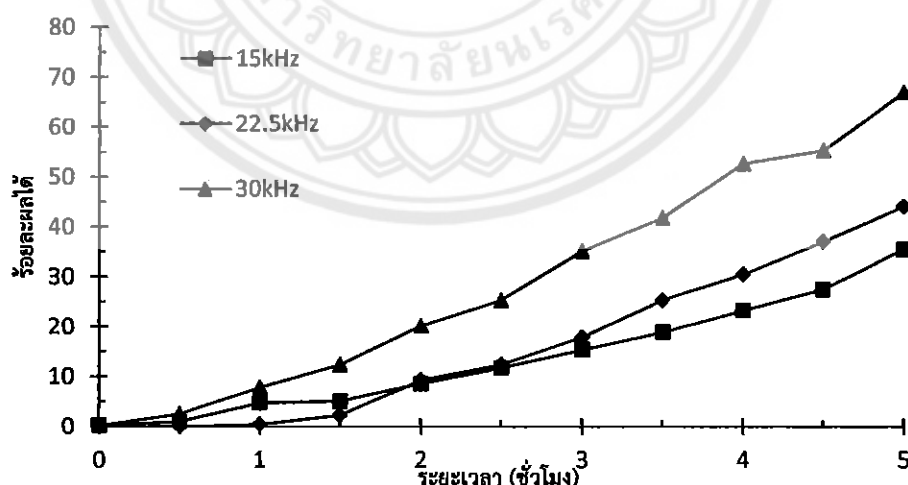
ในส่วนของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ช่วงระยะเวลา 2 – 3 ชั่วโมง เกิดการย่อยสลายช้าลง คาดว่าเนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มากขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรด ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเป็นน้ำ ทำให้เกิดการย่อยสลายที่ช้าลงและได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่ากรดไนตริกความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ ในช่วงเวลาเดียวกัน และร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ลดลงหลังจาก 4.5 ชั่วโมง เมื่อใช้กรดไนตริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ เนื่องจากการละลายลิกนินที่ห่อหุ้มเซลลูโลสอยู่ได้ดีจนกระทั่งสามารถทำปฏิกิริยาย่อยสลายกับเซลลูโลสจนเหลือปริมาณน้อย และปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่มากในระบบอาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำตาลรีดิวซ์

นอกจากนั้นแล้วการประยุกต์ใช้การกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะช่วยให้ย่อยสลายของกากตะกอนน้ำมันปาล์มได้ดีขึ้น ซึ่งในระหว่างการทำรีดิวซ์ด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะสามารถผลิตหมู่ฟังก์ชันต่างๆ หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical,  $OH^{\cdot}$ ) ซึ่งเป็นหนึ่งในหมู่ฟังก์ชันที่ได้จากกระบวนการพลาสมา ซึ่งมีส่วนช่วยทำหน้าที่ในการสลายพันธะไกลโคไซด์ภายในโครงสร้างของเซลลูโลสดังที่แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะช่วยให้ย่อยสลายของกากตะกอนน้ำมันปาล์มได้ดีขึ้นและส่งผลให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้นด้วย

