

การผลิตน้ำตาลจากเปลือกกล้วยตากแห้งทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี

PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM BANANA PEELS
USING COMBINED CHEMICAL AND PHYSICAL METHOD

นางสาววราภรณ์	มงคลเสนา
นางสาววิศรา	เชือกนาสน
นางสาวรัชฎา	ศานธิ์ปาน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีตั้งแนวคิดค้น

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี
PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM BANANA PEELS
USING COMBINED CHEMICAL AND PHYSICAL METHOD

นางสาววราภรณ์ มงคลเคหา
นางสาววิศรา เผือกผาสุข
นางสาววิรัชญา ศูนย์ปาน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM BANANA PEELS
USING COMBINED CHEMICAL AND PHYSICAL METHOD**

WARAPORN MONGKOLKHEHA

WARISSARA PHUAKPASUK

WARITTHA SOONPARN




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

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี
 PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM BANANA PEELS USING COMBINED CHEMICAL AND PHYSICAL METHOD

ชื่อนักศึกษา นางสาวราภรณ์ มงคลเคหา
 นางสาววิศรา เพ็ญผาสุข
 นางสาววิรัชญา ศูนย์ปาน

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน	
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี
ชื่อนักศึกษา	นางสาววารารณ์ มงคลเคหา นางสาววิศรา เผือกผาสุข นางสาววิรัชญา ศูนย์ปาน
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาหาความเป็นไปได้ในการเตรียมไฮโดรไลสจากเปลือกกล้วยน้ำว่า เพื่อให้ได้น้ำตาลรีดิวส์ปริมาณสูงสุด โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของสารปรับสภาพ ความเข้มข้นของสารปรับสภาพ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ผลจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย คือการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.5% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที พบว่าเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงจาก 12.61% เป็น -0.71% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (untreated) นอกจากนี้พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเพิ่มขึ้นจาก 28.81% เป็น 29.60% และ 23.69% เป็น 37.21% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ปริมาณของเหลวที่กรองแยกได้จากขั้นตอนการปรับสภาพพบว่ามีน้ำตาลรีดิวส์เท่ากับ 73.57 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อนำเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพไปย่อยเพื่อให้ได้น้ำตาลรีดิวส์โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง พบว่าได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์เท่ากับ 10.92 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ดังนั้นไฮโดรไลสที่เตรียมได้โดยใช้สภาวะดังกล่าว ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์สุทธิสูงสุดเท่ากับ 373.77 ± 18.78 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

คำสำคัญ : วัสดุลิกโนเซลลูโลส, ไฮโดรไลส, น้ำตาลรีดิวส์, การปรับสภาพเบื้องต้น

Title	PREPARATION OF REDUCING SUGAR FROM BANANA PEELS USING COMBINED CHEMICAL AND PHYSICAL METHOD
Students	WARAPORN MONGKOLKHEHA WARISSARA PHUAKPASUK WARITTHA SOONPARN
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Environmental Chemistry
Academic Year	2013
Advisor	Asst.Prof. Dr Usarat Thawornchaisit

ABSTRACT

In this special project, the feasibility studies of preparation of hydrolysate from banana peels of *Musa* AABB cv Klui 'Namwa' in order to obtain highest yield of reducing sugars were investigated. Factors being tested are types of chemicals for pretreatment, concentration of chemical used in pretreatment process and reaction temperature. Results showed that the optimal condition for preparation of hydrolysates from banana peels was pretreatment with hydrochloric acid 1.5% for 6 hours followed by boiling at 100° C for 30 min. It was found that the average percentage composition of hemicellulose in the pretreated samples decreased from 12.61% to -0.71% in comparison with the untreated samples. In addition, the average percentage composition of cellulose and lignin in the pretreated samples increased from 28.21% to 29.60% and 23.69% to 37.21%, respectively. The reducing sugars of 73.57 mg/g banana peels in the liquid phase filtered from the pretreatment step were obtained. The reducing sugars of 10.92 mg/g in the pretreated banana peels that were hydrolyzed by the diluted hydrochloric acid were obtained. Therefore, the banana peel hydrolysates prepared under the optimal condition yield the total reducing sugars of 373.77± 18.78 mg/g banana peel dry weight.

