การปรับสภาพเบื้องต้นของเศษรากมันสำปะหลังในน้ำร้อนอัดความดัน

นายธนกร นวรัตนไพบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PRETREATMENT OF CASSAVA ROOT WASTE IN HOT COMPRESSED WATER

Mr. Tanakorn Navaruttanapaibool

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับสภาพเบื้องต้นของเศษรากมันสำปะหลังในน้ำร้อนอัดความดัน
โดย	นาย ธนกร นวรัตนไพบูลย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

……....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……..……..……ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

……....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

……....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. วรกันต์ บูรพาธนะ)

……กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

……..…กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุชาดา บุตรนาค)

ธนกร นวรัตนไพบูลย์ : การปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังด้วยน้ำร้อนอัดความดัน. (PRETREATMENT OF CASSAVA ROOT WASTE IN HOT COMPRESSED WATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. วรกันต์ บูรพาธนะ, 78 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนกา รปรับสภาพเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนอัดความดันซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ใช้สำหรับปรับสภาพเบื้องต้นชีวมวลชนิดลิกโนเซลลูโลส สำหรับนำไปใช้ ในกระบวนการผลิตไบโอเอทานอล โดย ในงานวิจัยนี้ได้นำเศษรากมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบต ช์ โดยหลังจากการทำการทดลองแล้ว ของเหลวที่ได้ จากขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้น นำไปวิเคราะ ห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟของเหลวประสิทธิภาพสูง เพื่อหาปริมาณน้ำตาล เพนโทส และ เฮกโซส ส่วนของแข็งที่ได้จากขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้นนำไปผ่านกรรมวิธีการย่อยด้วยเอ นไซม์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้น ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการปรับสภาพได้แก่อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนของ แข็งต่อน้ำ และ เวลาในการปรับสภาพ โดยขั้นตอนการย่อยด้วยเอนไซม์ใช้เซลลูเลส เพื่อทำการไฮโดรไลซ์เซลลูโลส โดยควบคุมค่า ความเป็นกรด-เบสที่ 4.8 ด้วยบัฟเฟอร์ซิเตรต เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดย ณ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมัน สำปะหลังด้วยน้ำร้อนอั ดความดัน ทำให้สามารถผลิตน้ำตาลกลูโคสจากขั้นตอนการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสได้ความเข้มข้นสูงสุด 32 กรัมต่อลิตร

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

527 26824 23 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS : LIGNOCELLULOSIC MATERIAL/LIQUID HOT WATER CELLULOSE/CELLULASE/ GLUCOSE

TANAKORN NAVARUTTANAPAIBOOL: PRETREATMENT OF CASSAVA ROOT WASTE IN HOT COMPRESSED WATER. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Ph.D., CO. ADVISOR: VORAKAN BURAPATANA. Ph.D., 78 pp.

The hydrolysis in hot compressed water (HCW), or liquid hot water (LHW), was reported as a promising pretreatment of lignocellulosic materials for ethanol production. In this work, the cassava root waste was used as the lignocellulose sample. After the pretreatment process, liquid obtained from batch reactor was tested for quantifying pentose and hexose using high-performance liquid chromatography, whilst the solid sample was fed to enzymatic digesting process for measure a pretreatment efficiency. The variables that can affect the pretreatment efficiency were studied, including temperature, pressure, solid: water ratio and pretreatment time. For enzymatic digesting process, cellulase was applied to the pretreated cassava root in order to hydrolyze accessible cellulose to glucose. Note that the process variables for enzymatic digesting were fixed at pH 4.8 of citrate buffer for 48 hrs. The optimal pretreatment condition was located from the glucose concentration founded in liquid enzymatic hydrolysate (LEH). At the optimum pretreatment conditions, the highest glucose concentration of approximately 32 g/L in LEH was observed.

Department : Chemical Technology	Student's Signature .....
Field of Study : Fuel Technology	Advisor's Signature .....
Academic Year : 2011	Co-Advisor's Signature……..

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร . สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยดูแลและคอยให้คำแนะนำที่มีประโยชน์กับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร . วรกันต์ บูรพาธนะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยดูแลและคอยให้คำแนะนำที่มีประโยชน์กับงานวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนอุดหนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร . ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา และ ดร.สุชาดา บุตรนาค กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความดูแลและคอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีทั้งด้านงานวิจัยและการเรียน

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท . จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนเอนไซม์เซลลูเลสในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว ที่คอยดูแลและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์กับงานวิจัย พร้อมทั้งคอยให้ความช่วยเหลือเสมอ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ แ ละเป็นกำลังใจอยู่เสมอ

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา -มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ คอยมอบความรักความเป็นห่วงเป็นใย ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน และสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฑ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... 2

1.4 ขั้นตอนของดำเนินงานวิจัย..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

2.1 มันสำปะหลัง..... 4

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมันสำปะหลัง..... 4

2.2 ภาพรวมของชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสิก..... 6

2.2.1 เซลลูโลส..... 7

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส..... 9

2.2.3 ลิกนิน..... 10

2.3 การปรับสภาพเบื้องต้น..... 12

2.3.1 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางกายภาพ..... 14

2.3.2 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางความร้อน..... 14

หน้า

2.3.2.1กรรมวิธีน้ำร้อนอัดความดัน..... 15
2.3.3. การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางเคมี..... 15
2.3.3.1 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกรด..... 15
2.3.3.2 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยเบส..... 16
2.4 เอนไซม์ เซลลูเลส..... 17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 18
3 เครื่องมือและระเบียบการวิจัย..... 20
3.1 เครื่องมือ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง..... 20
3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง..... 20
3.1.2 เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ..... 21
3.1.3 เตาอบ..... 21
3.1.4 เครื่องทำน้ำกลั่นเกรด HPLC..... 22
3.1.5 อ่างน้ำร้อนแบบเขย่า..... 22
3.1.6 เอนไซม์เซลลูเลส..... 23
3.1.7 ซิเตรตบัฟเฟอร์..... 23
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์..... 23
3.2.1 เครื่องโครมาโทกราฟของเหลวประสิทธิภาพสูง (HPLC)..... 23
3.3 วิธีการทดลอง..... 24
3.4 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 25
3.4.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณกลูโคส..... 25
3.4.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณเฟอร์ฟูรอล..... 26
3.5 การปรับค่าอัตราการให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์..... 29
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 30
4.1 ผลการวิเคราะร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเถ้าในเศษรากมันสำปะหลัง..... 30

หน้า

4.2 ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลัง..... 31
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังก่อนและหลังการปรับสภาพเบื้องต้น..... 33
4.4 ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังต่อความเข้มข้นของกลโคสในสารละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยเศษรากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เซลลูเลส..... 34
4.5 ผลการปรับอุณหภูมิ ความดันและอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่ใช้ปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง..... 35
4.6 การหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังและผลการทดลองเชิงลึก..... 36
4.6.1 ผลของความดันในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง.. 41
4.6.2 ผลของอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง..... 42
4.6.3 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังต่อความเข้มข้นของกลูโคสที่สามารถผลิตได้..... 43
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 46
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 46
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 47
รายการอ้างอิง..... 48
ภาคผนวก..... 51
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์..... 52
ภาคผนวก ข เส้นกราฟมาตรฐาน และ ตัวอย่างโครมาโทแกรม HPLC..... 57
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง..... 63
ภาคผนวก ง น้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังก่อนและหลังการปรับสภาพเบื้องต้น..... 69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณผลผลิตทางการเกษตร.....	6
2.2	องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร.....	7
4.1	องค์ประกอบของ เศษรากมันสำปะหลังก่อนการปรับสภาพเบื้องต้น.....	30
4.2	ปริมาณร้อยละผลได้ของแข็งที่ได้หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง.....	31
4.3	ตารางแสดงองค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังก่อนและหลังการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้เศษรากมันสำปะหลังปริมาณ 50 กรัมและปรับสภาพเบื้องต้นที่ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 1 : 10.....	33
4.4	ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150-180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 1 ต่อ 10 และความดันเริ่มต้น 15 บาร์.....	34
4.5	ผลการทดลองในการเพิ่มค่าอุณหภูมิความดันที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1:10.....	35
4.6	ผลการทดลองเพิ่มอุณหภูมิ ความดันและอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่ใช้ปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง.....	36
4.7	ดุลมวลของกระบวนการผลิตกลูโคสที่ใช้อุณหภูมิต่างในการปรับสภาพเบื้องต้น...	39
4.8	ปริมาณน้ำตาลในสารละลายหลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	40
4.9	**ปริมาณ เฟอร์ฟูรอล และ 5-HMF ในตัวอย่างของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้น**.....	40
ค.1	องค์ประกอบของ เศษรากมันสำปะหลังก่อนการปรับสภาพเบื้องต้น.....	64
ค.2	องค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังที่ปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
ค.3	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	65
ค.4	ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยการใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	65
ค.5	ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นภายใต้ความดันต่างๆ.....	66

ตารางที่ หน้า

ค.6 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยการใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นภายใต้ความดันต่างๆ..... 66
ค.7 ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำต่างๆ..... 67
ค.8 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำต่างๆ..... 67
ค.9 ความเข้มข้นของกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่ช่วงเวลาต่างๆ..... 68
ค.10 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่ช่วงเวลาต่างๆ..... 68
ง.1 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 10 นาที..... 70
ง.2 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ160 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 70
ง.3 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 10 นาที..... 71
ง.4 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 10 นาที..... 71
ง.5 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 10 นาที..... 72

ตารางที่ หน้า

ง.6 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:5 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 72

ง.7 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:7.5 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 73

ง.8 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:12.5 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 73

ง.9 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:20 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 74

ง.10 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 5 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 74

ง.11 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 7.5 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 75

ง.12 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 12.5 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 75

ง.13 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 20 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 76

ตารางที่ หน้า

ง.14 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที..... 76

ง.15 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที..... 77

ง.16 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 13 นาที..... 77

ง.17 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที..... 78

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะของมันสำปะหลัง…….……..	5
2.2	เศษรากมันสำปะหลังที่เหลือทิ้งในพื้นที่การเกษตร……....	6
2.3	โครงสร้างการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส…….	8
2.4	น้ำตาลโมเลกุลเดียวที่พบในเฮมิเซลลูโลส ……	9
2.5	โครงสร้างของลิกนิน…….....	11
2.6	ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นต่อการเข้าถึงของเอนไซม์…….	13
2.7	โครงสร้างของ Furfural และ 5-HMF ……..……...	14
2.8	ปฏิกิริยา Saponification ของไตรกลีเซอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ……	16
3.1	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง ……...	20
3.2	เตาอบ……	21
3.3	เครื่องทำน้ำกลั่น.....	22
3.4	อ่างน้ำร้อนแบบเขย่า.....	22
3.5	ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคสในโปรแกรมของเครื่อง HPLC……..	25
3.6	ตัวอย่างโครมาโทแกรมที่แสดงใน Refractive index detector ของสารตัวอย่างในโปรแกรมของเครื่อง HPLC……	26
3.7	ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของเฟอฟูรอลโปรแกรมของเครื่อง HPLC …….	27
3.8	ตัวอย่างโครมาโทแกรมที่แสดงใน UV detector ของสารตัวอย่างในโปรแกรมของเครื่อง HPLC……...	28
3.9	ขั้นตอนโดยรวมของการผลิตสารละลายกลูโคสจากเศษรากมันสำปะหลัง……..	28
3.10	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ณ อุณหภูมิต่างๆ (ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส).....	29
4.1	ผลของอุณหภูมิต่ออ้อยละโดยน้ำหนักของแข็งแห้งที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังด้วยกรรมวิธีน้ำร้อนอัดความดันแล้ว……..	32

ภาพที่ หน้า

4.2 ผลของอุณหภูมิต่อน้ำหนักกลูโคสที่ผลิตได้ต่อน้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว..... 37
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของน้ำหนักกลูโคสที่ตรวจพบในสารละลายที่ได้จากกรรมวิธีการย่อยเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วด้วยเอมไซม์เซลลูเลส โดยทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1 : 10..... 37
4.4 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้จากเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ คิดเทียบกับปริมาณเซลลูโลสที่อยู่ในเศษรากมันสำปะหลังก่อนทำการปรับสภาพเบื้องต้น โดยทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1 : 10..... 38
4.5 ผลของความดันต่อปริมาณความเข้มข้นของกลูโคสในของเหลวที่ได้จากการย่อยสลายเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว ด้วยเอมไซม์เซลลูเลส โดยทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1 : 10..... 41
4.6 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้จากเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นภายใต้ความดันต่างๆ..... 42
4.7 ผลของสัดส่วนเศษรากมันสำปะหลังต่อน้ำที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังที่มีต่อร้อยละผลได้กลูโคส..... 43
4.8 ผลของเวลาในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังต่อปริมาณความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้..... 44
4.9 ผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพต่อร้อยละผลได้ของกลูโคสที่สามารถผลิตได้.. 45
ข.1 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง HPLC..... 58
ข.2 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาน้ำตาลฟรุกโตสด้วยเครื่อง HPLC..... 59
ข.3 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาน้ำตาลไซโลสด้วยเครื่อง HPLC..... 60
ข.4 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาเฟอร์ฟูรอลด้วยเครื่อง HPLC..... 61

ภาพที่ หน้า

ข.5 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหา 5-HMF ด้วยเครื่อง HPLC…….. 62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณการใช้พลังงานที่สูงขึ้นและการพึ่งพาการใช้พลังงานฟอสซิลมีบทบาทสำคัญและส่งผลกระทบในทุกๆด้าน ดังนั้นการพัฒนาและค้นหาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนและลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งซึ่งหนึ่งในทางเลือกที่มีความน่าสนใจและมีศักยภาพคือการผลิตไบโอเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นชีวมวลที่ได้จากของเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยประเทศไทยมีชีวมวลเหลือทิ้งเป็นปริมาณที่สูงมากต่อปี ยกตัวอย่างเช่น เปลือกผลไม้จากโรงงานผลไม้กระป๋อง ซังข้าวโพด ฟางข้าว ฯลฯ แต่การผลิตไบโอเอทานอลจาก ลิกโนเซลลูโลส มีอุปสรรคสำคัญ โดยจำเป็นต้องมีการนำชีวมวลดังกล่าวมาผ่านกรรมวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อกำจัดลิกนิน ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในโครงสร้างของชีวมวลออกก่อนเพื่อทำให้สามารถเข้าถึงเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารตั้งต้น ที่สามารถย่อยสลายเป็นน้ำตาลสำหรับการผลิตไบโอเอทานอล หากไม่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว โครงสร้างลิกนินจะปิดกั้นเซลลูโลส ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าถึงได้ นักวิทยาศาสตร์จึงได้หาวิธีในการกำจัดโครงสร้างลิกนินและพบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบหลายวิธีซึ่งใช้กรดและสารเคมีอื่นๆ ทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อมจึงมีการหาวิธี การสำหรับการปรับสภาพในรูปแบบใหม่ขึ้น โดยหนึ่งในวิธีที่เป็นที่สนใจคือการใช้น้ำร้อนอัดความดันซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของชีวมวล และทำลายโครงสร้างของลิกนินที่อยู่ภายในชีวมวลได้ โดยมีรายงานการทดลองกับชีวมวลบางชนิดแล้วเช่น ฟางข้าว ซังข้าวโพด ซานอ้อย และอื่นๆ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แสดงถึงความเป็นไปได้ของกรรมวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนอัดความดัน นอกจากนี้การที่เศษรากมันสำปะหลังมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสอยู่เป็นปริมาณน้อยทำให้เป็นผลดีต่อกระบวนการ ผลิตเอทานอล เนื่องจากน้ำตาลที่ได้จากการแตกตัวของเฮมิเซลลู โลสนั้นเป็นน้ำตาล เพนโทส ไม่เหมาะสมกับการนำไปหมัก เนื่องจากต้องใช้ ยีสต์สายพันธุ์เฉพาะเพิ่มเติมจากยี สต์ที่ใช้สำหรับน้ำตาลกลูโคส ที่ได้จากการย่อยเซลลูโลส [1,2] และเมื่อพิจารณ าจาก

องค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังแล้วพบว่า เมื่อทำการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วจะทำให้เกิดการสูญเสียวัตถุดิ บน้อยกว่าชีวมวลชนิดอื่น 2-3เท่า นอกจากนี้ การเพาะปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกในภาคตะวันออกเฉียบเหนือเป็นส่วนใหญ่ซึ่งอยู่ใกล้กับโรงงาน ผลิตเอทานอ ลเดิมทำให้มีความเป็นไปได้ในการพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตเอทานอลโดยการต่อเติมหน่วยปฏิบัติงานเข้าไปในโรงงานเดิมทำให้เป็นการประหยัดต้นทุนในการก่อสร้างและเพิ่มทางเลือกในการใช้วัตถุดิบในการผลิต งานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีอิ ทธิพลต่อการปรับสภาพเบื้องต้นของเศษรากมันสำปะหลังด้วยกรรมวิธีน้ำร้อนอัดความดันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และหาภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเบื้องต้น

1.2 **วัตถุประสงค์ของงานวิจัย**

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพเบื้องต้นของ เศษรากมันสำปะหลังในน้ำร้อนอัดความดันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

1.3 **ขอบเขตของงานวิจัย**

ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของเศษรากมันสำปะหลังในน้ำร้อนอัดความดันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนวัตถุดิบต่อปริมาณน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ และวิเคราะห์ของแข็งที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้น โดยดูผลจากปริมาณเซลลูโลส ที่สามารถย่อยกลายเป็นน้ำตาลได้

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมอุปกรณ์ วัตถุดิบ และศึกษาการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบ Parr
3. วิเคราะห์องค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังด้วยวิธีทางเคมีโดยการใช้สารเคมีและเอนไซม์ เพื่อหาองค์ประกอบของปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ปริมาณน้ำตาลและคาร์โบไฮเดรต
4. หาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังในน้ำร้อนอัดความดัน โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ (150– 200 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนวัตถุดิบและปริมาณน้ำในเครื่องปฏิกรณ์
5. ย่อยเซลลูโลส ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อ 4 ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส
6. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อ 5 ด้วยเครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography) เพื่อหาปริมาณน้ำตาลกลูโคสในผลิตภัณฑ์
7. วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นของเศษรากมันสำปะหลังด้วยน้ำร้อนอัดความดันและปริมาณน้ำตาลสูงสุดเมื่อย่อยผลิตภันฑ์ด้วยเซลลูเลส