#### 4.5 ผลของความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

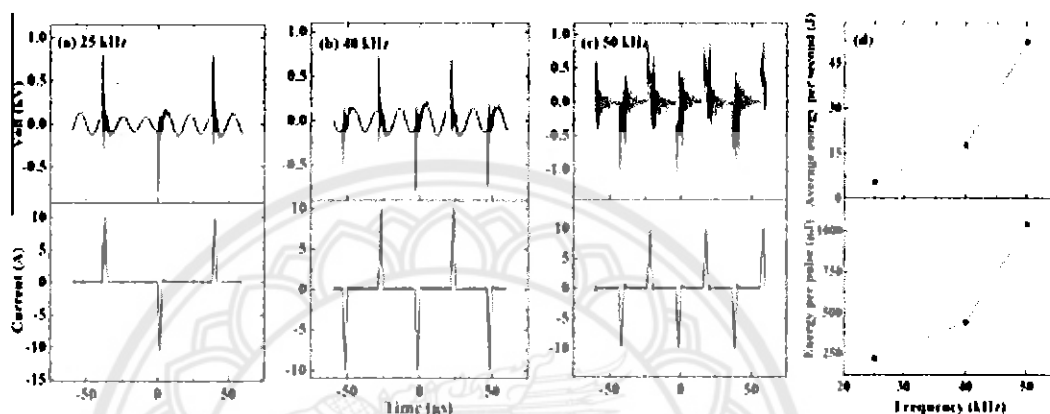
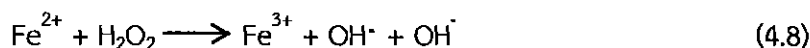
เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองก่อนหน้านี้นี้ สรุปได้ว่าเมื่อทำการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ เกิดน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด ดังนั้นจึงทำการศึกษาต่อในด้านพลังงานที่ให้แก่กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว จากการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มโดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบ สภาวะที่ดีที่สุดคือกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของความถี่ของพลาสมาที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ ที่ความถี่ที่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์จะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงร้อยละ 35.5 ที่เวลาในการทรีท 5 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์จะเริ่มให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงทำให้ในช่วงเวลา 0 ถึง 2 ชั่วโมงเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นน้อยกว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์และ

ช่วงเวลา 2 ถึง 5 ชั่วโมง เกิดน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องถึงร้อยละ 44.1 ที่เวลา 5 ชั่วโมง และที่ความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์เกิดน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 67 เมื่อเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์และ 22.5 กิโลเฮิร์ตซ์ เนื่องจากการเพิ่มความถี่ของระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นการเพิ่มพลังงานเข้าไปในระบบ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Kang และคณะ [49] ซึ่งได้ศึกษาผลของการเพิ่มความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาพบว่า การเพิ่มความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมาจะช่วยเพิ่มพลังงานต่อพัลส์ของพลาสมาที่ผลิตได้ ส่งผลทำให้ระบบมีพลังงานสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.7 นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการทำลายชีวอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างการทำลายด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่มากขึ้น ซึ่งไอออนหรืออนุภาคเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดเพอร์ร็อกไซด์ไอออน ดังสมการที่ 4.7 ซึ่งเพอร์ร็อกไซด์ไอออนมีส่วนช่วยเสริมในปฏิกิริยาเฟนตอน ดังสมการที่ 4.8 และ 4.9 และจะสร้างหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นจำนวน ตามรายงานการวิจัยของ K.L.B. Chang และคณะ [50] นอกจากนี้การศึกษาของ T. Tantiplapol และคณะ [42] ซึ่งรายงานไว้ว่า เมื่อเพิ่มความถี่ของระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงสรุปว่า การเพิ่มความถี่ของระบบพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะทำให้เกิดหมู่ว่องไวที่มากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการเข้าไปสลายพันธะไกลโคไซด์ระหว่างโมเลกุลของของกาทอะกอนน้ำมันปาล์มได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ความถี่ที่ต่างกัน

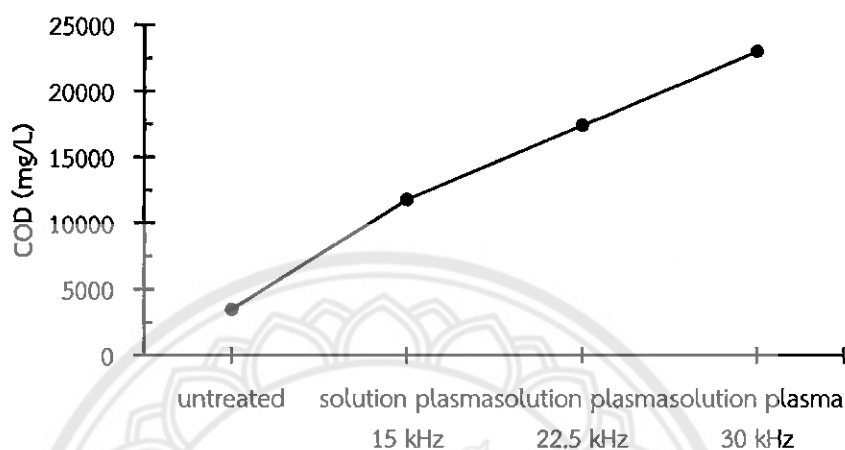




รูปที่ 4.7 กราฟแสดงพลังงานต่อพัลส์กับความถี่ [49]