Keywords : Lignocellulosic material, Hydrolysate, Reducing sugars, Pretreatment.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สำเร็จลุล่วงได้ ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องและให้ความอนุเคราะห์กับโครงการพิเศษ ดังนี้ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้กรุณาสละเวลาให้ความรู้และคำแนะนำแนวทางตลอดการทำโครงการพิเศษ และขอขอบพระคุณอาจารย์จรรยา คงฤทธิ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตรและจัดการทรัพยากร หลักสูตรสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้ในเรื่องของการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อยีส

ขอขอบพระคุณพี่นักวิทย์ประจำสาขาวิชาเคมีที่ช่วยจัดหาและคำแนะนำการใช้อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทำโครงการพิเศษ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้เป็นที่รัก ผู้ให้กำลังใจและให้โอกาสการศึกษาจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ทำการศึกษาได้บ้างตามสมควร หากมีข้อเสนอแนะประการใดเพื่อปรับปรุงผลงานให้ดีขึ้น ทางคณะผู้จัดทำขอน้อมรับข้อเสนอแนะและคำติชม ด้วยความยินดีและขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุติกโนเชลลูโลส	3
2.1.1 เซลลูโลส	5
2.1.2 เฮมิเซลลูโลส	5
2.1.3 ลิกนิน	6
2.2 การผลิตเอทานอลจากติกโนเชลลูโลส	7
2.2.1 เอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลส	8
2.3 การปรับสภาพเบื้องต้น	10
2.3.1 การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ	10
2.3.2 การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์	11
2.3.3 การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี	12
2.3.4 การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ	12
2.4 การไฮโดรไลซิส	13
2.4.1 การย่อยด้วยสารเคมี	13
2.4.2 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์	14
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 กกล้วย	15
2.5.1 องค์ประกอบทั่วไป	16
2.5.2 ส่วนประกอบทางกายภาพของกล้วย	16
2.5.3 ลักษณะทั่วไปของพืช	16
2.5.4 เปลือกกล้วย	17
2.5.5 ส่วนประกอบทางกายภาพและทางโภชนาการ ของกล้วยและเปลือกกล้วย	17
2.5.6 ประโยชน์ของกล้วยน้ำว้า	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	24
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	24
3.2 วัตถุประสงค์และการเตรียมตัวอย่าง	25
3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกกล้วย	25
3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย	25
3.4.1 การศึกษาผลของชนิดสารเคมีปรับสภาพ ต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย	25
3.4.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารปรับสภาพ ต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย	27
3.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิต น้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย	27
3.5 การเตรียมไฮโดรไลเสทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	29
4.1 องค์ประกอบทางเคมีในเปลือกกล้วยน้ำว้า	29
4.2 ผลการศึกษาชนิดของสารปรับสภาพต่อ การเตรียมผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย	30
4.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ	30
4.2.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในส่วนของเหลว	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารปรับสภาพ ต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย	36
4.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิของการปรับสภาพ ต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย	39
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สรุปผลการทดลอง	41
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก ก	49
ภาคผนวก ข	55
ภาคผนวก ค	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณเซลล์ulos เฮมิเซลล์ulos และลิกนินในวัสดุลิกโนเซลล์ulos แต่ละประเภท	4
2.2 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยกรด	13
2.3 ส่วนประกอบทางเคมีเป็นเปอร์เซ็นต์ของกล้วยดิบและกล้วยสุกในสภาพแห้ง	17
2.4 ส่วนประกอบโภชนะทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้า	18