บทที่ 2

ทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชในตระกูล Euphorbiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Manihot esculentacrantz ชื่อท้องถิ่นคือ yuca, mogo หรือ manioc มีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ทางทวีป อเมริกาใต้ มีชื่อทางการค้าว่า cassava หรือ tapioca ต่อมาได้มีการส่งออกและเพาะปลูกในส่วนต่างๆทั่วโลกโดยนับเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตสำคัญ โดยสำหรับประเทศไทยได้มีการนำมันสำปะหลัง มาปลูกเป็นครั้งแรกเพื่อใช้ทำแป้งมันสำปะหลัง โดยได้ขยายพื้นที่ปลูกมายังภาคตะวันออก ได้แก่ ชลบุรี ระยอง และจังหวัดใกล้เคียง เนื่องจากมีสภาพดิน ฟ้า อากาศ และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูก จึงได้มีการขยายพื้นที่ปลูกอย่างรวดเร็วไปสู่ภูมิภาคอื่นๆเช่นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้ เป็นต้น

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มขนาดเล็กประกอบด้วยลำต้น นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-6 เซนติเมตร ใบของต้นจะมีสีเขียวเข้มมีลักษณะเป็นแฉกๆ รากของลำต้นจะเป็นโครงสร้างแบบ fibrous root system รากเหล่านี้เป็นแหล่งสะสมอาหารมีขนาดใหญ่โดยมักจะเรียกว่า หัวมันสำปะหลัง ซึ่งจะมีประมาณ 5-15 หัว มีขนาดตามสายพันธุ์ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยมีแป้งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ [2]

ภาพที่ 2.1 ลักษณะของมันสำปะหลัง

โดยเศษรากของมันสำปะหลังที่ได้หลังการเก็บเกี่ยวเป็นส่วนที่อยู่ต่ำกว่าลำต้นมันสำปะหลัง โดยจะรวมถึงส่วนโคน และ รากที่ไม่มีการสะสมแป้งซึ่งจะไม่ถูกเก็บเกี่ยว ของลำต้นมันสำปะหลังอีกประมาณ 30 เซนติเมตร[2] ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เศษรากมันสำปะหลัง ไม่สามารถนำมาใช้เป็นอาหารได้ จึงต้องหั่นหรือสับให้ เป็นชิ้นเล็กแล้วตากแดดให้แห้ง นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากใน ประเทศไทยมีเ ศษรากมันสำปะหลังในปริมาณมาก นำไปใช้เป็นเชื้ อเพลิงแค่เพียงบางส่วนเท่านั้น และ มีการผลิตมันสำปะหลังเป็นปริมาณสูงเป็นอันดับหนึ่งในประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยปริมา ณการผลิตชีวมวลเศษรากมันสำปะหลังคิดเป็น ร้อยละ 10 จากปริมาณ ผลผลิต[3] งานวิจัยนี้จึงสนใจนำเศษรากมันสำปะหลังมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล เพื่อเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรให้มีมูลค่ามากขึ้น และเพื่อเป็นการเพิ่มความเป็นไปได้ของการใช้วัสดุลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตไบโอเอทานอล เพื่อความยั่งยืนในด้านพลังงานและการรักษาสิ่งแวดล้อมต่อไป

ภาพที่ 2.2 เศษรากมันสำปะหลังที่เหลือทิ้งในพื้นที่การเกษตร

ตารางที่ 2.1 ปริมาณผลผลิตทางการเกษตร[4]

	ปริมาณการผลิต (ล้านตัน)		
	ปี 2553	**ปี 2554**	**ปี 2555***
ข้าว	25.4	20.36	24.71
ข้าวโพด	4.81	4.78	4.81
ถั่วเหลือง	0.15	0.15	0.15
ถั่วเขียว	0.10	0.10	0.10
ถั่วลิสง	0.05	0.05	0.05
มันสำปะหลัง	21.91	24.87	25.26
สับปะรดโรงงาน	1.96	2.59	2.52
ปาล์มน้ำมัน	8.22	10.77	11.62
ยางพารา	3.05	3.35	3.62

*ข้อมูลประมาณการจากกระทรวงเกษตรและสหกรณ์วันที่ 1 มีนาคม 2555

2.2 ภาพรวมของชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสิก

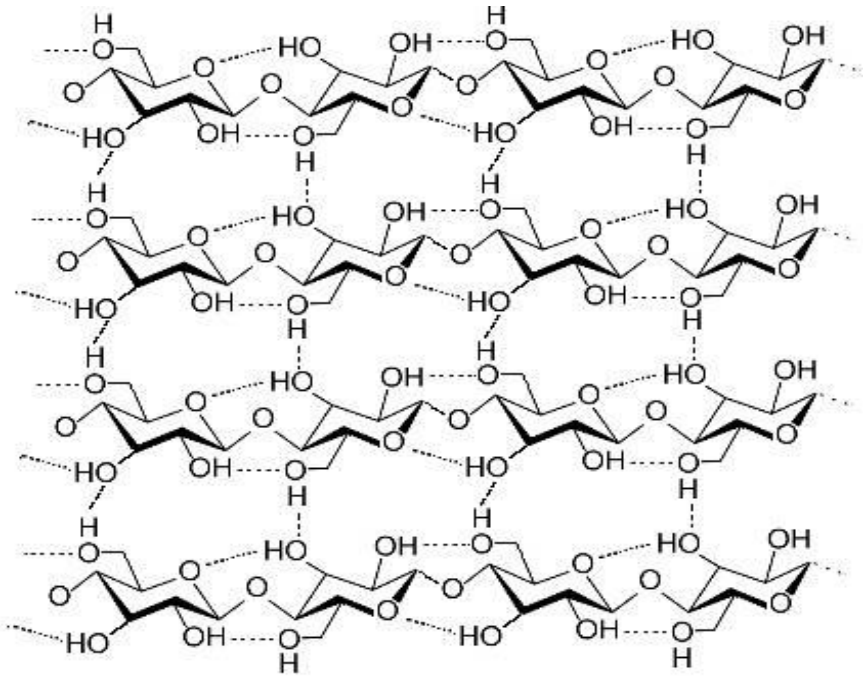
ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสิกมีองค์ประกอบหลักโดยทั่วไป คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งองค์ประกอบแต่ละชนิดมีปริมาณแตกต่างกันตามสายพันธุ์ของต้นกำเนิดของวัสดุชีวะมวล ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยองค์ประกอบต่างๆมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร[1]

ชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ฟางข้าว	33-40	20-25	15-20
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
หญ้า	25-40	35-50	10-30
ใบไม้	15-20	80-85	0
ซังข้าวโพด	45.00	35.00	15.00

2.2.1. **เซลลูโลส** [2, 5- 8]

เซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ไม่ละลายน้ำ พบมากในผนังเซลล์พืชทุกส่วนที่เป็นเนื้อไม้ รวมไปถึงเส้นใยด้วย เช่น เส้นใยฝ้าย เป็นต้น โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสนั้นจะมีส่วนเหมือนกับ คาร์โบไฮเดรต และ ไกลโคเจน คือเป็นสา ยตรง ไม่มีกิ่ง และเป็น โฮโมโพลี แซคคาไรด์ โดยประกอบขึ้นมาจาก การต่อกันของ โมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส จำนวน 10,000 ถึง 15,000 หน่วย แต่ในเซลลูโลสนั้นมีส่วนที่แตกต่างอย่างมากคือกลูโคสที่ต่อกันเป็นสายโซ่ในโครงสร้างของเซลลูโลสนั้นจัดเรียงตัวในรูปแบบเบตา-กลูโคส ระหว่างที่ คาร์โบไฮเดรต และ ไกลโคเจน การเรียงตัวของกลูโคส จะอยู่ในรูปแบบ อัลฟ่า-กลูโคส โดยกลูโคสที่ประกอบเป็นเซลลูโลสนั้นจะยึดกันด้วยพันธะ เบตา 1-4 ไกลโคสิดิก ซึ่งความแตกต่างนี้ทำให้ เซลลูโลสมีความแตกต่างอย่างมากกับสายโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่น ทั้งในรูปแบบของโครงสร้าง รวมไปถึงลักษณะและคุณสมบัติทางกายภาพ นอกจากนี้เมื่อ พิจารณา จากโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแล้วจะพบว่ามีการสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นเนื่องจากการที่เซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชั่นของหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเซลลูโลสนั้นมีสูตรทางเคมีอย่างง่าย คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$



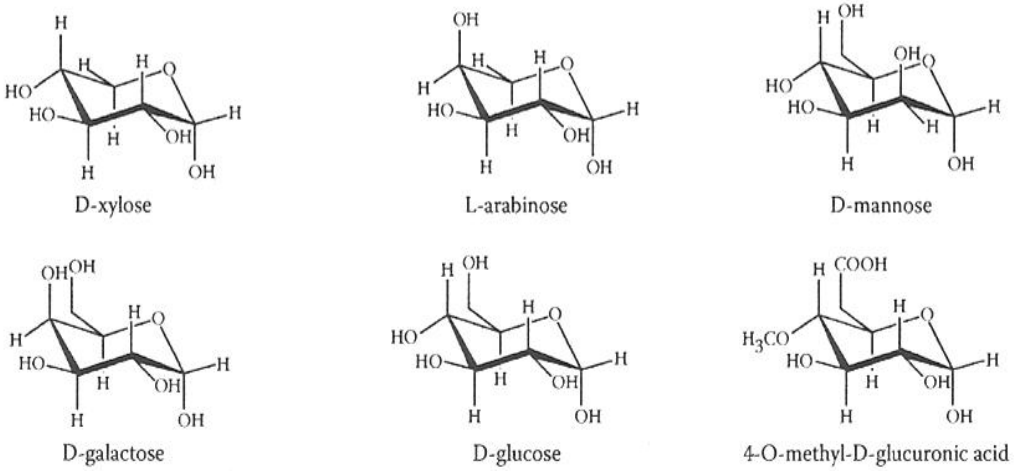
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส[9]

โดยสายพอลิเมอร์ของ เซลลูโลส สามารถมองได้ในรูปแบบของสายวงแหวนไพราโนส เชื่อมต่อด้วย พันธะไกลโคสิดิก โดยพันธะระหว่าง คาร์บอนอะตอมและออกซิเจนอะตอม สามารถหมุนได้อย่างอิสระ โดยองศาระหว่างอะตอมของคาร์บอน และออกซิเจนจะส่งผลถึงค่า tensile strength ของเซลลูโลส และจะมีความแข็งแรงที่สุดเมื่อเรียงตัวเป็นเส้นตรงโดยมุมของการหมุนอยู่ที่ 180 องศา เมื่อเทียบกับโมเลกุลใกล้เคียง และเนื่องจากค่า tensile strength ของ เซลลูโลสนั้นแสดงได้ถึงความแข็งแรงของเส้นใยทำให้มีการนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างมากเป็นเวลานาน เช่น การทำกระดาษ การทอผ้าจากเส้นใยฝ้าย เป็นต้น

เมื่อทำการเปรียบเทียงระหว่างพอลิเมอร์ที่สร้างจากพันธะอัลฟ่า 1-4 ไกลโคสิดิก เช่น แป้ง หรือ ไกลโคเจน กับ พันธะ เบตา 1-4 ไกลโคสิดิก เช่น เซลลูโลส แล้ว จะพบว่า โพลิเมอร์ที่สร้างจากโครงสร้างที่มีพันธะ อัลฟ่า 1-4 ไกลโคสิดิก จะสามารถถูกย่อยสลายโดยกรรมวิธีไฮโดรไลซิสโดยใช้เอนไซม์อะไมเลสได้ โดยระห ว่างที่เอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายพันธะเบตา 1-4 ไกลโคสิดิก ได้นั้นกลับพบจากสิ่งมีชีวิตจำพวกราและแบคทีเรียบางชนิดซึ่งผลิตเอนไซม์เซลลูเลส โดยเมื่อผ่านการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ดังกล่างแล้วจะได้ผลผลิตเป็นน้ำตาลกลูโคส

2.2.2 **เฮมิเซลลูโลส** (Hemicellulose)[1,10]

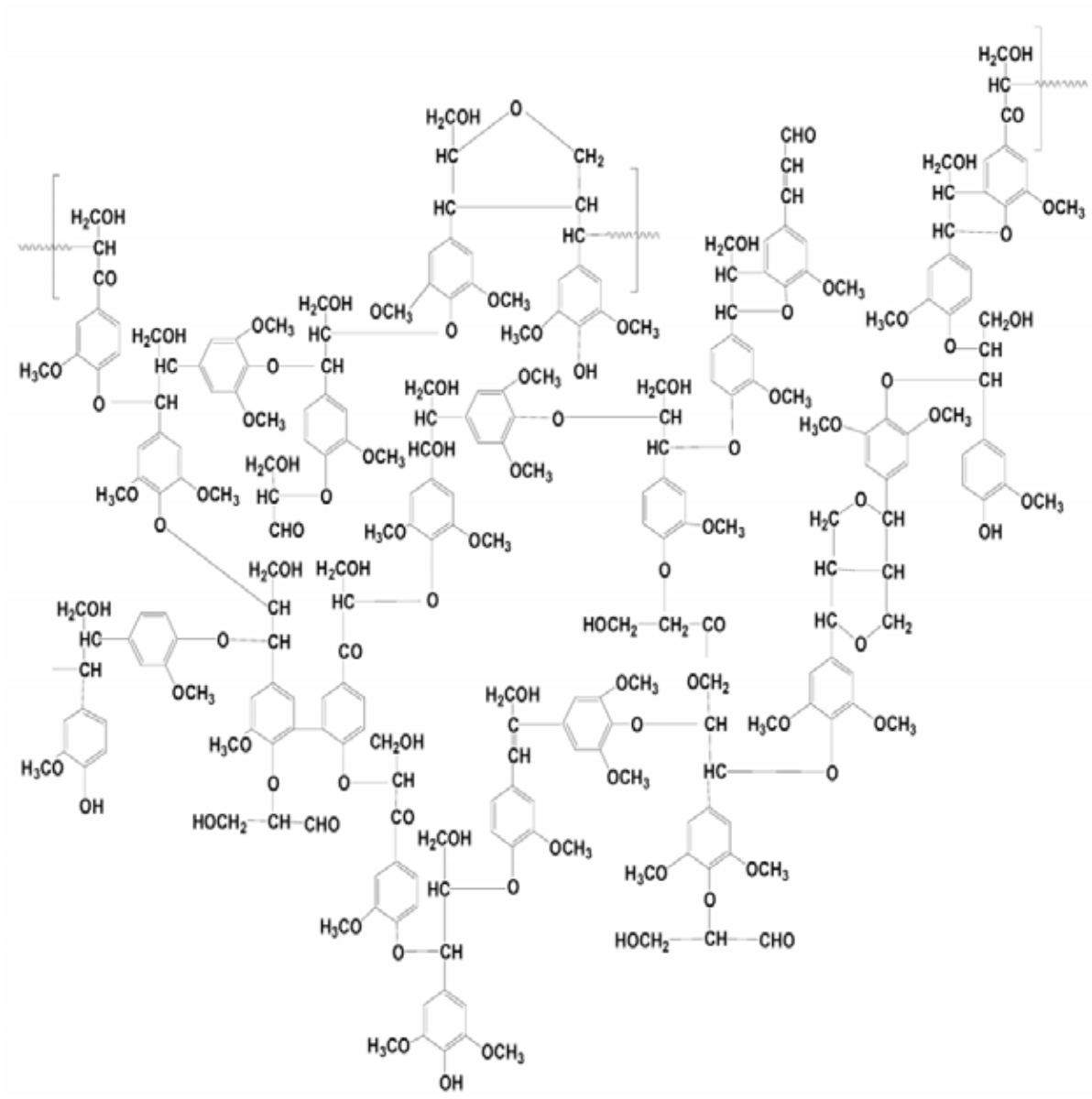
เฮมิเซลลูโลส มีสูตรทั่วไปคือ $[C_5H_8O_4]_n$ เป็นพอลิเมอร์ประกอบไปด้วยน้ำตาลหลายชนิด ซึ่งส่วนมากเป็นน้ำตาลประเภท ดี-ไซแลน ที่ประกอบด้วยน้ำตาล ไซโลส หลายๆโมเลกุลต่อกันด้วยพันธะ เบตา 1-4 ไกลโคสิดิก ประมาณ 50,000 โมเลกุล พบมากในพืช สามารถถูกย่อยด้วยกรดเจือจางได้ โดยสายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสาย พอลิแซคคาไรด์หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น เพนโตแซน เฮกโซแซน และ โพลียูโรไนด์ เพนโตแซน



ภาพที่ 2.4 น้ำตาลโมเลกุลเดียวที่พบในเฮมิเซลลูโลส [11]

2.2.3 **ลิกนิน** (lignin) [1, 5, 7]

ลิกนิน พบได้ในส่วนผนังเซลล์ และ middle lamella มีสูตรทั่วไปคือ $[C_{10}H_{12}O_4]_n$ โดยโมเลกุลของลิกนินจะแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของ เซลลูโลสไฟบริล (cellulose fibrils) และเฮมิเซลลูโลส โดยลิกนิน เป็นสารประกอบอะโรมาติก ถูกสังเคราะห์ ขึ้นตามธรรมชาติด้วยกระบวนการลิกนิฟิเคชั่น (lignifications) จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างไม่แน่นอนเนื่องจากมีหน่วยฟีนิลโพรเพนเรียงต่อกันแบบสุ่ม ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของ *p*-Coumaryl alcohol, Sinapyl alcohol และ Coniferyl alcohol โดยอัตราส่วนของมอนอเมอร์ทั้งสามจะขึ้นกับชนิดของชีวมวลโมเลกุลเฉลี่ยของลิกนินจะมีค่ามากกว่า 10,000 มีคุณสมบัติทางกายภาพคือ ไม่ละลายน้ำ มีความแข็งแรง แต่สามารถละลายได้ใน กรดบางชนิด โดยลิกนินจะทำหน้าที่เป็นกำแพงป้องกันโครงสร้างของเซลลูโลส ทำให้เป็นการยากที่เอนไซม์จะเข้าถึงเพื่อทำการย่อยสลายโดยโครงสร้างพื้นฐานของลิกนินแสดงดังภาพที่ 2.5