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 โดยใช้กากตะกอนน้ำมันปาล์มเริ่มต้น 1 กรัม พบว่า ค่าซีโอดีของกากตะกอนน้ำมันปาล์มเท่ากับ 3,480 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 11,800 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการย่อยสลายด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ภายใต้พลาสมาอุณหภูมิของเหลวที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 17,400 และ 23,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะเดียวกันที่ความถี่ 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ เนื่องจากพลาสมาอุณหภูมิของเหลวสามารถย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มเป็นสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 4.10 ตามรายงานการวิจัยของ DW. Hamilton [54] จากรายงานการวิจัยของจักร ผลพันธิน และคณะ [55] ได้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียภาคอุตสาหกรรม พบว่าน้ำเสียที่มีปริมาณค่าซีโอดีที่สูงมากทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพนั้นได้ปริมาณที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ปริมาณซีโอดีนั้นส่งผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยตรง และทำให้กากตะกอนน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทรีตด้วยพลาสมาอุณหภูมิของเหลวมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตเป็นสารชนิดอื่นที่มีมูลค่า ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการหมักเพื่อผลิตมีเทน เนื่องจากค่าซีโอดีที่มีปริมาณมากสามารถ ทำให้เกิดก๊าซมีเทนปริมาณมากขึ้นด้วยการหมัก ดังสมการที่ 4.11 จากการศึกษาของ Y.J. Chan และคณะ [56] พบว่าสารตั้งต้นจะเหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อค่าซีโอดีมากกว่า 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับระบบการหมัก ยกตัวอย่างเช่น ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ

มีค่าซีไอดีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3,248 ถึง 12,150 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบยูเอเอสบีมีค่าซีไอดีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 500 ถึง 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น



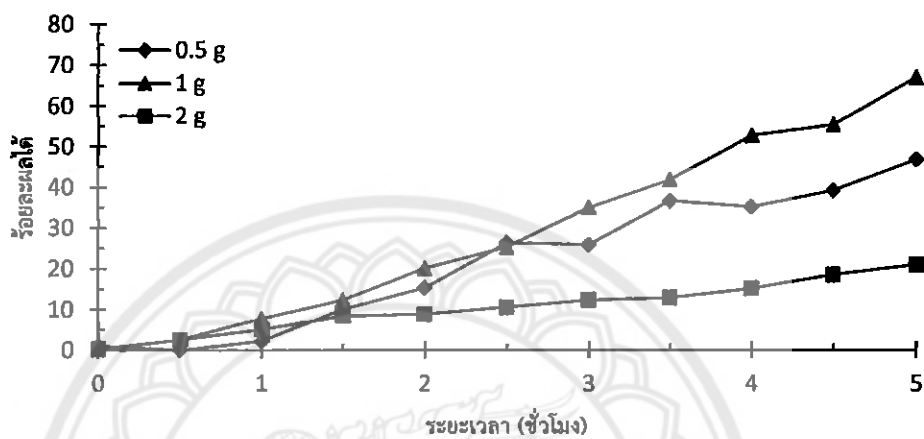
รูปที่ 4.8 ผลของความถี่พลาสมาต่อค่าซีไอดี ที่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์



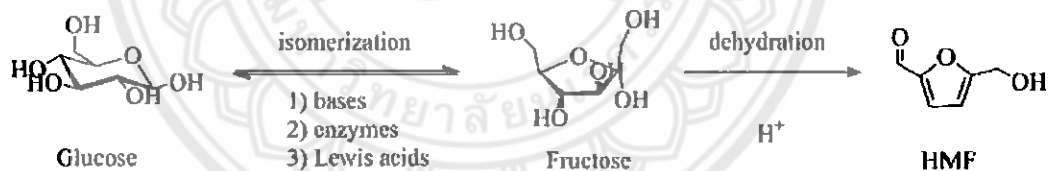
#### 4.6 ผลของปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์มเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์

พิจารณาจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 2 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตรที่เวลาในการทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลว 5 ชั่วโมงจะได้อ้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 20.9 ที่ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 0.5 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตรเวลาในการทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลว 5 ชั่วโมงจะได้อ้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 46.8 และที่ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตรที่เวลาในการทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลว 5 ชั่วโมงจะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 67 เนื่องจากที่ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 2 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร มีจำนวนกากตะกอนน้ำมันปาล์มอยู่มากในตัวทำละลาย ซึ่งบ่งบอกได้ถึงจำนวนของพันธะไกลโคไซด์จำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 0.5 และ 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร และเมื่อมีปริมาณสารเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละของการละลายลิกนินลดลงตามสัดส่วนของตัวทำละลายต่อตัวถูกละลาย แต่ที่ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 0.5 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตรจะให้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์ม 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร เนื่องปฏิกิริยาข้างเคียงที่

สามารถเกิดขึ้นโดยกลูโคสที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสามารถเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นฟรุคโตส จากนั้นจากฟรุคโตสกับไฮโดรเจนไอออนสามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันผลิตสาร 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอพิวราล (HMF) ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ที่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.16 โมลาร์ ที่เวลาต่างๆ โดยใช้ปริมาณสารตั้งต้นที่ต่างกัน



รูปที่ 4.10 กลูโคสเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเกิดสาร HMF [51]

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษานี้ เป็นการนำกากตะกอนน้ำมันปาล์มในสารละลายกรดเจือจางมาทรีทด้วย พลาสมาวิทยุภาคของเหลว พบว่า ได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไฮโดรไลซิสเพียงอย่างเดียว ชนิดของกรดมีผลต่อการย่อยสลายโดยกรดซัลฟิวริกมีความสามารถในการแตกตัวให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน 2 โมเลกุล และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดทำให้มีปริมาณ  $H^+$  ส่งผลต่อปฏิกิริยาทำให้เกิดได้อย่างรวดเร็ว ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมามีผลต่อพลังงานในระบบส่งผลให้เกิดการเร่งการแตกตัวของสารละลายกรด เกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อการทำลายของซัลโฟนิลกรดหลักซึ่งช่วยส่งเสริมปฏิกิริยากากตะกอนน้ำมันปาล์ม และปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมคือ 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร โดยที่ได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดร้อยละ 67 ที่ความถี่ของเครื่องกำเนิดพลาสมา 30 กิโลเฮิร์ตซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.16 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้กากตะกอนน้ำมันปาล์ม 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าซีโอดีของกากตะกอนน้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการทรีทด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสูงซึ่งมีผลที่ดีในการนำไปเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ ในการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการใช้กระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวมีศักยภาพในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มเพื่อเตรียมน้ำตาลรีดิวซ์สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษการย่อยสลายกากตะกอนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว แม้ว่าจะได้ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ค่อนข้างมากด้วยกรดเจือจางในระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้น แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ค่าของกากตะกอนน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทรีทด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวซึ่ง COD ที่มีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถนำไปหมักเพื่อผลิตเป็น Bio gas ได้ดีขึ้น และน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวควรจะมีการนำไปผลิตเป็นเอทานอลเพื่อเป็นพลังงานทดแทนต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Jinping and W. Hailiang, A novel facile two-step method for producing glucose from cellulose, *Bioresource Technology*, 2013;137: 106-110.
- [2] S. Ye and C. Jiayang, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production, *Bioresource Technology*, 2002; 83: 1-11.
- [3] S. Baccaro and M. Carewska, Structure modifications and interaction with moisture in  $\gamma$ - irradiated pure cellulose by thermal analysis and infrared spectroscopy, *Polymer Degradation and Stability*, 2013; 98: 2005-2010.
- [4] J. S. Lee, B. Parameswaran, J. P. Lee and S. C. Park, Recent Developments of Key Technologies on Cellulosic Ethanol Production, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2008; 67: 865-873.
- [5] S. Y. Ahmed, N. P. Ghildyal, A. A. M. Kunhi and B. K. Lonsane, Confectioner's syrup from tapioca processing waste, *Starch/Stärke*, 1982; 35: 430-432.
- [6] A. L. Woiciechowski, S. Nitsche, A. Pandey and C. R. Soccol, Acid and enzymatic hydrolysis to recover reducing sugars from cassava bagasse: an economic study, *Brazilian Arch. Biol. Technol.*, 2002; 45: 393-400.
- [7] A. Yahya, C. P. Sye, T. A. Ishola and H. Suryanto, Effect of Adding Palm Oil Mill Decanter Cake Slurry with Regular Turning Operation on the Composting Process and Quality of Compost from Oil Palm Empty Fruit Bunches, *Bioresource Technology*, 2010; 101: 8736-8741.
- [8] O. Takai, Solution plasma processing (SPP), *Pure Appl. Chem.*, 2008; 80: 2003-2011.