2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ ห่ามและสุก	18
2.6 องค์ประกอบลิกโนเซลล์ulos ในเปลือกกล้วยน้ำว้า	19
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ไฮโดรไลเสทของเปลือกกล้วย	25
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยที่ศึกษาเทียบกับเปลือกกล้วยจากงานวิจัยอื่น	29
4.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วย	35
สารเคมีต่างชนิดกันเทียบกับชุดตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน	3
2.2 โครงสร้างภายในผนังเซลล์ของพืช	4
2.3 หน่วยซ้ำของลิกนิน	6
2.4 กระบวนการผลิตเอทานอล	7
2.5 กระบวนการผลิตเซลลูโลส ลิกเอทานอลจากพืชชีวมวลแบบครบวงจร	9
2.6 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสหลังการปรับสภาพ	10
3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	26
4.1 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างชนิดกันเทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ(untreated)	31
4.2 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ(untreated) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	33
4.3 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	33
4.4 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	34
4.5 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	34
4.6 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันเทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (untreated)	37
4.7 ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในไฮโดรไลสเสทที่เตรียมจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน	38
4.8 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.5% โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเทียบกับชุดทดลองที่ไม่ปรับสภาพ	39
4.9 กราฟแสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในไฮโดรไลสเสทที่เตรียมจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิต่างกัน	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในสถานะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลในโลกมีปริมาณลดลงเป็นลำดับ เป็นผลมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรม รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของประชากร ทำให้การค้นคว้าและพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนจัดเป็นหัวข้อที่หลายฝ่ายให้ความสนใจ ไบโอดีทธานอลจัดเป็นพลังงานทดแทนที่มีการส่งเสริมและพัฒนาใช้อย่างจริงจังในประเทศไทย เพื่อลดการพึ่งพาน้ำมัน ตลอดจนเพิ่มมูลค่า และสร้างเสถียรภาพให้กับผลผลิตทางการเกษตร โดยตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (2551-2565) ประเทศไทยมีนโยบายส่งเสริมให้เกิดการผลิตและใช้เอทานอลไม่น้อยกว่า 9 ล้านลิตร/วัน ภายในปี 2565 (กระทรวงพลังงาน, มปป.) ซึ่งปัญหาที่จะเกิดขึ้นคือวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตเอทานอล ได้แก่ อ้อยและมันสำปะหลังอาจมีไม่เพียงพอ อีกทั้งพื้นที่สำหรับการเพาะปลูกพืชพลังงานมีอยู่อย่างจำกัด (กระทรวงพลังงาน, มปป.) ทำให้การวิจัยพัฒนาและสนับสนุนการผลิตเอทานอลจากพืชทางเลือกอื่นจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว ชังข้าว โปด ชานอ้อย เศษไม้ และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่นๆ จัดเป็นวัตถุดิบทางเลือกในการผลิตเอทานอลที่กำลังเป็นที่สนใจในการศึกษา เนื่องจากผนังเซลล์ของพืชเหล่านี้จะมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์ โดยโมเลกุลของน้ำตาลจะต่อกันเป็นโพลีแซคคาไรด์อยู่ในส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเมื่อนำมาผ่านการปรับสภาพและการย่อยจะได้น้ำตาลที่สามารถหมักต่อจนได้เป็นเอทานอล (ธนธรและคณะ, 2546) เรียกเอทานอลที่ได้จากวัสดุประเภทนี้ว่า *เซลลูโลสเอทานอล* (cellulosic ethanol) ทั้งนี้กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ (pretreatment) เพื่อให้วัตถุดิบมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายเป็นน้ำตาลจัดเป็นขั้นตอนสำคัญที่กำหนดต้นทุนการผลิตไบโอดีทธานอล (Sathitsukasanoh et al., 2012) ด้วยเหตุนี้การหาสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการปรับสภาพสำหรับแต่ละวัตถุดิบจึงเป็นการศึกษาที่จำเป็น