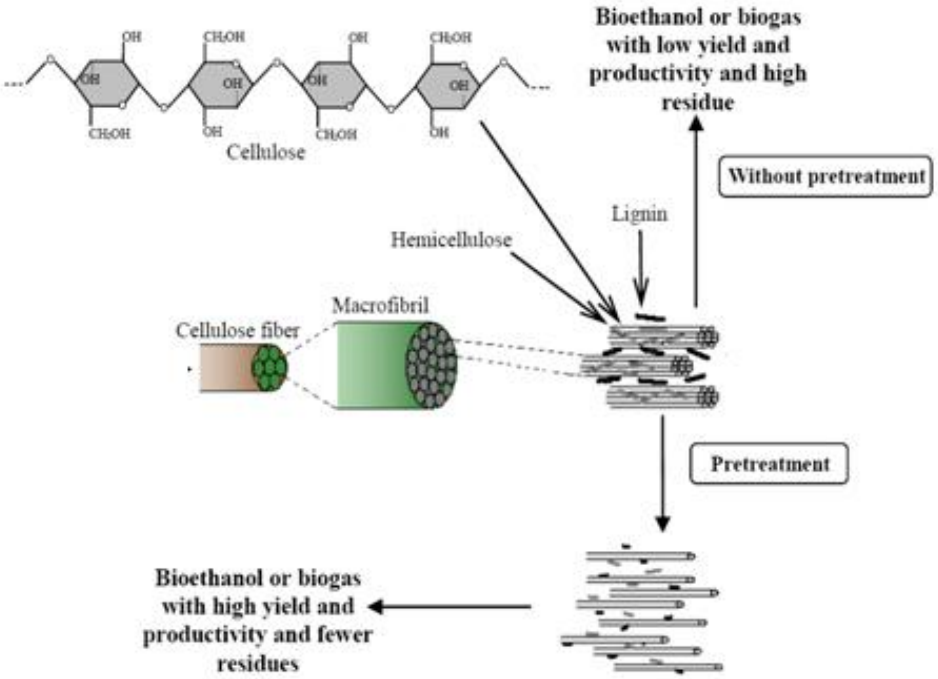


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน [12]

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างโดยรวมแล้ว สายพอลิเมอร์ของ เซลลูโลส เรียงตัวกัน มีระยะห่างที่แคบเนื่องด้วยการที่พันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชั่น ไฮดรอกซิล ทำให้เกิดแรงดึงทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสแต่ละสายเข้าใกล้กันมากขึ้นโดยถูกคั่นอยู่ด้วยเฮมิเซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นกิ่งและถูกกั้นด้วยลิกนินเป็นกำแพงชั้นนอกทำหน้าที่เป็นการป้องกันการเข้าถึงของเอนไซม์ที่สามารถกระทำให้เกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสและผนังเซลล์ ซึ่ งจะทำให้เซลล์แตกออกได้ เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบโดยรวมทั้งหมดแล้วจะเห็นว่า ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสิกนั้นมีองค์ประกอบที่สร้างขึ้นจากน้ำตาลหลายชนิดทำให้การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายชีวมวลนั้นมีความซับซ้อนกว่าเนื่องจากจุลินทรีย์ บางชนิดไม่สา มารถย่อยสลายน้ำตาลบางโครงสร้างได้ทำให้เป็นการยากในการเลือก จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อกำจัดสารไม่พึงประสงค์ออกจากชีวมวล[13]

2.3 การปรับสภาพเบื้องต้น

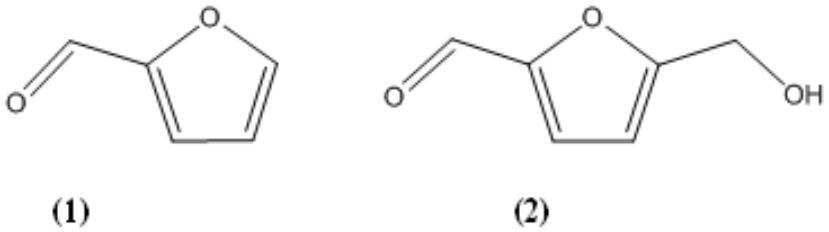
จากโครงสร้างของชีวมวลประเภท ลิกโนเซลลูโลสิก ทำให้พบว่าการแปรรูปลิกโนเซลลูโลสเป็นเอทานอลชีวภาพ (Bioethanol) จำเป็นต้องปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสก่อน เพื่อกำจัดลิกนินและ เฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจาก เอนไซม์ ทำให้การผลิตเอทานอลจาก ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นมีประสิทธิภาพที่ต่ำเนื่องจากปริมาณของเซลลู โลสที่เอนไซม์สามารถเข้าถึงได้มีปริมาณที่น้อย ดังที่ได้กล่าวไปในส่วนที่แล้ว ภาพรวมของการปรับสภาพเบื้องต้นแสดงดัง ภาพที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ควรอยู่ในรูปเส้นใยเซลลูโลส ชั้นของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินสลายเป็นพอลิเมอร์สายสั้นๆ ห รือน้ำตาลที่สามารถละลายในสารที่ใช้ปรับสภาพเบื้องต้น[13-16]



ภาพที่ 2.6 ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นต่อการเข้าถึงของเอนไซม์

โดยเมื่อพิจารณาถึงผลดีและผลเสียของการทำการปรับสภาพเบื้องต้นของชีวมวลแล้วพบว่ามีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้ [13-15]

- ผลิตเซลลูโลสที่ว่องไวต่อการย่อยของเอนไซม์
- ไม่ทำลายเซลลูโลส
- สามารถแยกลิกนินและองค์ประกอบอื่นที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นออกได้ง่าย เพื่อนำไปผลิตสารที่มีคุณค่าอื่นๆ
- เลี่ยงการเกิดผลพลอยได้ที่เป็นสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เช่น Furfural และ 5-HMF



(1) (2)

ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของ (1) Furfural และ (2) 5-HMF [14]

กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นที่มีในหลายงานวิจัยสามารถจำแนกออกได้เป็น

1. การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางกายภาพ (Physical pretreatment)
2. การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางความร้อน (Thermal pretreatment)
3. การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical pretreatment)

2.3.1 **การปรับสภาพขั้นต้นด้วยกระบวนการทางกายภาพ**

การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางกายภาพ เช่น การบด (Milling) เป็นการปรับสภาพเบื้องต้นของชีวมวล โดยการลดขนาดของอนุภาค และยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน ในขณะเดียวกันยังช่วยลดสภาพผลึกและระดับการเกิดพอลิเมอร์ของเซลลูโลส โดยทั่วไปมักทำก่อนการไฮโดรไลส์ชีวมวลด้วยเอนไซม์ หรือก่อนการปรับสภาพเบื้องต้น

2.3.2 **การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางความร้อน**[16-20]

การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีนี้เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวล ซึ่งลิกนิน จะเริ่มละลายในน้ำเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 150 – 190 องศาเซลเซียส ในขณะที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวล เฮมิเซลลูโลสจะถูกไฮโดรไลส์ด้วยน้ำและให้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดซึ่งกรดที่ได้จากการไฮโดรไลส์จะทำหน้าที่ในการช่วยย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสข องเฮมิเซลลูโลสคล้ายปฏิกิริยาลูกโซ่และเพิ่มความสามารถในการละลายของเฮมิเซลลูโลสในน้ำด้วย แต่เมื่อเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้รับความร้อนสูงจะทำให้เกิดสารประกอบฟีนอลและอโรมาติกเช่น Furfural, HMF, Vanillin และ Vanillic alcohol ขึ้นซึ่งมีผลในการยับยั้งการทำปฏิกิริยาของการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้สำหรับย่อยสลายเซลลูโลส

2.3.2.1 กรรมวิธีน้ำร้อนอัดความดัน [21]

เป็นกระบวนการที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 – 230 องศาเซลเซียส และความดันสูงกว่าความดันอิ่มตัวของไอน้ำเพื่อให้น้ำยังคงสภาพเป็นของเหลว เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ต้องสามารถทนต่อแรงดันสูงได้ โดยทั่วไปมีสามชนิดคือ แบบไหลตามกัน, ไหลสวนทาง และ ไหลผ่าน โดยทำการให้ความร้อนและทำปฏิกิริยาจนถึงเวลาที่ต้องการแล้วจึงทำการเครื่องหล่อเย็น

ข้อดีของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีน้ำร้อนอัดความดันคือ สามารถลดปริมาณการเกิดปฏิกิริยา ข้างเคียงเช่นการผลิตสารยับยั้งปฏิกิริยาของ เอนไซม์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้สูงขึ้นแต่จำเป็นต้องมีการคตวบคุมปัจจัยบางประการเพื่อให้ได้ค่าผลได้สูงที่สุดเช่น การควบคุม เวลา อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น

ตัวอย่างภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพเบื้องต้นของใบและซังข้าวโพดด้วยน้ำร้อนอัดความดันซึ่งทำให้เซลลูโลสที่ได้จากซังข้าวโพดสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ถึงร้อยละ 90 คือ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ทำการปรับสภาพเบื้องต้นเป็นเวลา 15 นาที [21]

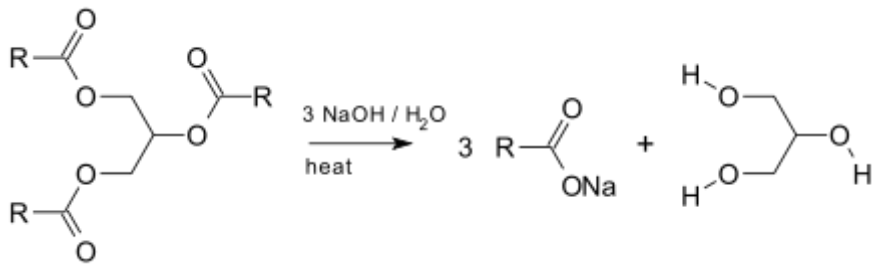
2.3.3 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางเคมี

2.3.3.1 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกรด (Acid pretreatment) [15-19]

การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการใช้กรดนั้ นสามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่ และลิกนินบางส่วน ออกจากชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่การใช้กรดในกระบวนการนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งทำ ให้เกิดการสังเคราะห์ เฟอร์ฟูรอล 5-HMF ซึ่งเป็นสารยับยั้ง ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ เอนไซม์ที่ใช้สำหรับการย่อยสลายเซลลูโลส โดยพบว่า ภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้น ด้วยกรด มีสองลักษณะคือ ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 160 องศาเซลเซียส ของแข็ง ต่อปริมาณกรด ที่ 0.05-0.1 และ ที่อุณหภูมิต่ำ ที่อัตราส่วน ของแข็งต่อปริมาณกรด ที่ 0.1-0.4 โดยมีกรดที่นิยมใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นเช่น กรดซัลฟุริก,ฟอสฟอริก และ ไฮโดรคลอริก เป็นต้น

2.3.3.2 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยเบส (Alkaline pretreatment) [15-19]

การปรับสภาพเบื้องต้น ด้วยเบส สามารถ เพิ่มความสามารถในการละลาย การจัดเรียงตัวของ องค์ประกอบบางชนิด ซึ่งก่อให้เกิดผลดีต่อการกำจัดไซแลน โดยมีปฏิกิริยา สปอนนิฟิเคชั่น ซึ่งเป็นการไฮโดรไลส์ของเอสเตอร์เกิดขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยา Saponification ของไตรกลีเซอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์

โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในการปรับสภาพเบื้องต้นชีวมวลเนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าโดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยเบสสามารถสกัดลิกนิน ได้มากกว่าการใช้กรด แต่ไม่สามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากมีการปะปนของเบสไปกับชีวมวลทำให้เป็นผลเสียต่อขั้นตอนการผลิตกลูโคสต่อไป

2.3.3.3 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยแอมโมเนีย [16-20]

การปรับสภาพ เบื้อง ต้นด้วยแอมโมเนีย โดยทั่วไป กรรมวิธี ที่เรียกว่า Ammonia fiber expansion (AFEX) โดย ใช้ไอระเหยของแอมโมเนีย ที่เกิดจาก การลดความดันอย่างรวดเร็วในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำการปรับสภาพเบื้องต้นชีวมวลโดยสามารถสกัดลิกนินออกจากชีวมวลได้แต่ไม่สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสไม่ละลายในแอมโมเนีย

จากที่กล่าวมานั้นจะเห็นได้ว่าการ ปรับสภาพเบื้องด้วยวิธีทางกายภาพจะสามารถ เพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนได้จึงสามารถนำมาประยุกษ์ใช้ร่วมกัน กับการปรับสภาพเบื้องต้นชนิดอื่นๆ ได้ในขณะที่การใช้สารเคมีนั้น มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ในปริมาณมาก แต่ก็ทำให้จำเป็นต้องปรับสภาพเซลลูโลสที่ได้หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนนำไปย่ อยสลายด้วย เอนไซม์ เนื่องจากการใช้กรด หรือ เบส ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งผลิตสารยับยั้ง

ปฏิกิริยาของเอนไซม์ และยังใช้เวลาในการปรับสภาพเป็นเวลานาน และต้องมีเครื่องปฏิกรณ์ที่ทนความเป็นกรด-เบส ซึ่งมีราคาแพง

โดยการใช้ น้ำร้อนอัดความดัน ใช้เวลาในการ ปรับสภาพสั้ น ไม่ต้องใช้สารเคมี และสามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกได้ บางส่วน สามารถควบคุม การเกิดสารยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ด้วยการปรั บอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริย าทำให้เป็นกรรมวิธีที่มีความน่าสนใจอย่างมากในการนำมาปรับสภาพเบื้องต้นชีวมวล

2.4 เอนไซม์ เซลลูเลส

เซลลูเลสคือเอ นไซม์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสายโซ่เซลลูเลสให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆได้โดยเอ นไซม์เซลลูเ ลสนั้นผลิตจากจุลินทรีย์ เช่น รา แบคทีเรีย โดยเอนไซม์เซลลูเลสนี้มีสมบัติมัลติคอมโพเนนท์ โดยประกอบไปด้วยเอ นไซม์ต่างๆรวมสามชนิดหลักคือ [6, 18, 22]

1. เอ็นโดกลูคาเนส (Endo β-1, 4-glucan glucanohydrolase) โดยจะทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซ์พันธะเบตา 1,4 ไกลโคสิดิก เฉพาะโครงสร้างที่เป็น อะมอร์ฟัส ของสายเซลลูโลส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอนไซม์ชนิดนี้คือ เซลโลไบโอส, กลูโคส และ โอลิโก เซลลูโลส ในปริมาณน้อย
2. เอ็กโซกลูคาเนส(Exo β-1, 4-glucan cellobiohydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ไฮโดรไลซ์เซลโลไบโอส
3. เบตากลูโคซิเดส(β-1,4 glucosidase) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซ์เพื่อทำการผลิตกลูโคส

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mark Laser และคณะ [23] ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้น้ำร้อนอัดความดันและไอน้ำ เพื่อทำการผลิตเอทานอล โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 170-230 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1-46 นาที ผลการศึกษาพบว่า ผลผลิตที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีน้ำร้อนอัดความดัน สามารถนำไปผ่านกระบวนการหมักเพื่อทำการผลิตเอทานอลได้โดย มีร้อยละผลได้ ของการเปลี่ยนชีวมวลเป็นเอทานอล โดยการนำไปหมักสูงถึง ร้อยละ 80 นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไปพบการสูญเสียน้ำตาลเนื่องจากผลของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่ให้ในระบบ

Thomas. Ingram และคณะ [24] ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของฟางต้นหลิว (rye straw) ในน้ำร้อนอัดความดันแบบกึ่งต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ ช่วงอุณหภูมิที่ 170-200 องศาเซลเซียส โดยหลังจากทำการย่อยน้ำตาล ที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำตาลที่ตรวจพบมีค่าสูงถึงร้อยละ 90 โดยพบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไปพบการสูญเสียน้ำตาลเนื่องจากผลของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเช่นเดียวกับการศึกษาของ Mark Lase[23]

Yu Q. และคณะ [25] ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของชีวมวลจากต้นยูคาลิปตัสแกรนดิส โดยวิธีน้ำร้อนอัดความดันสองขั้นตอน โดยในการศึกษา ขั้นที่หนึ่งใช้อุณหภูมิที่ 180-200 องศาเซลเซียส และขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 180-240 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 20 นาทีในขั้นตอนแรก และ 0-60 นาทีในขั้นที่สอง โดยขั้นที่หนึ่งเป็นการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อทำลายโครงสร้างของลิกนิน และในขั้นที่สองทำการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อย่อยสลายและแตกโครงสร้างของเซลลูโลสเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของเอนไซม์ พบว่าปริมาณ ร้อยละผลได้ของน้ำตาลสูงสุดอยู่ที่ 96.6% ซึ่งสูงกว่าการทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกรด

Chun Sheng Goh และคณะ [26] ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของใบปาล์มน้ำมัน โดยวิธีน้ำร้อนอัดความดัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ความดัน 10 บาร์ จากการศึกษาพบว่าปริมาณกลูโคสที่ผลิต

ได้สูงสุดมาจากตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 178 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 11.1 นาที โดยมีอัตราส่วนของน้ำต่อปริมาณของวัตถุดิบที่ 9.6 ซึ่งปริมาณผลได้กลูโคสที่ภาวะดังกล่าวคือ 92.69%