- [9] I. Prasertsung, S. Damrongsakkul, C. Terashima, N. Saito and O. Takai, Preparation of low molecular weight chitosan using solution plasma system, *Carbohydrate Polymers*, 2013; 87: 2745-2749.
- [10] I. Prasertsung, S. Damrongsakkul and N. Saito, Degradation of  $\beta$ -chitosan by solution plasma process, *Polymer Degradation and Stability*, 2013; 98: 2089-2093.
- [11] O. Pornsunthorntawe, C. Katepetch, C. Vanichvattanadecha, N. Saito and R. Rujiravanit, Depolymerization of chitosan-metal complexes via a solution plasmatechnique, *Carbohydrate Polymers*, 2014; 102:504 – 512.
- [12] M. S. Naimah, S. B. Azhari, M. Noriznan, B. Zainuri and S. Alawi, Physicochemical Characterization of Oil Palm Decanter Cake (OPDC) for Residual Oil Recovery, *BioResources*, 2014; 9(4): 6361-6372.
- [13] R. Pawongrat, Pretreatment processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic agricultural wastes, *Veridian E-Journal Sci and Tech Silpakorn University*, 2015; 2(1): 143-157.
- [14] J. Q. Zhang, L. Lin, Y. Sun, G. Mitchell and S. J. Liu, Advance of studies on structure and decrystallization of cellulose, *Chem Ind For Prod.*, 2008; 28(6): 109-14.
- [15] N. Jinping, W. Hailiang, C. Yinying, S. Zhen, N. Haining and Z. Jin, A novel facile two-step method for producing glucose from cellulose, *Bioresource Technology*, 2013; 137: 106-110.
- [16] E. Q. C. Rosa and L. F. M. Jorge, Cellulases for the Production of Sugars, *Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass - Techniques, Applications and Commercialization*, Dr. Anuj Chandel (Ed.). 2013: 119-156.
- [17] P. Zugenmaier, Conformation and packing of various crystalline cellulose fibers, *Prog Polym Sci.*, 2001; 26(9): 1341-417.

- [18] S. H. Yang, Plant fiber chemistry, Beijing: China Light Industry Press, 2008.
- [19] J. Zhang, L. Lin, T. Chen, J. Zhang, S. Liu, Z. Li and P. Ouyang, Dissolution of microcrystalline cellulose in phosphoric acid--molecular changes and kinetics, *Molecules*, 2009; 14(12): 5027-5041.
- [20] Q. Minxie, S. Silvia, D. Hugues and P. Francoise, Structure of a pancreatic  $\alpha$ -amylase bound to a substrate analogue at 2.03 Å resolution, *Protein Science*, 1997; 6: 2285-2296.
- [21] C. Yang, Z. Shen, G. Yu and J. Wang, Effect and after effect of gamma radiation pretreatment on enzymatic hydrolysis of wheat straw, *Bioresour Technol.*, 2008; 99(14): 6240-6245.
- [22] P. Zhang, H. R. Hu and S. L. Shi, Application of hemicellulose, *Tianjin Pap Mak.*, 2006; 2: 16-18.
- [23] Z. F. Yin and R. W. Fan, The research progress of plant cell wall, *Bull Bot Res.*, 1999; 19(4): 407-14.
- [24] W. Chen, L. Zhong, X. Peng, K. Wang, Z. Chena and R. Sun. Xylan-type hemicellulose supported palladium nanoparticles: a highly efficient and reusable catalyst for the carbon-carbon coupling reactions, *Catal. Sci. Technol.*, 2014; 4: 1426-1435.
- [25] B. J. Douglas, J. B. Michael, D. B. Jay, S. D. Bruce, E. H. Ronald, C. L. Charles, A. M. Jeffrey and W. Kurt, Plant cell walls to ethanol, *Biochemical Journal*, 2012; 442(2): 241-252.
- [26] M. Bhalekarl, S. Sonawanell and S. Shimpi, Synthesis and characterization of a cysteine xyloglucan conjugate as mucoadhesive polymer, *Braz. J. Pharm. Sci.*, 2013; 49(2): 285-292.