Tim Rogalinski และคณะ [27] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของลิกนินใ นการปรับสภาพเบื้องต้นของฟางข้าวด้วยน้ำร้อนอัดความดันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์สองแบบคือแบบแบตช์และด้วยน้ำร้อนอัดความดันแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้การตรวจสอบสารละลายที่เป็นผลิตภัณฑ์ด้วย เครื่อง HPLC พบว่าปริมาณของน้ำตาลในของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้น มีปริมาณสูงสุดที่ 5% โดยน้ำหนักในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภู มิ 190 องศาเซลเซียส โดยผลของคว ามดันไม่ส่งผลกระทบถึงการปรับสภาพเบื้องต้น

Nathan Mosier และคณะ [21] ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของซังข้าวโพดด้วยวิธีน้ำร้อนอัดความดัน โดยควบคุมค่า pH ของสารละลาย โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่อง ขนาด 45 มิลลิเมตร โดยแต่ละการทดลองมีปริมาณ ซังข้าวโพดในเตาปฏิกรณ์ 5.18 กรัม และน้ำ 28.57 มิลลิเมตร ทำการทดลองที่ 5-20 นาที ที่อุณหภูมิ 170-200 องศาเซลเซียสพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับสภาพเบื้องต้นอยู่ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที โดยพบปริมาณกลูโคส 32 กรัมต่อลิตร

J.A. Perez และคณะ [28] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพเบื้องต้นของฟางข้าวสาลีเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลโดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิระหว่าง 2-4 องศาเซลเซียสต่อนาทีโดยใช้วัตถุดิบปริมาณ 30 กรัมมีขนาดของวัตถุดิบระหว่าง 0.5-2 เซนติเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสพบการสูญเสียน้ำตาลกลูโคสเนื่องจากผลของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่ให้ในระบบ โดยพบว่ามีการสูญเสียกลูโคสเป็นปริมาณตั้งแต่ 9-19 % โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นคือ 170 องศาเซลเซียสโดยพิจารณาจากปริมาณความเข้มข้นของกลูโคสที่สามารถผลิตได้

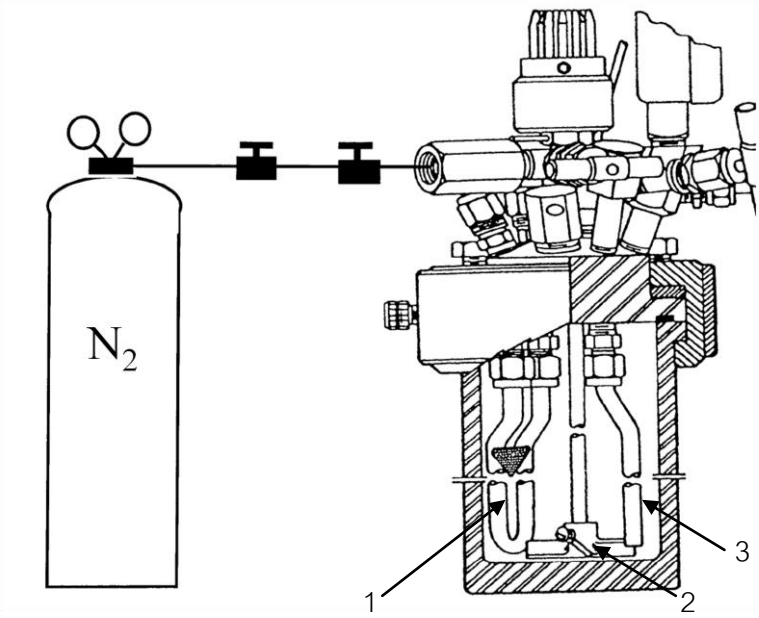
บทที่ 3

เครื่องมือและระเบียบการวิจัย

3.1 เครื่องมือ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง

การปรับสภาพเบื้องต้นของเศษรากมันสำปะหลังได้ดำเนินการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง (High-pressure reactor) ขนาด 1.2 ลิตร จากบริษัท Parr Instrument Company ซึ่งมีแผนภาพดังแสดงใน ภาพที่ 3.1 สามารถทำงานที่อุณหภูมิและความดันสูงสุดเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสและ 340 บรรยากาศ สามารถควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยารวมถึงอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิผ่านทางแผงควบคุม



ภาพที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง

(1) ท่อน้ำหล่อเย็น (2) ใบกวน (3) ท่อใส่เทอร์โมคัปเปิล

โดยจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าที่ช่วงอุณหภูมิ 150 – 180 องศาเซลเซียส ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับความดันอิ่มตัวของไอน้ำทำให้น้ำบางส่วนไม่อยู่ในสถานะของเหลวและไม่สามารถ ทำการปรับสภาพ เศษราก มันสำปะหลังได้ดีทำให้ร้อยละผลได้ของปริมาณน้ำตาลที่นำผลิตภันฑ์ที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นไปทำการย่อยสลายด้วยเอมไซม์ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้ทำการเติมแก๊สไนโตรเจนในตอนเริ่มทำการทดลองเพื่อทำให้ระบบมีความดันสูงขึ้นและทำให้น้ำยังสามารถคงภาวะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิที่ทำการปรับสภาพขั้นต้นได้ดีขึ้น

3.1.2 เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ

เครื่องมือบดชีวมวลแบบหยาบ (Wood chipper) ยี่ห้อ KMAC รุ่น 3801 ของบริษัท เค. แมชชีน ขนาด 2 hp, 380 Volt, 50 Hz จะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบดเศษรากมันสำปะหลัง โดยทำการร่อนชีวมวลด้วยตะแกรงหลังการบดให้ได้ชีวมวลขนาด 2 – 5 มิลลิเมตร

3.1.3 เตาอบ

ภาพที่ 3.2 แสดงภาพของเตาอบที่ใช้ในการอบเศษรากมันสำปะหลัง เพื่อไล่ความชื้น โดยเตาอบที่ใช้มีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.2 เตาอบ

3.1.4 **เครื่องทำน้ำกลั่นเกรด** HPLC

ภาพที่ 3.3แสดงภาพเครื่องทำน้ำกลั่นยี่ห้อ ELGA PURELAB รุ่น Maxima LS ใช้ผลิตน้ำกลั่นเพื่อใช้ตลอดงานวิจัย

รูปที่3.3 เครื่องทำน้ำกลั่น

3.1.5 **อ่างน้ำร้อนแบบเขย่า**

ภาพที่ 3.4 แสดงภาพอ่างน้ำร้อนแบบเขย่า ยี่ห้อ GFL รุ่น1083 ใช้ในกระบวนการย่อยชีวมวลด้วยเอนไซม์เซลลูเลสโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 3.4 อ่างน้ำร้อนแบบเขย่า

3.1.6 เอนไซม์เซลลูเลส

เอนไซม์เซลลูเลส ที่ใช้ในการทดลองได้รับจาก สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) โดยเป็นเอนไซม์ที่ผลิตจากบริษัท Danisco ประเทศ สหรัฐอเมริกา รุ่น ACCELLERASE 1500 ความสามารถในการทำปฏิกิริยา 525 – 775 หน่วยต่อกรัม ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 4.6-5.0

3.1.7 ซิเตรตบัฟเฟอร์

เตรียมโดยการละลาย กรดซิตริกโมโนไฮไดร์ ปริมาณ 210 กรัม ในน้ำกลั่น 750 มิลลิลิตร และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จนค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4.3 แล้วทำการปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่นทำการปรับค่าความเป็นกรดด่างให้ได้ 4.8 ด้วยการเติมกรดและเบสข้างต้น

3.2. เครื่องมือวิเคราะห์

3.2.1. เครื่องโครมาโทกราฟของเหลวประสิทธิภาพสูง (HPLC)

เครื่อง HPLC ซึ่งใช้วิเคราะห์ตัวอย่างของของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นและการย่อยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้น ผลิตจากบริษัท Shimadzu รุ่น LC-10ADvp ประกอบกับ Refractive Index Detector รุ่น RID-10v โดยใช้คอลัมน์รุ่น Inertsil-NH2 จากบริษัท GL Science ขนาด 4.6 มิลลิเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และตัวทำละลายผสมระหว่าง แอซิโทรไนไทรล์ และน้ำในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาทีและปริมาตรที่ใช้วิเคราะห์ 20 ไมโครลิตร ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

และคอลัมน์จากบริษัท Restek จำกัดรุ่น Pinnacle II C18 ขนาด 4.6 มิลลิเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ประกอบกับ UV Detector รุ่น 200 ทำการวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร และตัวทำละลายผสมระหว่าง แอซิโทรไนไท รล์และน้ำในอัตราส่วน 10 ต่อ 90 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเฟสเคลื่อนที่และปริมาตรตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ 20 ไมโครลิตร ซึ่งใช้วิเคราะห์หาปริมาณเฟอร์ฟูรอลและไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรอลในตัวอย่างของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นและการย่อยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้น

3.3. วิธีการทดลอง

3.3.1. ชั่งน้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการบด (ขนาด 2-5 มิลลิเมตร) และน้ำประมาณ 50 และ 500 กรัมตามลำดับ ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง

3.3.2. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง และเติมแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้อง

3.3.3. กำหนดอุณหภูมิและระยะเวลา ในการปรับสภาพ โดยมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากันทุกการทดลองที่ 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

3.3.4. หลังจากครบระยะเวลาการทำปฏิกิริยาแล้วจึงหล่อเย็น เครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูงโดยใช้ระบบการหล่อเย็นของเตาปฏิกรณ์

3.3.5. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของเหลวและของแข็งเปียก

3.3.6. ชั่งน้ำหนักของแข็งเปียก 5 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เพื่อทำการย่อยด้วยเอนไซม์ สำหรับตัวอย่างของแข็งเปียกที่เหลือนำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่

3.3.7. บันทึกน้ำหนักของแข็งแห้งเพื่อใช้คำนวณร้อยละของแข็งในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้น

3.3.8. เติมซิเตรดบัฟเฟอร์ (ค่าความเป็นกรด- เบส 4.8) จำนวน 8 มิลลิลิตรและเอนไซม์เซลลูเลส จำนวน 0.2 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพู่

3.3.9. ปิดฝาด้วยฟลอยอะลูมิเนียม และนำไปใส่ในอ่างน้ำร้อนแบบเขย่าควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.3.10. ทำการกรองตัวอย่างที่ได้

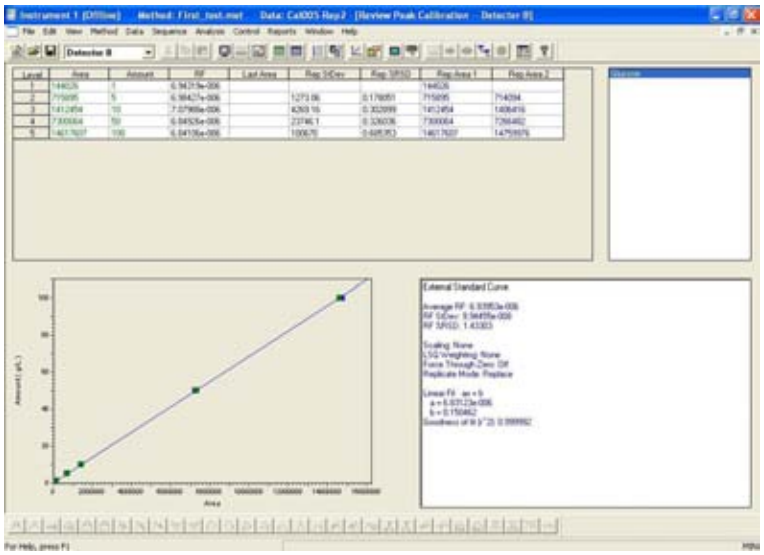
3.3.11. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างของเหลวและของแข็งเปียก

3.3.12. นำตัวอย่างของแข็งเปียกไปอบที่ 50 องศาเซลเซียสจนกว่าน้ำหนักคงที่ เก็บตัวอย่างของเหลวและของแข็งแห้งเพื่อใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

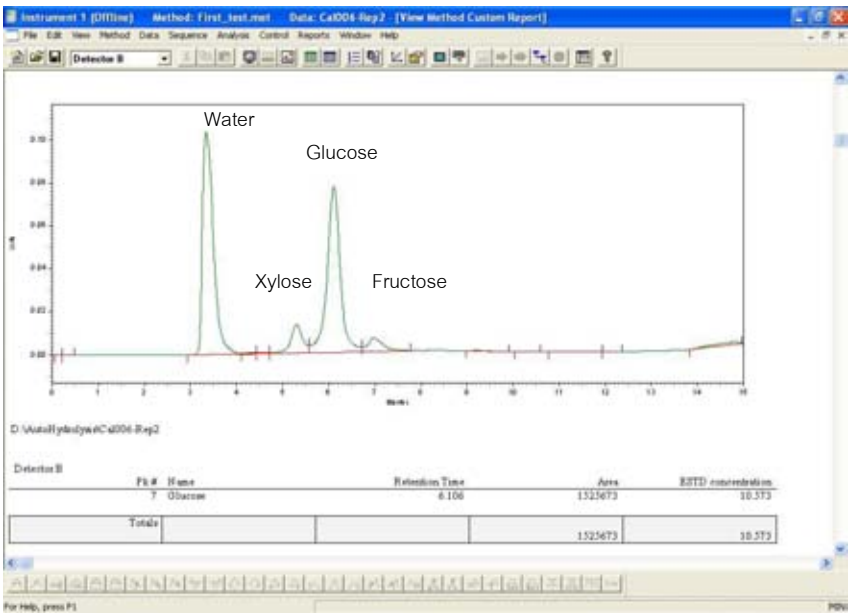
3.4.1. การวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณกลูโคส

3.4.1.1. เทียบปรับ (calibrate) เครื่อง HPLC ตามภาวะที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2. ด้วยสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้นช่วง 1 – 10 กรัมต่อลิตร ได้กราฟมาตรฐาน (calibration curve) ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคสในโปรแกรมของเครื่อง HPLC

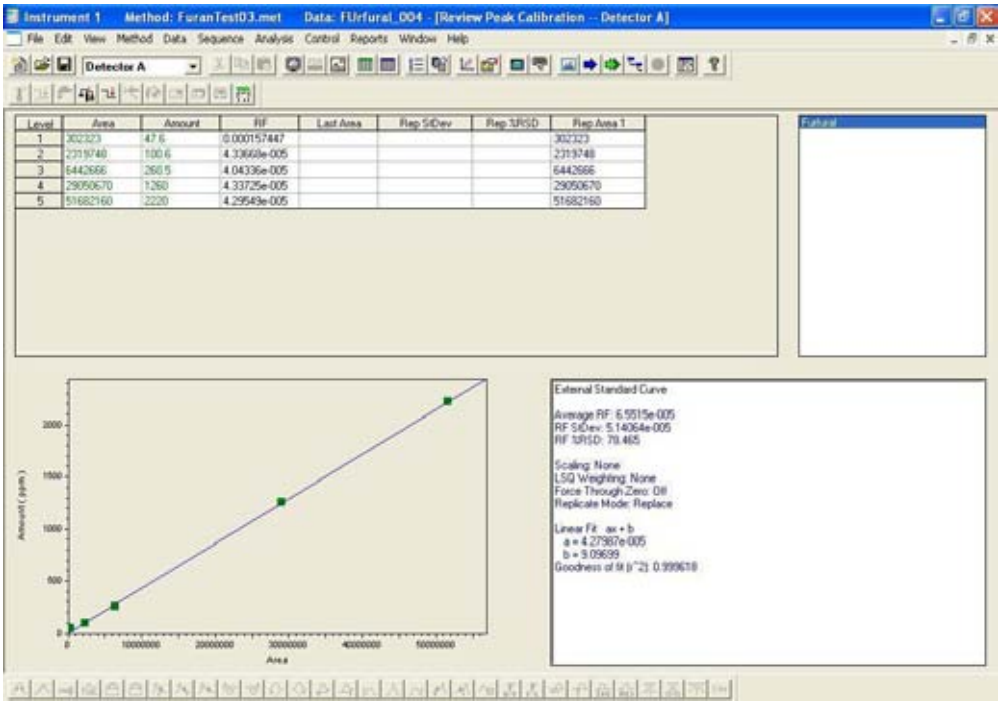
3.4.1.2. กรองตัวอย่างของเหลวประมาณ 2.5 มิลลิลิตร ผ่านตัวกรองขนาด 0.4 ไมโครเมตรด้วยเข็มฉีดยา หลังจากวิเคราะห์ตัวอย่างแล้วโปรแกรมของเครื่อง HPLC จะคำนวณความเข้มข้นกลูโคสในสารตัวอย่างในหน่วยกรัมต่อลิตร ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างโครมาโทแกรมที่แสดงใน Refractive index detector ของสารตัวอย่างในโปรแกรมของเครื่อง HPLC

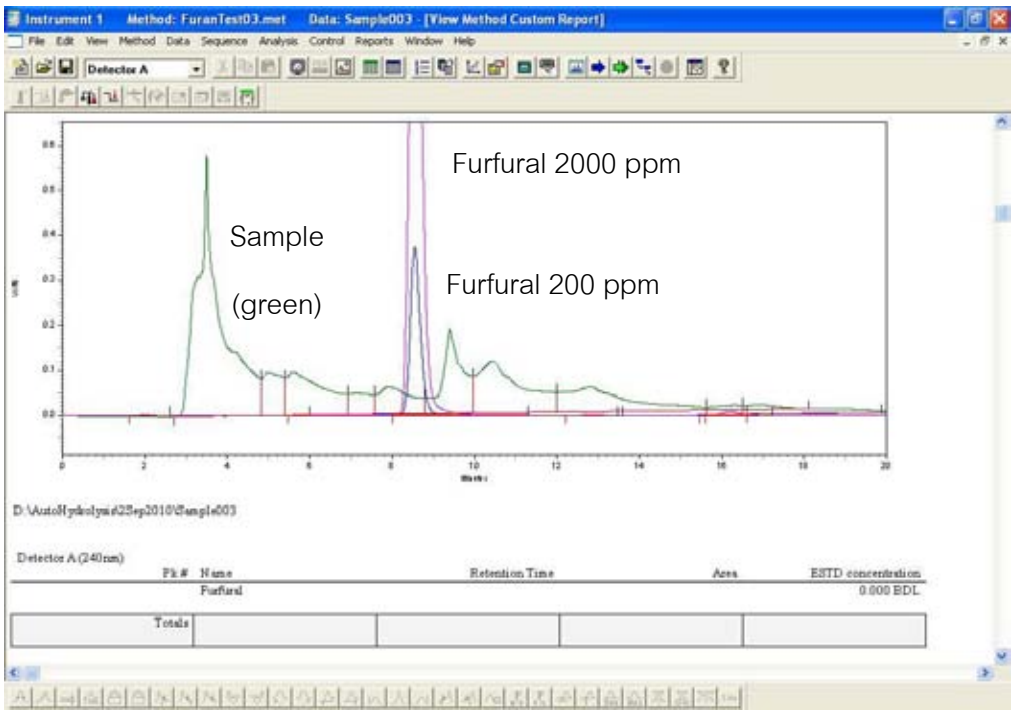
3.4.2. การวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณเฟอร์ฟูรอล

3.4.2.1. เทียบปรับเครื่อง HPLC ด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอ ร์ฟูรอลและไฮดรอกซิลเมทิลเฟอ ร์ฟูรอลความเข้มข้นช่วง 10 – 75 ppm ได้กราฟมาตรฐาน (calibration curve) ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของเฟอร์ฟูรอลโปรแกรมของเครื่อง HPLC

3.4.2.2. เจือจางตัวอย่าง 0.1 กรัมในน้ำกลั่นโดยใช้ขวดวัดปริมาตรขนาด 200 มิลลิลิตร จากนั้นกรองตัวอย่างประมาณ 2.5 มิลลิลิตรผ่านตัวกรองขนาด 0.2 ไมโครเมตรด้วยเข็มฉีดยา หลังจากวิเคราะห์ตัวอย่างแล้วโปรแกรมของเครื่อง HPLC จะคำนวณความเข้มข้นกลูโคสในสารตัวอย่างในหน่วยกรัมต่อลิตร ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 3.8



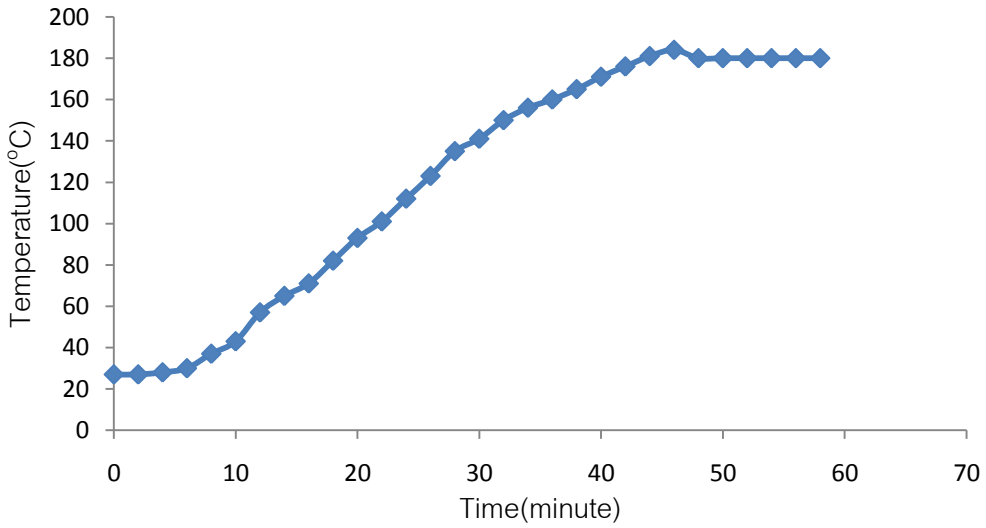
ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างโครมาโทแกรมที่แสดงใน UV detector ของสารตัวอย่างในโปรแกรมของเครื่อง HPLC

ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนโดยรวมของการผลิตสารละลายกลูโคสจากเศษรากมันสำปะหลัง

ภาพที่ 3.9 แสดงถึงขั้นตอนโดยรวมของการผลิตสารละลายกลูโคสจากเศษรากมันสำปะหลัง

3.5 การปรับค่าอัตราการให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์

การทำการทดลองเพื่อหาอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ได้ทราบถึงภาวะที่เหมาะสมและทำให้การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการที่สุดหากมีการให้ความร้อนจนอุณหภูมิมากกว่าค่าที่ต้องการเกิน 5 องศาเซลเซียส จะทำการทดลองใหม่ โดยเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มอุณหภูมิแล้วพบว่าการ เพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงหรือ ประมาณ 3.33 องศาเซลเซียสต่อนาทีทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการดังแสดงตัวอย่างการบันทึกอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ทุกๆ 2 นาทีดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ณ เวลาต่างๆ (ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1. ผลการวิเคราะห์ร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเถ้าในเศษรากมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์ร้อยละเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเศษรากมันสำปะหลังโดยกรรมวิธีทางเคมีตามกรรมวิธีมาตรฐาน TAPPI 203 om-88 รวมได้ผลวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของ เศษรากมันสำปะหลังก่อนการปรับสภาพเบื้องต้น

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก(แห้ง)		
	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	ค่าเฉลี่ย
เซลลูโลส	49.92	50.26	50.09
ลิกนิน	20.85	23.31	22.08
เฮมิเซลลูโลส	15.38	11.02	13.20
เถ้าและสารที่สกัดได้	13.85	15.41	14.63
ปริมาณสุทธิ	100	100	100

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าเศษรากมันสำปะหลังมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 50 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเฮมิเซลลูโลส และ ลำนินอยู่เป็นปริมาณมาก โดยการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังโดยการใช้น้ำร้อนอัดความดัน มีจุดมุ่งหมายในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ออกจากเศษรากมันสำปะหลังดังนั้นเมื่อทำการปรับสภาพเ ศษรากมันสำปะหลังแล้ว หากกระบวนการเป็นไปตามทฤษฎีโดยสมบูรณ์จะทำให้น้ำหนักของของแข็งแห้งลดลงไปประมาณร้อยละ 40 ของน้ำหนักเริ่มต้น

4.2 ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลัง

จากการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150 และ 180 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 10-15 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่าร้อยละผลได้ของแข็ง (%Solid Yield) ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักของแข็งแห้งที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นต่อน้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังตั้งต้นซึ่งคำนวณจากสมการที่ 4.1

$$\%\text{Pretreatment solid yield} = \frac{\text{Pretreated cassava root waste wt.(dry)}}{\text{Feed cassava root waste wt.(dry)}} \times 100 \qquad (4.1)$$

พบว่าร้อยละผลได้ของแข็ง มีปริมาณลดล งหลังจากการทำการปรับสภาพเบื้องต้นเนื่องมาจากการทำ ปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งทำให้ปริมาณของ เฮมิเซลลูโลส รวมถึงสารอื่นที่สามารถละลายน้ำได้ ลดลงซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับสภาพเบื้องต้น ด้วยน้ำร้อนอัดความดันซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

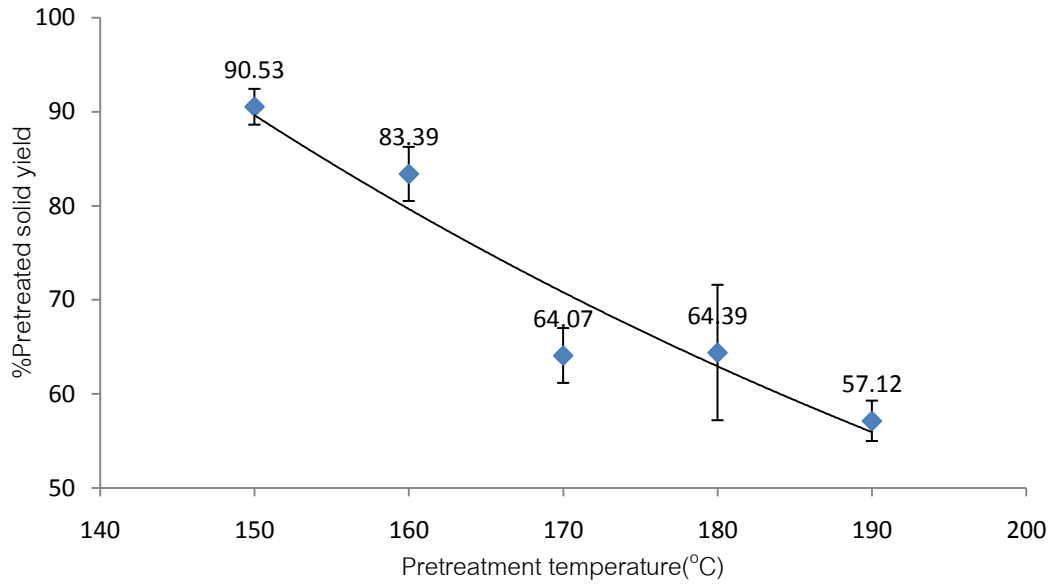
ตารางที่ 4.2 ปริมาณร้อยละผลได้ของแข็งที่ได้หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง

การทดลองที่	น้ำ. (กรัม)	เศษรากมันสำปะหลัง (กรัม)	อุณหภุมิ (องศาเซลเซียส)	ความดันสูงสุด (บาร์)	เวลาในการปรับสภาพ (นาที)	ร้อยละผลได้ของแข็ง* (%)	ร้อยละผลได้ของแหลว** (%)
1	500.3	50.17	180	18	10	62.53	55.88
2	500.4	50.3	180	18	10	55.12	57.35
3	500.6	50.2	150	15	10	89.88	50.10

*ร้อยละผลได้ของแข็ง(%Pretreated solid yield) คำนวณจากปริมาณน้ำหนักแห้งของเศษรากมันสำปะหลังที่ได้หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ต่อน้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังก่อนทำการปรับสภาพเบื้องต้น ตามสมการที่ 4.1

**ร้อยละผลได้ของเหลว (%Liquid yield) คำนวณจากปริมาณน้ำหนักของเหลวที่เก็บได้หลังการปรับสภาพเบื้องต้นต่อน้ำหนักของเหลวที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้น

ปริมาณร้อยละผลได้ของเหลว (%Liquid yield) ซึ่งคำนวณเทียบกับปริมาณน้ำเริ่มต้นก่อนการปรับสภาพเบื้องต้นนั้นมีค่า ไม่เท่ากับ 100 เนื่องมาจา กน้ำบางส่วนได้ถู กดูดซับไว้ในของแข็งที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยา เมื่อทำการอบแห้งแล้วพบว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไปนั้นมีปริมาณร้อยละ 40-50 ของน้ำหนักน้ำเริ่มต้นก่อนกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น ซึ่งเมื่อนำไปรวมกับของเหลวที่ได้หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วจะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณตั้งต้น



ภาพที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละโดยน้ำหนักของแข็งแห้งที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังด้วยกรรมวิธีน้ำร้อนอัดความดันแล้ว

ภาพที่ 4.1 แสดงร้อยละ ผลได้ของแข็ง ของเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าของแข็งที่ได้มีปริมาณ แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพโดยมีค่าอยู่ในช่วง 30 - 40 กรัม (จากเศษรากมันสำปะหลังตั้งต้น 50 กรัม) อย่างไรก็ตามน้ำหนักของแข็งที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วควรมีค่าไม่ต่ำว่าร้อยละ 60 ซึ่งสอดคล้องกันปริมาณเฮมิเซลลูโล ส ลิกนิน และ สารประกอบที่สามารถสกัดออกได้เช่น แป้งมันสำปะหลัง และโปรตีน บางชนิด

4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังก่อนและหลังการปรับสภาพเบื้องต้น

จากการนำเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ร้อยละของ เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ของตัวอย่างที่ถูกปรับสภาพเบื้องต้นแล้วมีค่าลดลง ทำให้ทราบว่าเฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน บางส่วนได้ถูกสกัดออกไป ทำให้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการสภาพเบื้องต้นแล้วมี ร้อยละของเซลลูโลสที่มากขึ้น โดย จะเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละของ เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน กับอุณหภูมิ โดยร้อยละเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการปรับสภาพสูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดง องค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังก่อนและหลังการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้เศษรากมันสำปะหลังปริมาณ 50 กรัมและปรับสภาพเบื้องต้นที่ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ อัตราส่วนของแข็งต่อของน้ำ 1: 10

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	เถ้าและสารที่สามารถที่สกัดได้ (%)
เศษรากมันสำปะหลัง	-	50.09	22.08	13.20	14.63
เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว	150	53.92	12.53	22.08	11.47
	160	56.12	12.10	22.34	9.44
	170	55.99	13.26	18.83	11.92
	180	63.07	6.75	15.98	14.20

4.4 ผลการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังต่อความเข้มข้นของกลูโคสในสาลละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยเศษรากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เซลลูเลส

ผลการทดลองปรับ สภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150 – 180 องศาเซลเซียสแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 150 – 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 1: 10 และความดันเริ่มต้น 10 บาร์

การทดลองที่	เศษรากมันสำปะหลัง ที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว(กรัม)	อุณหภูมิในการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของกลูโคส* (กรัม/ลิตร)
1	5.02	150	9.26
2	5.11	160	11.64
3	5.05	170	13.35
4	5.28	180	33.48
5	5.11	150	9.15
6	5.06	160	11.55
7	5.03	170	15.67
8	5.05	180	35.16

*ความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายที่ได้หลังการย่อยเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วด้วยเอนไซม์เซลลูเลส

จากตารางที่ 4.4 การปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสให้ค่าความเข้มข้นกลูโคสในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่ได้จากขั้นตอนการย่อยด้วยเอ นไซม์ที่มีค่าสูงกว่า 25 กรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสมากกว่าสองเท่า

4.5 ผลการปรับอุณหภูมิ ความดันและอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่ใช้ปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง

จากการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้นเห้ามันสำปะหลังซึ่งสามารถคาดได้จากการทำการทดลอง ข้างต้นว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ ในช่วงอุณหภูมิ 150 – 190 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรอื่นที่คาดว่าจะมีผลต่อการปรับสภาพเบื้องต้นเช่น ความดัน อัตราส่วนระหว่าง ของแข็งและของเหลว ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองในการเพิ่มค่าอุณหภูมิ ความดันที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1:10

การทดลองที่	อุณหภูมิในการปรับปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	ความดันเริ่มต้น (บาร์)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัม/ลิตร)
1	180	5	11.85
2	180	10	32.48
3	180	15	32.41
4	190	10	30.23

จากตารางที่ 4.5 พบว่าความเข้มข้นของกลูโคสที่ตรวจพบในสารละลาย ที่ได้จากการย่อยเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดันเริ่มต้นจาก 5 บาร์ จนถึง 10 บาร์ และเริ่มคงที่เนื่องจากที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดันอิ่มตัวของไอน้ำมีค่าเท่ากับ 10 บาร์ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของ เครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นผลของความดันทำให้น้ำสามารถคงสภาพอยู่ในสถานะของเหลวและทำ ปฏิกิริยา กับเศษรากมันสำปะหลัง และเมื่อพิจารณาจาก ตารางที่ 4.6 พบว่าความเข้มข้นของกลูโคสเพิ่มขึ้นแปรผันไปตามการเพิ่มขึ้นของ

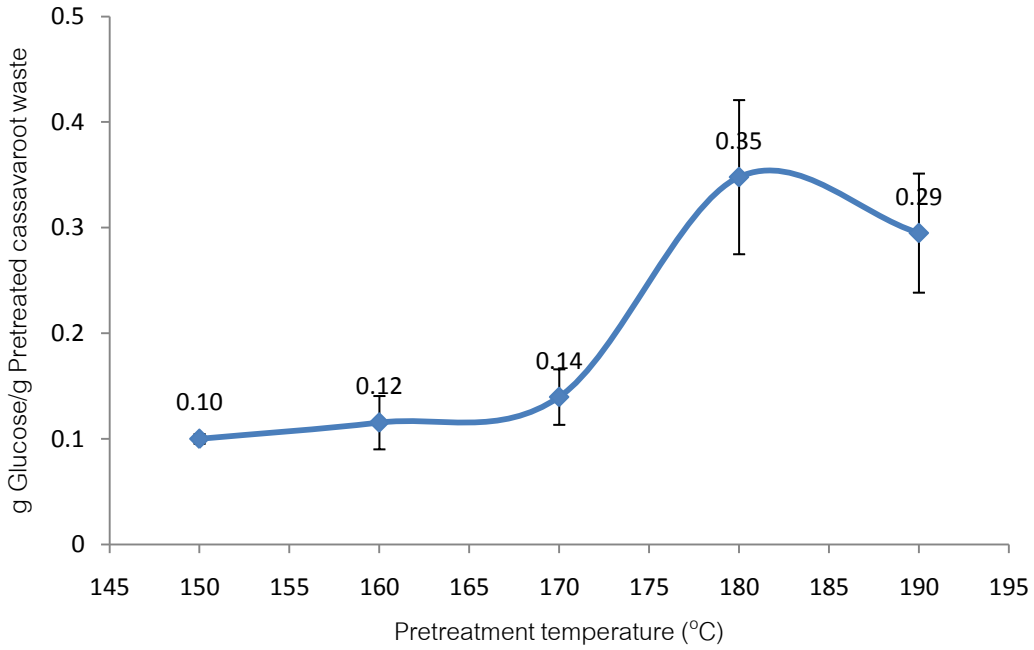
ปริมาณน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น โดยความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสสูงสุดที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ เท่ากับ 1:20 เนื่องจากความสามารถในการละลายของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และ สารละลายอื่นๆมีขีดจำกัดการเพิ่มปริมาณน้ำทำให้สารดังกล่าวสามารถละลายในน้ำระหว่างทำการปรับสภ าพเบื้องต้นได้มากขึ้น ส่งผลให้ ความสามารถในการปรับสภาพเบื้องต้นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเพิ่มค่าอุณหภูมิ ความดันและอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่ใช้ปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง