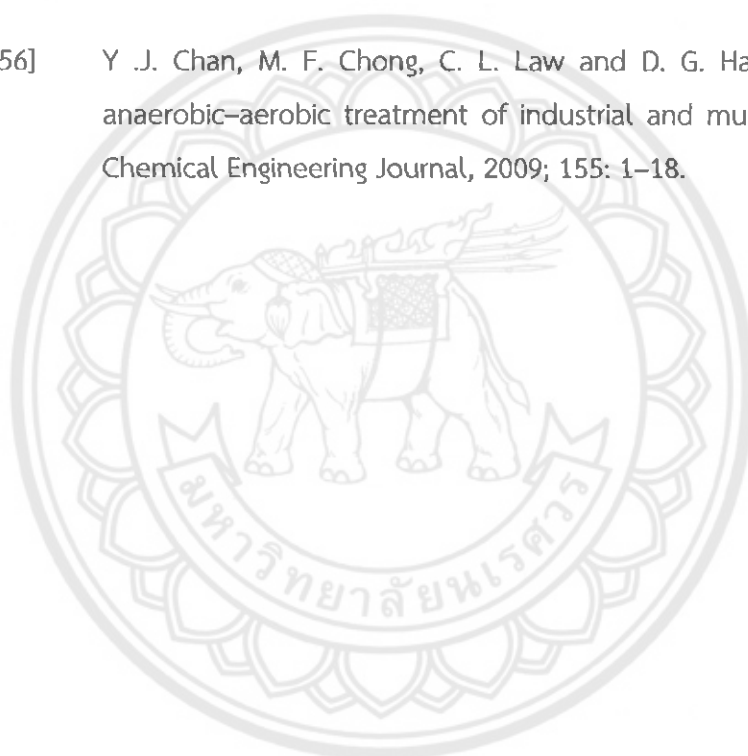
- [27] Z. Qian, P. Xinrui, G. Michelle, Y. T. Jon and C. T. Chang, Using fluorogenic probes for the investigation of selective biomass degradation by fungi, *Green Chem.*, 2015; 17: 1918-1925.
- [28] E. B. L. Robin, L. Wei, C. Delphi and E. L. Richard, Rapid structural characterization of the arabinogalactan and lipoarabinomannan in live mycobacterial cells using 2D and 3D HR-MAS NMR: structural changes in the arabinan due to ethambutol treatment and gene mutation are observed, *Glycobiology*, 2005; 15 (2): 139-151.
- [29] N. T. Natalya, N. M. Elena, V. I. Nadezhda, A. M. Yuriy and A. Vasiliy, Polysaccharides from Larch Biomass, *The Complex World of Polysaccharides*, Dr. Desiree Nedra Karunaratne (Ed.), 2012: 153-194.
- [30] K. Hirokazu, O. Hidetoshi and F. Atsushi, Conversion of lignocellulose into renewable chemicals by heterogeneous catalysis, *Catal. Sci. Technol.*, 2012; 2: 869-883.
- [31] J. H. Wei and Y. R. Song, Recent advances in study of lignin biosynthesis and manipulation, *J Integr Plant Biol.*, 2001; 43(8): 771-779.
- [32] H. Chen, Chemical Composition and Structure of Natural Lignocellulose, *Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Practice*, 2014: 25-71.
- [33] W. H. Qiu and H. Z. Chen, Structure, function and higher value application of lignin, *J Cellul Sci Technol.*, 2006; 14(1): 52-9.
- [34] นันทิกา คล้ายชม เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และ อนุสิทธิ์ ธนะพิมพ์เมธา, การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากซางข้าวฟ่างหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด, *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 2554; 24(75): 91-102.
- [35] S. Kongruang, M. J. Han, C. I. G. Breton and M. H. Penner, Quantitative Analysis of Cellulose-Reducing Ends, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2004; 113(1): 213-231.