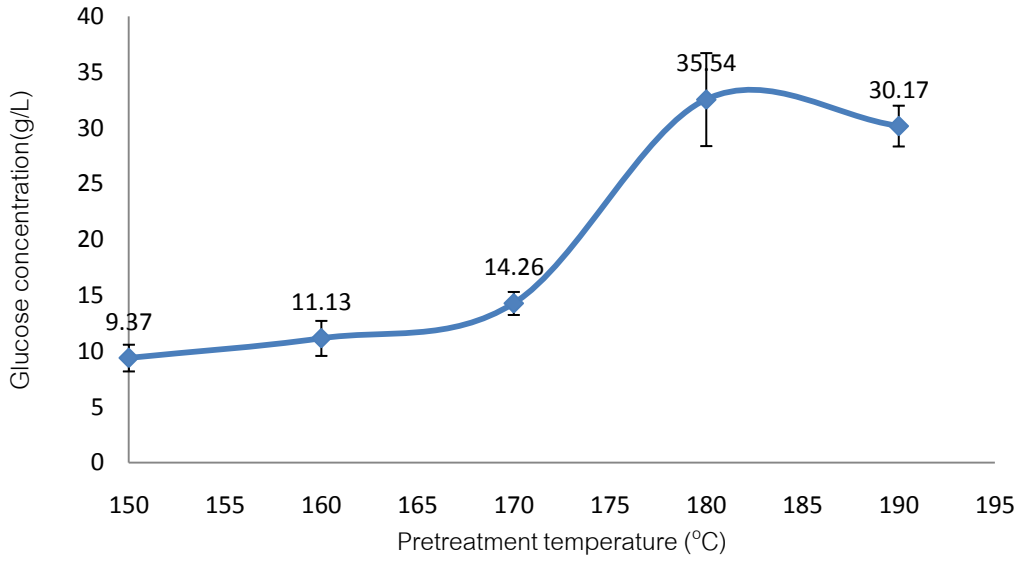
การทดลองที่	อุณหภูมิในการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)/อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ/ความดันเริ่มต้น(บาร์)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัม/ลิตร)
1	180/1:5/10	12.16
2	180/1:10/10	30.36
3	180/1:15/10	30.07
4	180/1:20/10	31.35

4.6 การหาภาวะที่เหมาสมในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังและผลการทดลองเชิงลึก

จากผลการทดลอง การปรับสภาพ เบื้องต้นสำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลได้กลูโคส (ตารางที่ 4.4) ผลของความดัน เริ่มต้น และ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ (ตารางที่ 4.5 - 4.6) ทำให้สามารถสรุปได้ถึงผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตจากเศษรากมันสำปะหลัง ที่ผ่านการปรับสภา พเบื้องต้นที่ความดันเริ่มต้น 10 บาร์และอัตราส่วนเศษรากมันสำปะหลังต่อน้ำที่ 1 ต่อ 10 ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อน้ำหนักกลูโคสที่ผลิตได้ต่อน้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว

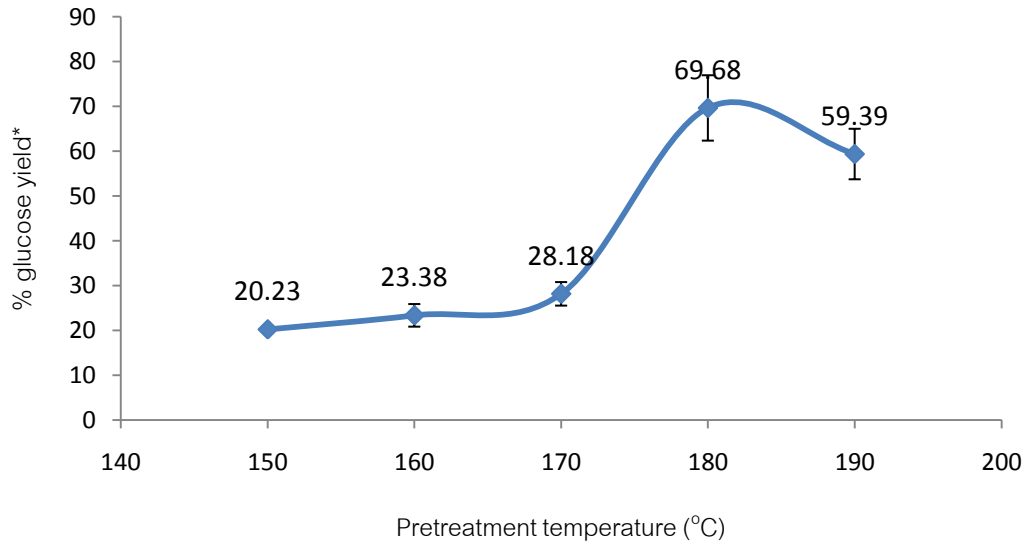


ภาพที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นของน้ำหนักกลูโคสที่ตรวจพบในสารละลายที่ได้จากกรรมวิธีการย่อยเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วด้วย เอนไซม์เซลลูเลส โดยทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำท่ากับ 1 : 10

จากภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถ ผลิตได้มีปริมาณมากขึ้น อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของเซลล์ได้เปลี่ยนไปโดยมีปริมาณของลิกนิน เฮมิเซลลูโล ส น้อยล งรวมถึงการเปลี่ยนไปของโครงสร้างของเซลลูโลส จึงทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงและทำปฏิกิริยาและย่อยสลายเซลลูโลสได้มากขึ้นโดยร้อยละผลได้กลูโคส(%glucose yield) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$\% \text{ glucose yield} = \frac{\text{Produced glucose wt.}}{\text{Cellulose in cassava root waste feed wt.(dry)}} \times 100 \qquad (4.2)$$

นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าที่แสดงใน ภาพที่ 4.3 - 4.4 เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองจำนวน 4 การทดลอง ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ทดลองได้ในอุณหภูมิเดียวกันมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก สาเหตุมาจากเศษรากมันสำปะหลังมีความหลากหลายในโครงสร้างเช่น เนื้อไม้ , เปลือกไม้ เป็นต้น ทำให้ส่งผลถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุดิบและองค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน



ภาพที่ 4.4 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคส ที่ผลิตได้จากเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ คิดเทียบกับปริมาณเซลลูโลสที่อยู่ในเศ ษรากมันสำปะหลังก่อนทำการปรับสภา พเบื้องต้น โดยทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1 : 10

นอกจากนี้จะเห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกลูโคสได้ปริมาณมากที่สุดเนื่องจากสภาพความเป็นกรดของน้ำแปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้น [21,23] อย่างไรก็ตามเมื่อทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้มีปริมาณที่ลดลงเนื่องจากภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพมีความรุนแรงมากเกินไปทำให้เศษรากมันสำปะหลังที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้นไม่เหมาะสมสำหรับการย่อยด้วยเอนไซม์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ควรใช้ปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังเพื่อใช้ผลิตเอทานอลคือ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่พบในรายงานวิจัยซึ่งใช้ชีวมวลชนิดลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบ [27-29]

ตารางที่ 4.7 แสดงการคำนวณดุลมวลของกระบวนการผลิตกลูโคสจากเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 150 – 180 °C พบว่าผลได้กลูโคสรวมทั้งกระบวนการมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสประมาณ 70 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเซลลูโลสบางส่วนยังอยู่ในรูปผลึกและไม่สามารถย่อยได้โดยเซลลูเลส รวมถึงการสูญเสียเซลลูโลสบางส่วนจากการปรับสภาพเบื้องต้น

ตารางที่ 4.7 ดุลมวลของกระบวนการผลิตกลูโคสที่ใช้อุณหภูมิต่างๆในการปรับสภาพเบื้องต้นที่

อุณหภูมิในการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักของแข็งเปียกก่อนการย่อย (กรัม)	ปริมาณร้อยละความชื้นในของแข็งเปียก	น้ำหนักของแข็งแห้งก่อนการย่อย (กรัม)	น้ำหนักกลูโคสที่ได้จากการย่อยต่อน้ำหนักของแข็งแห้ง 1 กรัม	ร้อยละผลได้น้ำตาลกลูโคส*
150	5.09	79.33	1.05	0.10	20.23
160	5.04	81.26	0.94	0.12	23.38
170	5.07	80.60	0.98	0.14	28.18
180	5.01	79.52	1.03	0.35	69.68

* คำนวณจากน้ำหนักกลูโคสที่ได้ต่อน้ำหนักเซลลูโลสตั้งต้นในเศษรากมันสำปะหลังก่อนการปรับสภาพเบื้องต้น

ตารางที่ 4.8 ปริมาณน้ำตาลในสารละลายหลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิในการปรับสภาพ	Liquid weight (g)	ปริมาณความเข้มข้นของกลูโคส(กรัมต่อลิตร)	ปริมาณความเข้มข้นของไซโลส(กรัมต่อลิตร)
150	250.51	0.01	1.82
160	269.47	0.12	2.86
170	261.93	1.29	5.11
180	235.07	3.97	11.65
190	241.34	5.43	12.68

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังโดยพบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยน้ำร้อนอัดความดันสามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกจากชีวมวลได้โดย สังเกตุได้จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลไซโลส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ในสารละลายที่ได้จากการ ปรับสภาพเบื้องต้น และมีการตรวจพบ น้ำตาล กลูโคส ปริมาณเล็กน้อยซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเตาปฏิกรณ์

ตารางที่ 4.9 ปริมาณ เฟอร์ฟูรอล และ 5-HMF ในตัวอย่างของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพเบื้องต้น

อุณหภูมิในการปรับสภาพ(องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรอล (ppm)	ความเข้มข้นของ 5-HMF(ppm)
150	0.00	0.00
160	0.00	0.00
170	0.00	0.00
180	0.03	0.10
190	7.07	29.31

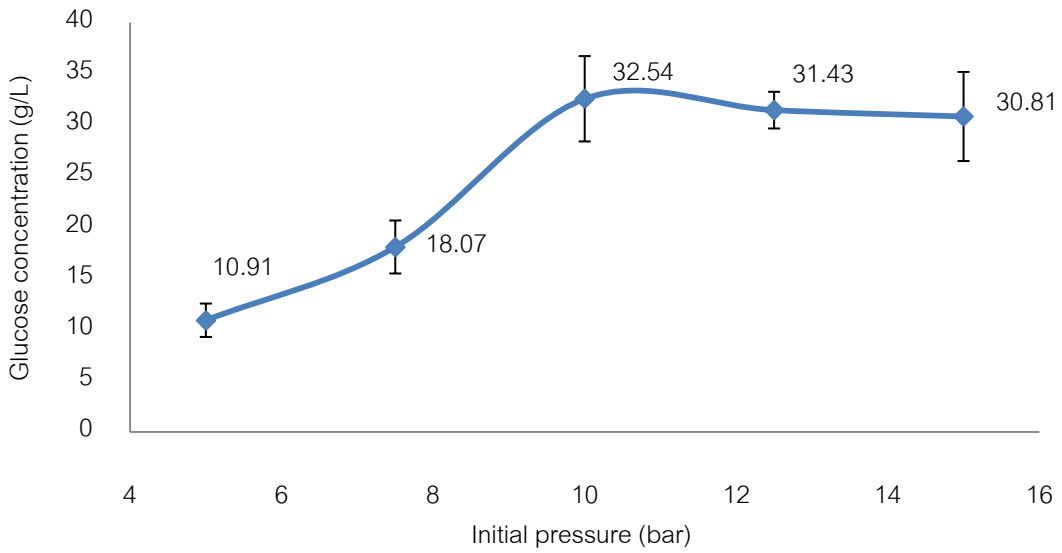
จากตารางที่ 4.9 พบว่าการปรับสภาพด้วยน้ำร้อนอัดความดันที่อุณหภูมิ 150-180 ไม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งทำให้เกิดสารที่ทำหน้าที่ยับยั้งปฏิกิริยาการย่อยของเอนไซม์ แต่เมื่อทำการ

เพิ่มอุณหภูมิเป็น 190 องศาเซลเซียส พบว่ามีการตรวจพบเฟอร์ฟูรอลและ 5-HMF ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แต่มีในปริมาณที่ไม่มีนัยสำคัญ

4.6.1 ผลของความดันเริ่มต้นในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง

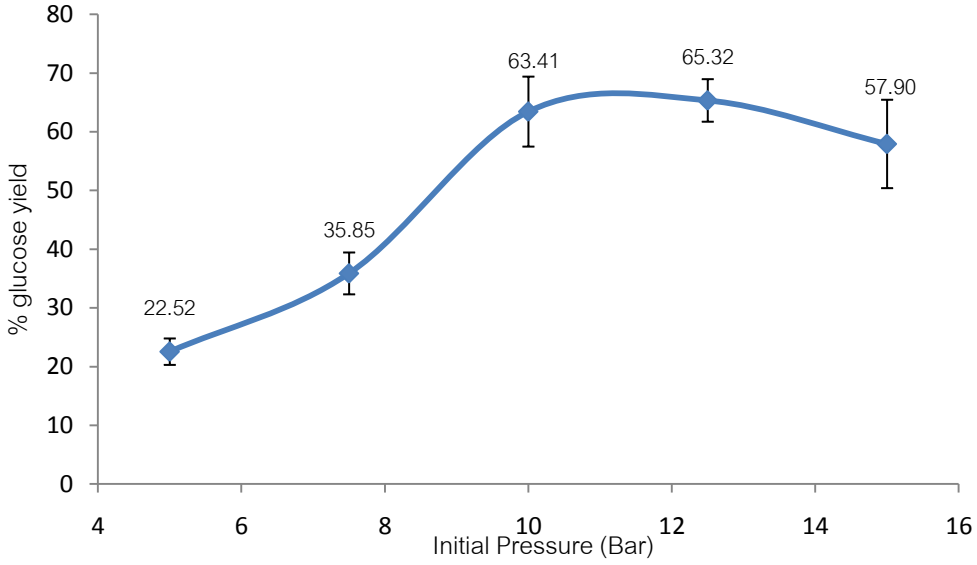
จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาในขั้นต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังด้วยกรรมวิธีน้ำร้อนอัดความดันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงสุด ดังนั้นจึงได้ใช้ค่าอุณหภูมิในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังเท่ากับ 180 องศาเซลเซียสเพื่อศึกษาผล ของความดัน เริ่มต้น ที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นโดยขนาดของเศษรากมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 2-5 มิลลิเมตรและใช้การเพิ่มความดันด้วยการเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์โดยความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 10 บาร์

ผลการทดลองที่ความดันต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ผลของความดันเริ่มต้นต่อปริมาณความเข้มข้นของกลูโคสในของเหลวที่ได้จากการย่อยสลายเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้ว ด้วย เอนไซม์เซลลูเลส โดยทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1: 10

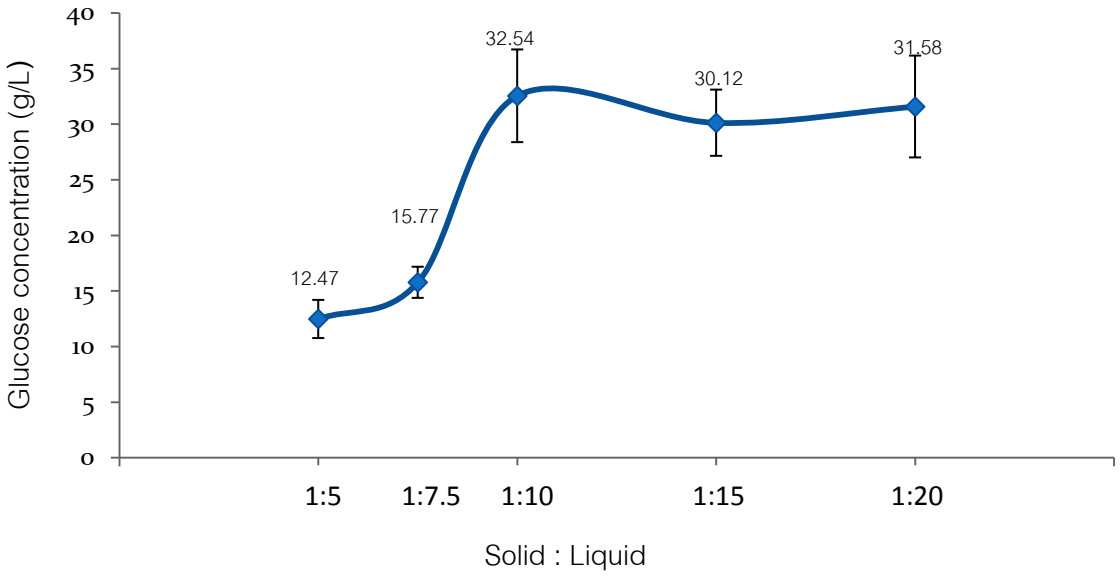
จากภาพที่ 4.5 และ 4.6 สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความดัน เริ่มต้นให้สูงกว่าความดันอิ่มตัวของไอน้ำไม่ทำให้ร้อยละผลได้กลูโคสมีค่าสูงขึ้น และความดันที่ เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังคือ 10 บาร์



ภาพที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้จากเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นภายใต้ความดันต่างๆ

4.6.2 ผลของอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง

ผลการทดลอง ของการปรับอัตราส่วน เศษรากมันสำปะหลังต่อน้ำในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลัง มีผลต่อร้อยละผลได้กลูโคสแสดงดังภาพที่ 4.7

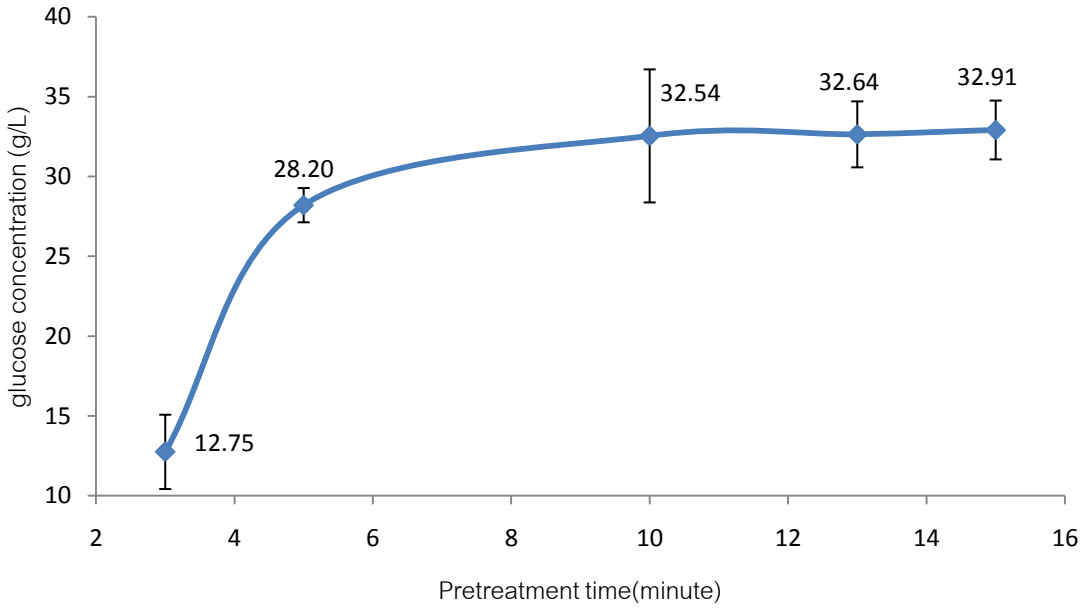


ภาพที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนเศษรากมันสำปะหลังต่อน้ำที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังที่มีต่อร้อยละผลได้กลูโคสในสารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการน้ำร้อนอัดความดันสามารถใช้อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ ได้มากที่สุดเท่ากับ 1 ต่อ 10 โดยไม่ทำให้ร้อยละผลได้ของกลูโคสลดลง เมื่อเทียบกับภาวะที่ใช้ปริมาณน้ำมากกว่าในการทดลอง อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนของเศษรากมันสำปะหลังต่อน้ำ มากกว่า 1 ต่อ 10 จะทำให้ปริมาณกลูโคสที่สามารถผลิตได้มีปริมาณลดลงอย่างมากเนื่องมาจากเศษรากมันสำปะหลังดูดซับน้ำในเครื่องปฏิกรณ์จนแห้งเกินไปซึ่งทำให้เกิดการไหม้ของเศษรากมันสำปะหลังภายในเครื่องปฏิกรณ์

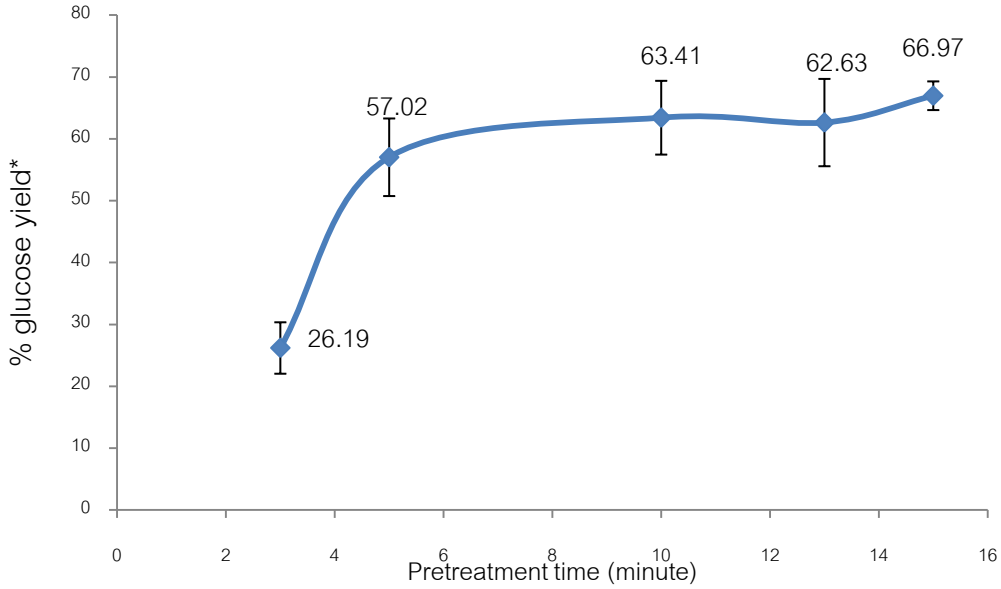
4.6.3 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังต่อความเข้มข้นของกลูโคสที่สามารถผลิตได้

ในการทำการทดลองผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังโดยนับเวลาหลังจากที่เครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหมดโดยในที่นี้ได้ใช้อุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการปรับสภาพเบื้องต้นและอัตราส่วนของแข็ง : น้ำ เท่ากับ 1:10 ความดันเริ่มต้นที่ 10 บาร์ ความดันสุดท้าย 18 บาร์ โดยทำการทดลอง 4 ครั้งต่อหนึ่งภาวะโดยผลการทดลองได้แสดงดังภาพที่ 4.9 และ 4.10



ภาพที่ 4.8 ผลของเวลาในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังต่อความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้

จากภาพที่ 4.8 และ 4.9 เมื่อทำการปรับสภาพเบื้องต้นโดยทดสอบที่เวลาน้อยกว่า 10 นาที จะพบว่า ปริมาณน้ำตาลที่สามารถผลิตได้มีปริมาณน้อยทั้งนี้เนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาก่อนที่เครื่องปฏิกรณ์จะทำการลดอุณหภูมิมีไม่เพียงพอที่จะทำการสกัดเฮมิเซลลูโลส และสารอื่นออกจากโครงสร้างของเศษรากมันสำปะหลังทำให้เซลลูโลสที่สามารถเข้าถึงได้โดยเอ นไซม์มีปริมาณน้อย โดยเวลาในการทำการปรับสภาพเบื้องต้นที่เหมาะสมจะเริ่ มตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 10 นาทีโดยพบว่ามีกา รเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลกลูโคส มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพเบื้องต้นนานเกินกว่า 10 นาที พบว่า ปริมาณ น้ำตาลที่สามารถผลิตได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.9 ผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพต่อร้อยละผลได้ของกลูโคสที่สามารถผลิตได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากเศษรากมันสำปะหลังที่ ผ่าน การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการน้ำร้อนอัดความดันโดยไม่มีการใช้สารเคมีใดๆ สามารถผลิตน้ำตาลลกลูโค สจากเซลลูโลสที่อยู่ภายในโครงสร้ างของเศษรากมันสำปะหลังได้สูงสุดที่ประมาณร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับปริมาณเซลลูโลสในวัตถุดิบตั้งต้น โดยน้ำหนักและได้สารละลายกลูโคสความเข้มข้นสูงสุ ดประมาณ 40 กรัมต่อลิตร โดยพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นเศษรากมันสำปะหลังเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสสูงสุดสำหรับเศษรากมันสำปะหลังที่มีขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร คือ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสและความดันเริ่มต้นที่ 10 บาร์ สามารถใช้อัตราส่วนเศษรากมันสำปะหลังต่อน้ำได้ ที่ 1 ต่อ 10 โดยทำให้ความเข้มข้นของกลูโคสเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและ ตรวจพบสารจำพวกเฟอร์ฟูรอล หรือ 5-HMF ในปริมาณที่ไม่มีนัยสำคัญในผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการปรับสภาพเบื้องต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มปริมาณร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสในสารละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วด้วยเอนไซม์เซลลูเลสโดยการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ใน การวิจัยโดยเปลี่ยนจากการใช้อ่างน้ำร้อนแบบเขย่า เป็นเครื่องกวนสารที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
2) การนำเศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วไปทำการแช่แข็งมีความเป็นไปได้ที่จะได้ปริมาณน้ำตาลผลได้ในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการย่อยด้วยเอมไซม์แล้วสูงขึ้น เนื่องจากการแช่แข็งสามารถทำให้โครงสร้างเซลล์เกิดความเสียหายโดยเกิดการแตกของผนังเซลล์ทำให้เป็นการช่วยให้เอมไซม์เซลลูเลสสามารถเข้าถึงเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

[1] Prasad, S., Anoop, S., and Joshi, H.C., and Joshi H.C. Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. Resources, Conversation and Recycling 50, (2007) : 1-39

[2] พรรณวิไล กิ่งสุวรรณรัตน์ . การผลิตเอทานอลจากเหง้ามันสำปะหลัง . วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[3] โกศล นธีรัตน์ . ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา : http://www3.dede.go.th [10 มีนาคม 2555]

[4] พรพรรณ เห็นสว่าง . ปริมาณผลผลิตทางการเกษตร [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา : http://www.oae.go.th [10 มีนาคม 2555]

[5] Campbell, N. A., and Reece, J. B. Biology, seventh edition. San Francisco: Pearson, 2005.

[6] Smith, J. G. Organic chemistry. New York: McGraw-Hill, 2006.

[7] Nelson, D. L., and Cox, M. M. Lehninger Principles of Biochemistry. Third edition. New York: Worth Publishers, 2000.

[8] Gullichsen, J., and Fogelbolm, C. J. Chemical Pulping, Finland, Fapet Jyvaskyla, 2000.

[9] Richard, R. cellulose's structure [online]. 2002. Available from : http://www.nzetc.org/ [2011, October 5]

[10] Stephen, Y. L., and Carlton, W. D. Methods in lignin chemistry. New York: Springer, 1992.

[11] Hiramatsu, E. Hemicelluloses [online]. 2002. Available from : http://chem.sci.utsunomiya-u.ac.jp/ [2010, April 12]

[12] Wales, J. Lignin [online]. 2012. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Lignin [8 October 2011].

[13] Clark, J.H. and Deswarte, F.E.I. Introduction to chemicals from biomass. Chichester, U.K. : Wiley, 2008.

[14] Dilanthe, S. Furfural. [Online]. 2012. Available from : http://hydroxymethylfurfural.info [2012, January 30]

[15] Taherzadeh, M. and Karimi, K. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. International Journal of Molecular Sciences 9 (2008) : 1621-1651.

[16] Hendriks, A.T.W.M. and Zeeman, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology 100 (2009) : 10-18.

[17] Bin, Y. and Charles, E.W. Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol. Biofuels, Bioproducts and Biorefining 2 (2008): 26-40.

[18] Sousa, C.L., et al. 'Cradle-to-grave' assessment of existing lignocellulose pretreatment technologies. Current Opinion in Biotechnology 20 (2009) : 339-347.

[19] Kumar, P., et al. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. Industrial & Engineering Chemistry Research 48 (2009) : 3713-3729.

[20] Carvalheiro, F., Duarte, L.C., and Gírio, F.M.S.A.D. Hemicellulose biorefineries : A review on biomass pretreatments. Journal of Scientific and Industrial Research 67 (2008) : 849-864.

[21] Nathan, M., et al. Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover. Bioresource Technology 96 (2005) : 1986–1993.

[22] ลลิตา นิทัศนจารุกุล. ผลของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่อ Cellulase Activity ในดินนาข้าว. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริม ประสบการณ์ , คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541

[23] Laser, M., et al. A comparison of liquid hot water and steam pretreatment of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. Bioresourse Technology, 81 (2002) : 33-44.

[24] Ingram, T., et al. Semi-continuous liquid hot water pretreatment of rye straw. The Journal of Supercritical Fluids, 48 (2009) : 238-246.

[25] Yu, Q., et al. Two-step liquid hot water pretreatment of Eucalyptus grandis to enhance sugar recovery and enzymatic digestibility of cellulose. Bioresource Technology 101 (2010) : 4895-4899.

[26] Goh, C. S., Lee, K.T., and Bhatia, S. Hot compressed water pretreatment of oil palm fronds to enhance glucose recovery for production of second generation bio-ethanol. Bioresource Technology 101 (2010) : 7362-7367.

[27] Rogalinski, T., Ingram, T., and Brunner, G. Hydrolysis of lignocellulosic biomass in water under elevated temperatures and pressures. J. of Supercritical Fluid, 47 (2008) : 54-63.

[28] Pérez, J.A., et al. Optimizing Liquid Hot Water pretreatment conditions to enhance sugar recovery from wheat straw for fuel-ethanol production. Fuel 87 (2008) : 3640-3647.

[29] Goh, C. S., Tan, H.T., Lee, K.T., and Mohamed, A. R. Optimizing ethanolic hot compressed water (EHCW) cooking as a pretreatment to glucose recovery for the production of fuel ethanol from oil palm frond (OPF). Fuel Processing Technology 91(2010) : 1146-1151.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์

1.วิธีวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI 203 om-88

สารเคมี และวิธีการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์

เตรียมโดย ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 กรัม และเจือจางด้วย น้ำกลั่น เป็น 100 มิลลิลิตร

2. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 0.5 นอร์มัล

เตรียมโดย ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 2.45 กรัมในน้ำกลั่น ปรับปริมาตร เป็น 100 มิลลิลิตร

3. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตมาตรฐานเข้มข้น 0.100 นอร์มัล

เตรียมโดย ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 0.5 กรัมในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต 0.1 นอร์มัล

เตรียมโดย ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต $[Fe\bullet (NH_4)\bullet(SO_4) \cdot 6H_2O]$ 4.05 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

5. กรดซัลฟูริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์

6. สารละลายอินดิเคเตอร์ (indicator)

เตรียมโดย ละลาย 1, 10-ฟีนานโธรลีนโมโนไฮเดรท และ เฟอร์รัสซัลเฟต ปริมาณ 1.5 กรัม 0.7 กรัมตามลำดับ ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร

7. สารละลายกรดซัลฟูริก 3 นอร์มัล

เตรียมโดย เทกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 8.35 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังให้ได้น้ำหนัก 1.5 กรัม(น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในบีกเกอร์ 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาทีแล้ว เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
2. กรองเศษรากมันสำปะหลังออกและทำการเก็บสารละลาย ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
3. วิเคราะห์ปริมาณ α - เซลลูโลส
    3.1 นำสารละลายตัวอย่างจากข้อ 2. ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 0.5 นอร์มัล 10 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
    3.2 เทกรดซัลฟูริกเข้มข้น 98เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตรลงไป
    3.3 หยดอินดิเคเตอร์ 2 - 4 หยด นำไปไตเตรทกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต ที่ทราบความเข้มข้น จนกระทั่งสารละลาย เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมม่วง บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต
    3.4 เตรียมสารละลายแบลงค์ โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นบรรจุ อยู่ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปทดลองด้วยกรรมวิธีเดียวกับข้อ 3.1 ถึง 3.3

3.5 การคำนวณ

$$\alpha - \text{cellulose}(\%) = 100 - (\frac{137(\text{V2} - \text{V1}) \times \text{N}}{\text{A} \times \text{W}})$$

V_1 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต ที่ใช้ไตเตรทกับสารละลาย

V_2 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต ที่ใช้ไตเตรทกับสารละลายแบลงค์

N = ความเข้มข้นของ เฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต (นอร์มัล)

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักชีวมวล (กรัม)

4. การวิเคราะห์ปริมาณ γ - เซลลูโลส

4.1 นำละลายตัวอย่างจากข้อ 2. ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3 นอร์มัล 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 70 - 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 - 3 นาที ปล่อยให้ตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ กรองสารละลายโดยเก็บของเหลวไว้เพื่อทำการวิเคราะห์

4.2 นำสารละลายใสที่กรองได้ไปวิเคราะห์วิธีการเดียวกันกับข้อ 3.1 ถึง 3.3

4.3 ทำการคำนวณปริมาณ γ –*cellulose*

$$\gamma - Cellulose = (\frac{137(V_3 - V_4) \times N}{A \times W})$$

V_3 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ไตเตรท ตัวอย่าง

V_4 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ไตเตรท แบลงค์

5. การวิเคราะห์ปริมาณ β - เซลลูโลส (เฮมิเซลลูโลส)

การคำนวณ

$$\beta - cellulose = 100 - ((\alpha - cellulose) + (\gamma - cellulose))$$

6. วิธีวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน

คำนวณได้จาก ลิกนิน = 100 – ร้อยละของเซลลูโลส – ร้อยละของเฮมิเซลลูโลส – ร้อยละของเถ้าและสารที่สามารถสกัดออกได้

7. วิธีวิเคราะห์เถ้า

7.1 เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ครูซิเบิลและฝาปิด
3. เดซิเคเตอร์

7.2 วิธีการทดลอง

1. เผาครูซิเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำครูซิเบิลเก็บไว้ในเดสิเคเตอร์เพื่อทำการลดอุณหภูมิ
3. ชั่งน้ำหนักครูซิเบิลพร้อมฝา
4. ชั่งน้ำหนักชีวมวลแห้ง 1 กรัม แล้วนำไปบรรจุใส่ในครูซิเบิล
5. เผาครูซิเบิลที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิครูซิเบิลโดยการนำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล การทดลอง

การคำนวณ

$$A = W_1 - W_2$$

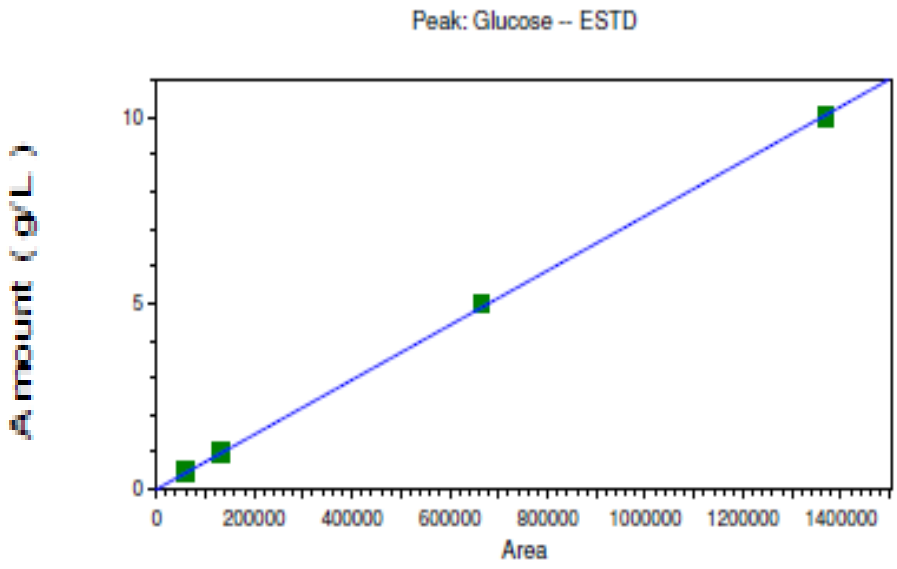
เมื่อ A = ปริมาณเถ้าของเถ้า (กรัม)