- [36] M. L. Xia, L. Wang, Z. X. Yang and H. Z. Chen, A novel digital color analysis method for rapid glucose detection, *Anal. Methods*, 2015; 7: 6654-6663.
- [37] D. W. Kim, O. L. Li, P. Pootawang and N. Saito, Solution plasma synthesis process of tungsten carbide on N-doped carbon nanocomposite with enhanced catalytic ORR activity and durability, *RSC Advances*, 2014; 4(32): 16813-16819.
- [38] B. Cheirsilp S. Loyarkat, and K. Umsakul, Decanter cake waste as a renewable substrate for biobutanol production by *Clostridium beijerinckii*, *Process Biochemistry*, 2013; 48(12): 1933-1941.
- [39] M. S. Kalil, H. Shukor, N. K. N. Al-Shorgani, P. Abdeshahian, A. A. Hamid, N. Anuar, and N. A. Rahman Production of butanol by *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 from palm kernel cake in acetone–butanol–ethanol fermentation using an empirical model, *Bioresource Technology*, 2014; 170: 565-573.
- [40] S. P. Fan, L. Q. Jiang, C. H. Chia, Z. Fang, S. Zakaria and K. L. Chee, High yield production of sugars from deproteinated palm kernel cake under microwave irradiation via dilute sulfuric acid hydrolysis, *Bioresource Technology*, 2014; 153: 69–78.
- [41] B. Liu, Z. Zhang and ZK. Zhao, Microwave-assisted catalytic conversion of cellulose into 5-hydroxymethylfurfural in ionic liquids, *Chemical Engineering Journal*, 2013; 215–216: 517–521.
- [42] T. Tantiplapol, Y. Singsawat, N. Narongsil, S. Damrongsakkul, N. Saito and I. Prasertsung, Influences of solution plasma conditions on degradation rate and properties of chitosan, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015; 32: 116-120
- [43] H. K. Goering and P. J. Van Soest, Forage Fiber Analyses, *Agriculture Handbook 379*, U.S. Department of Agriculture, 1970; 12.

- [44] Y. Zheng, Z. Pan and R. Zhang, Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2009; 2(3): 51-68.
- [45] E. I. Evstigneev, Specific Features of Lignin Dissolution in Aqueous and Aqueous-Organic Media, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2010; 83(3): 509-513.
- [46] V. Jollet, et al., Non-catalyzed and Pt/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-catalyzed hydrothermal cellulose dissolution-conversion: influence of the reaction parameters and analysis of the unreacted cellulose, *Green Chem.*, 2009; 11: 2052-2060.
- [47] Association of Official Analytical Chemists, *Official methods of analysis*. 13th Edition, Washington, D.C., 1980.
- [48] เสาวนาภรณ์ โชคสกุลพร, การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากอ้อยเลาโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม, 2557.
- [49] J. Kang, O. L. Li and N. Saito, Synthesis of structure-controlled carbon nano spheres by solution plasma process, *Carbon*, 2013; 60: 293-298.
- [50] K. L. B. Chang, M. C. Tai and F. H. Cheng, Kinetics and products of the degradation of chitosan by hydrogen peroxide, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001; 49: 4845-4851.
- [51] T. Wang, M. W. Nolte and B. H. Shanks, Catalytic dehydration of C6 carbohydrates for the production of hydroxymethylfurfural (HMF) as a versatile platform chemical, *Green Chem.*, 2014; 16: 548-572.
- [52] ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข, การวิเคราะห์น้ำตาลและน้ำเสียเบื้องต้น, เอกสารเผยแพร่กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556; 15: 1-19.