W_1 = น้ำหนักของครูซิเบิลที่มีเถ้า (กรัม)

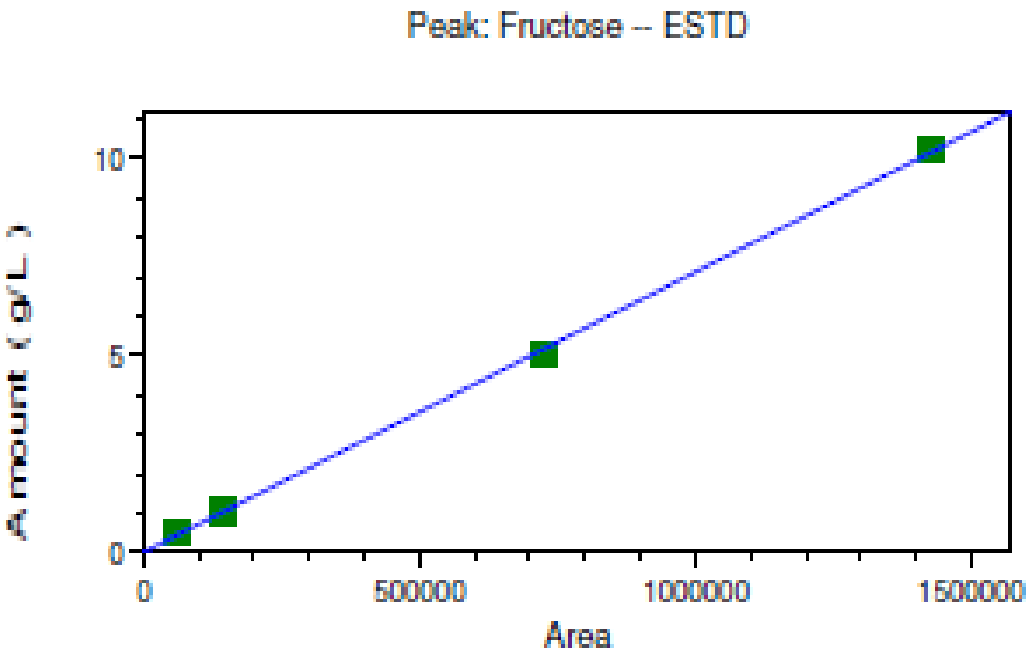
W_2 = น้ำหนักของครูซิเบิล (กรัม)

ภาคผนวก ข

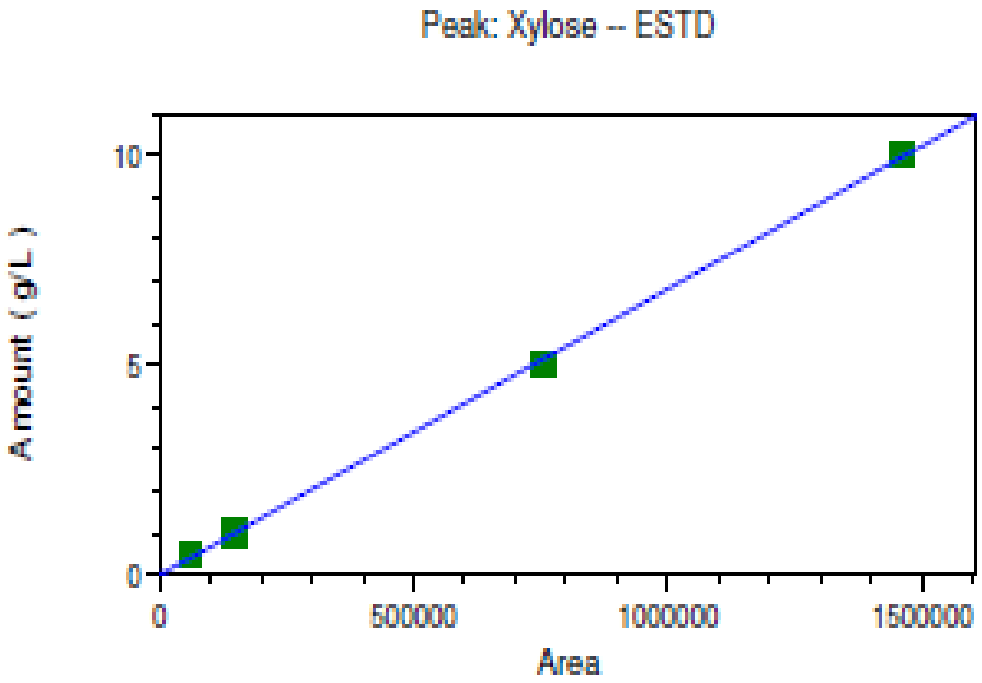
เส้นกราฟ มาตรฐาน และ ตัวอย่าง โครมาโทแกรม HPLC



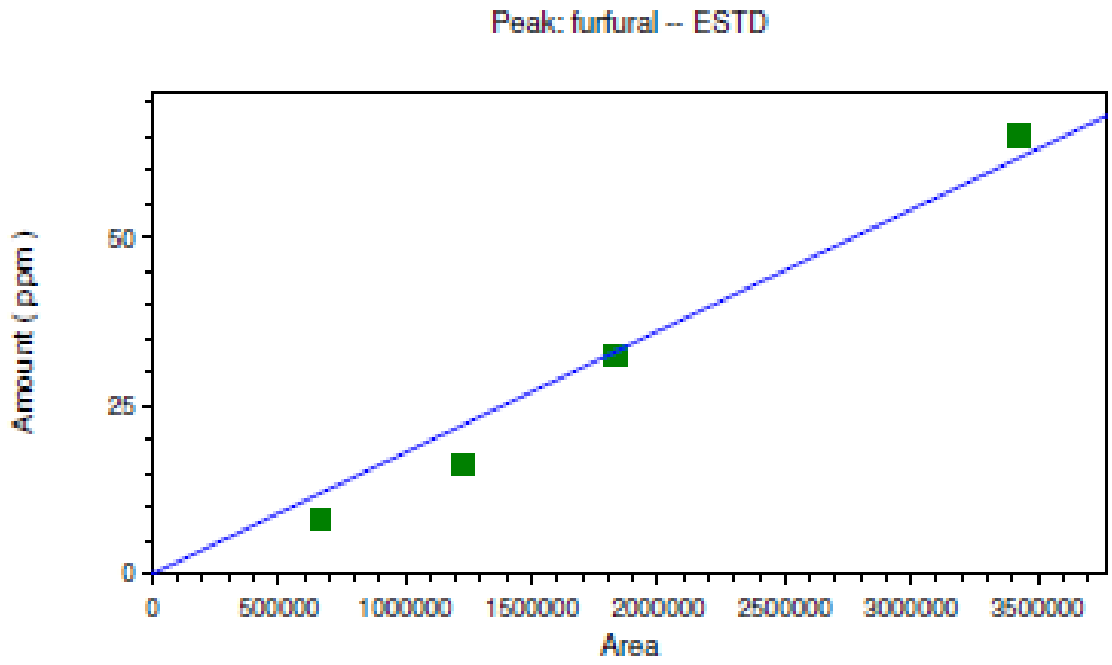
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง HPLC



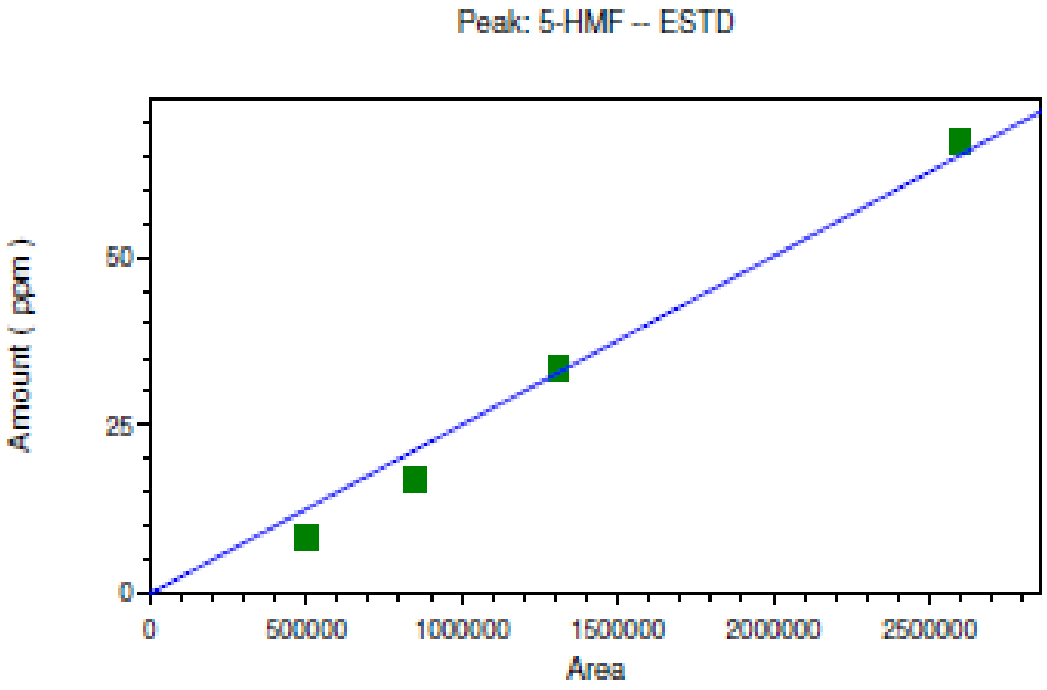
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาน้ำตาลฟลุกโตสด้วยเครื่อง HPLC



รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาน้ำตาลไซโลสด้วยเครื่อง HPLC



รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหาเฟอฟูรอลด้วยเครื่อง HPLC



รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานสำหรับตรวจหา 5-HMF ด้วยเครื่อง HPLC

ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

1. การศึกษาการปรับสภาพเหง้ามันสำปะหลัง

1.1 ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณส่วนประกอบในเหง้ามันสำปะหลัง ที่ผ่านการปรับ

ตารางที่ ค.1 องค์ประกอบของ เศษรากมันสำปะหลังก่อนการปรับสภาพเบื้องต้น

องค์ประกอบ	น้ำหนักแห้ง (กรัม)		
	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	ค่าเฉลี่ย
เซลลูโลส	24.96	25.13	25.05
ลิกนิน	10.43	11.65	11.04
เฮมิเซลลูโลส	7.69	5.51	6.60
เถ้าและสารที่สกัดได้	6.92	7.71	7.31
ปริมาณสุทธิ	50	50	50

ตารางที่ ค.2 องค์ประกอบของเศษรากมันสำปะหลังที่ปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	เซลลูโลส (g)	เฮมิเซลลูโลส (g)	ลิกนิน (g)	เถ้าและสารที่สามารถที่สกัดได้ (g)
เศษรากมัน	150	24.48	5.69	10.03	5.21
สำปะหลังที่	160	23.97	5.17	9.54	4.03
ผ่านการปรับ	170	18.88	4.47	6.35	4.02
สภาพแล้ว	180	19.81	2.12	5.02	4.46

ตารางที่ ค.3 ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิในการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัม/ลิตร)				ความเข้มข้นเฉลี่ย
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
150	9.48	9.15	9.57	9.26	9.36
160	10.45	11.55	10.87	11.64	11.13
170	13.65	15.67	14.36	13.35	14.26
180	38.16	35.35	33.48	35.16	35.54
190	30.23	32.63	28.29	29.49	30.16

ตารางที่ ค.4 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยการใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิในการปรับสภาพ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละผลได้กลูโคส(%)				ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้(%)
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
150	20.88	19.80	20.04	20.20	20.23
160	21.20	25.37	21.18	25.73	23.37
170	26.67	28.91	31.53	25.59	28.17
180	71.93	69.70	59.81	77.25	69.67
190	53.72	66.10	55.88	61.82	59.38

ตารางที่ ค.5 ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นภายใต้ความดันต่างๆ

ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัม/ลิตร)				ความเข้มข้นเฉลี่ย
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
5	11.85	10.56	10.76	12.44	11.41
7.5	18.60	17.53	18.97	17.15	18.06
10	38.16	31.35	32.48	28.16	32.54
12.5	31.90	32.48	30.11	32.15	31.68
15	32.41	35.48	30.18	25.15	30.81

ตารางที่ ค.6 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยการใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นภายใต้ความดันต่างๆ

ความดัน (บาร์)	ร้อยละผลได้กลูโคส(%)				ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้(%)
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
5	22.33	21.54	20.50	25.71	22.52
7.5	39.69	36.88	35.03	31.14	18.06
10	71.94	61.81	58.03	61.87	63.41
12.5	68.55	67.70	60.58	64.42	65.32
15	59.77	65.31	59.12	47.41	57.90

ตารางที่ ค.7 ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อัตราส่วนของแข็ง ต่อน้ำต่างๆ

อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัม/ลิตร)				ความเข้มข้นเฉลี่ย
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
1:5	12.16	10.24	14.27	13.18	12.47
1:7.5	16.17	17.52	14.30	15.06	15.76
1:10	38.16	31.35	32.48	28.16	32.54
1:15	34.18	29.10	30.07	27.11	30.11
1:20	35.16	31.35	34.59	25.18	31.57

ตารางที่ ค.8 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำต่างๆ

อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ	ร้อยละผลได้กลูโคส(%)				ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้(%)
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
1:5	23.98	22.06	30.41	24.43	25.22
1:7.5	35.16	32.38	30.81	29.98	32.09
1:10	71.94	61.81	58.03	61.87	63.41
1 : 15	69.56	58.99	54.81	49.82	58.30
1 : 20	65.18	66.36	66.43	50.26	62.06

ตารางที่ ค.9 ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่ช่วงเวลาต่างๆ

เวลาในการปรับสภาพเบื้องต้น (นาที)	ความเข้มข้นกลูโคส (กรัม/ลิตร)				ความเข้มข้นเฉลี่ย
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
3	10.83	10.66	15.10	14.39	12.74
5	28.66	29.46	27.61	27.06	28.20
10	38.16	31.35	32.48	28.16	32.54
13	33.44	34.97	32.01	30.12	32.63
15	34.18	34.48	32.48	30.48	32.91

ตารางที่ ค.10 ร้อยละผลได้ของน้ำตาลกลูโคสที่สามารถผลิตได้โดยใช้เศษรากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่ช่วงเวลาต่างๆ

เวลาในการปรับสภาพเบื้องต้น (นาที)	ร้อยละผลได้กลูโคส(%)				ค่าเฉลี่ยร้อยละผลได้(%)
	การทดลองที่				
	1	2	3	4	
3	23.48	21.83	30.23	29.22	26.19
5	59.15	64.61	50.12	54.19	57.02
10	71.94	61.81	58.03	61.87	63.41
13	68.64	68.36	59.16	54.35	62.63
15	66.95	69.25	67.86	63.79	66.97

ภาคผนวก ง

น้ำหนักเศษรากมันสำปะหลังก่อนแหละหลังการปรับสภาพเบื้องต้น

ตารางที่ ง.1 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.73	250.68	45.42
2	50.41	246.23	47.32
3	50.91	238.39	45.24
4	50.70	248.24	45.57

ตารางที่ ง.2 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.87	230.99	43.63
2	50.69	250.01	41.36
3	50.84	221.77	43.50
4	50.57	251.56	40.78

ตารางที่ ง.3 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.06	222.39	31.64
2	50.76	209.98	30.68
3	50.80	249.84	33.52
4	50.60	218.13	33.73

ตารางที่ ง.4 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.07	214.59	27.60
2	50.21	224.41	31.40
3	50.19	203.38	35.65
4	50.19	250.06	34.55

ตารางที่ ง.5 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.12	202.29	27.96
2	50.04	230.60	27.80
3	50.90	224.83	29.63
4	50.69	238.60	29.85

ตารางที่ ง.6 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:5 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.92	224.37	40.41
2	50.64	245.10	44.34
3	50.14	242.49	38.28
4	50.78	210.83	39.65

ตารางที่ ง.7 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:7.5 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.53	247.37	36.17
2	50.96	210.42	36.88
3	50.03	245.22	38.60
4	50.41	226.62	37.01

ตารางที่ ง.8 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:12.5 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.29	231.64	32.58
2	50.96	230.74	32.05
3	50.24	207.506	30.80
4	50.82	209.22	32.72

ตารางที่ ง.9 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:20 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.09	210.99	26.20
2	50.54	240.92	33.21
3	50.05	218.59	25.12
4	50.94	227.17	35.32

ตารางที่ ง.10 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 5 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.33	214.39	40.21
2	50.19	232.07	43.03
3	50.04	216.80	42.00
4	50.09	235.09	39.30

ตารางที่ ง.11 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 7.5 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.98	242.96	36.83
2	50.23	239.43	36.43
3	50.31	214.21	35.52
4	50.22	206.64	37.77

ตารางที่ ง.12 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 12.5 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.33	244.11	29.45
2	50.56	237.27	28.96
3	50.60	228.99	30.39
4	50.94	228.11	29.40

ตารางที่ ง.13 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 20 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.93	209.94	28.84
2	50.81	209.51	25.82
3	50.80	222.98	30.02
4	50.16	214.54	33.63

ตารางที่ ง.14 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.97	246.81	42.83
2	50.34	232.96	42.19
3	50.23	227.78	36.52
4	50.16	231.21	38.18

ตารางที่ ง.15 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.71	234.91	32.48
2	50.09	249.70	32.57
3	50.79	206.59	38.72
4	51.00	228.00	34.32

ตารางที่ ง.16 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 13 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.65	233.61	27.74
2	50.28	222.53	25.54
3	50.35	210.37	29.94
4	50.11	205.43	29.49

ตารางที่ ง.17 น้ำหนักของเศษรากมันสำปะหลังก่อน และ หลังการปรับสภาพเบื้องต้น ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของแข็ง : น้ำ 1:10 ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที

การทดลองที่	น้ำหนักเริ่มต้น	น้ำหนักเปียกหลังการปรับสภาพเบื้องต้น	น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพเบื้องต้น
1	50.27	222.96	29.01
2	50.50	228.58	30.68
3	50.28	237.83	31.13
4	50.96	238.23	32.26

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ธนกร นวรัตนไพบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนอัสสัมชัญกรุงเทพ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมนาโน คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552