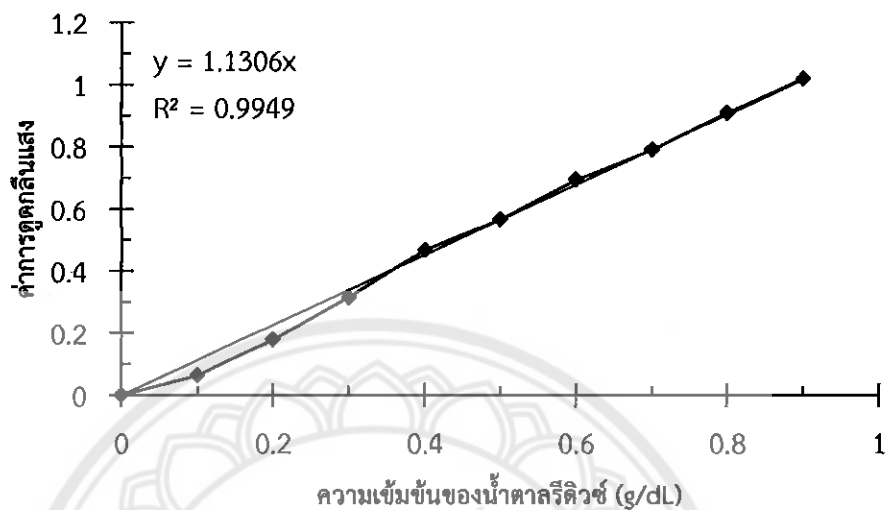
- [54] D. W. Hamilton, Anaerobic Digestion of Animal Manures Methane Production Potential of Waste Materials, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University, 2012; 1762: 1-4.
- [55] อัคร ผลพันธ์ วลัยรัตน์ อุตตะมะปรางกรม และประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, การศึกษา ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียภาคอุตสาหกรรม, วารสารวิจัยพลังงาน, 2557; 11(1): 50-62.
- [56] Y .J. Chan, M. F. Chong, C. L. Law and D. G. Hassell, A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater, Chemical Engineering Journal, 2009; 155: 1-18.





# ภาคผนวก

### กราฟมาตรฐาน



รูป ก กราฟมาตรฐานกลูโคสที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค DNS

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สามารถคำนวณได้ตั้งเส้นแนวโน้มของกราฟมาตรฐาน ดังสมการต่อไปนี้

$$x = y / 1.1306$$

โดยที่  $x$  คือ ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อเดซิลิตร)

$y$  คือ ค่าการหักเห

และสามารถคำนวณร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละผลได้น้ำตาลรีดิวซ์} = \frac{\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่วัดได้}}{\text{ปริมาณกากตะกอนน้ำมันปาล์มในสารละลาย}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังตารางต่อไปนี้

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์
0	0.003	0.1627
0.5	0.047	2.5490
1.0	0.144	7.8098
1.5	0.228	12.3655
2.0	0.371	20.1211
2.5	0.35	25.3096
3.0	0.486	35.1442
3.5	0.463	41.8512
4.0	0.583	52.6982
4.5	0.51	55.3195
5.0	0.618	67.0343

หมายเหตุ

มีการเจือจาง 6 เท่าตั้งแต่ 0 – 2 ชั่วโมง

มีการเจือจาง 8 เท่า ตั้งแต่ 2.5 – 3 ชั่วโมง

มีการเจือจาง 10 เท่า ตั้งแต่ 3.5 – 4 ชั่วโมง

มีการเจือจาง 12 เท่า ตั้งแต่ 4.5 – 5 ชั่วโมง

## ประวัติผู้จัดทำโครงการ



ชื่อ : นายศักดิ์ อินกรัด  
ภูมิลำเนา : 102 ม.1 ต.จันทิมา อ.ลานกระบือ  
จ.กำแพงเพชร 62170

### ประวัติการศึกษา:

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : sakda.ingrad@gmail.com



ชื่อ : นายสุภชัย แก้วเกลี้ยง  
ภูมิลำเนา : 59/66 ถ.ศรีธรรมไตรปิฎก ต.ในเมือง  
อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

### ประวัติการศึกษา:

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาภาคเหนือ จ.พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : suphachai.kaeokliang@gmail.com