กล้วยน้ำว้าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเนื่องจากเป็นผลไม้ที่สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปีมีประโยชน์ใช้มูลค่าได้ทุกส่วนและมีคุณค่าทางอาหารมากใช้เป็นอาหารเด็กอ่อน กินสดทำเป็นขนมได้หลายชนิด เช่น ขนมกล้วย กล้วยทอด กล้วยฉาบ กล้วยตาก เป็นต้น ซึ่งทำให้มีเปลือกกล้วยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปเป็นจำนวนมากจากการสำรวจประเทศไทยมีปริมาณขยะเปลือกกล้วยน้ำว้ามากถึง 200 ตันต่อวัน (คมชัดลึก, 2550. อ้างถึงในครุวรรณ และคณะ, 2552) และยังไม่มีการนำส่วนของเปลือกกล้วยมาใช้ประโยชน์เท่าที่ควร อีกทั้งในเปลือกกล้วยมีองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสที่สำคัญ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (ฉัตติยา

, 2553) จึงทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำเปลือกกล้วยมาผลิตเป็นน้ำตาลรีดิวส์หรือไฮโดรไลเซต เพื่อใช้ในการผลิตเอทานอลต่อไปได้

โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและการผลิตน้ำตาลรีดิวส์ของเปลือกกล้วยเพื่อนำไปผลิตเป็นเอทานอลต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้เตรียมไฮโดรไลเซตสำหรับผลิตเอทานอล คือ เปลือกกล้วยน้ำว้า ที่เหลือจากการทำกล้วยทอด
2. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกกล้วยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณองค์ประกอบเยื่อใยด้วยวิธี Detergent method และศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
3. การเตรียมไฮโดรไลเซตของเปลือกกล้วย
 - 3.1 การปรับสภาพใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี โดยปัจจัยที่จะศึกษา ได้แก่
 - ชนิดของสารเคมี (แช่น้ำเปล่า, กรดไฮโดรคลอริก, โซเดียมไฮดรอกไซด์)
 - ความเข้มข้นของสารที่เหมาะสม (0.5% , 1% , 1.5%)
 - อุณหภูมิ (60°C , 80°C , 100°C)
 ตัวแปรตาม คือ ส่วนของของเหลวนำไปวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวส์และส่วนของแข็งนำไปศึกษาองค์ประกอบเยื่อใยและ โครงสร้างทางกายภาพของวัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพ
 - 3.2 การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วยโดยไฮโดรไลซ์เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพในข้อ 3.1 โดยวิธีทางเคมี ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1%

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

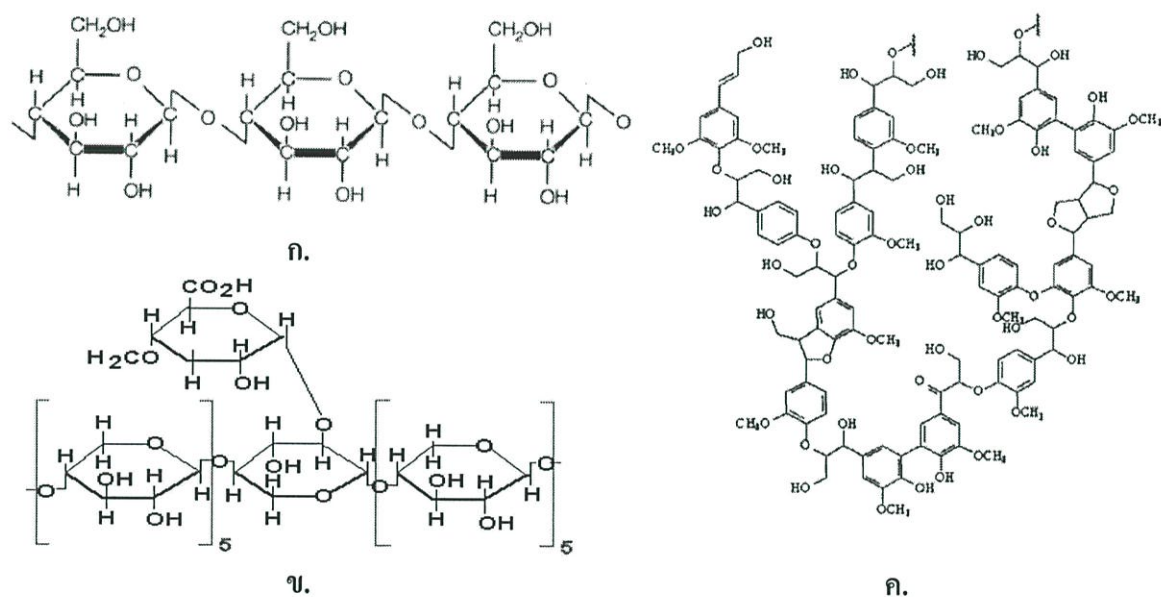
1. ได้วัตถุดิบทางเลือกที่สามารถนำไปผลิตน้ำตาลรีดิวส์เพื่อใช้ในการผลิตเอทานอลต่อไป
2. เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุลิกโนเซลลูโลส

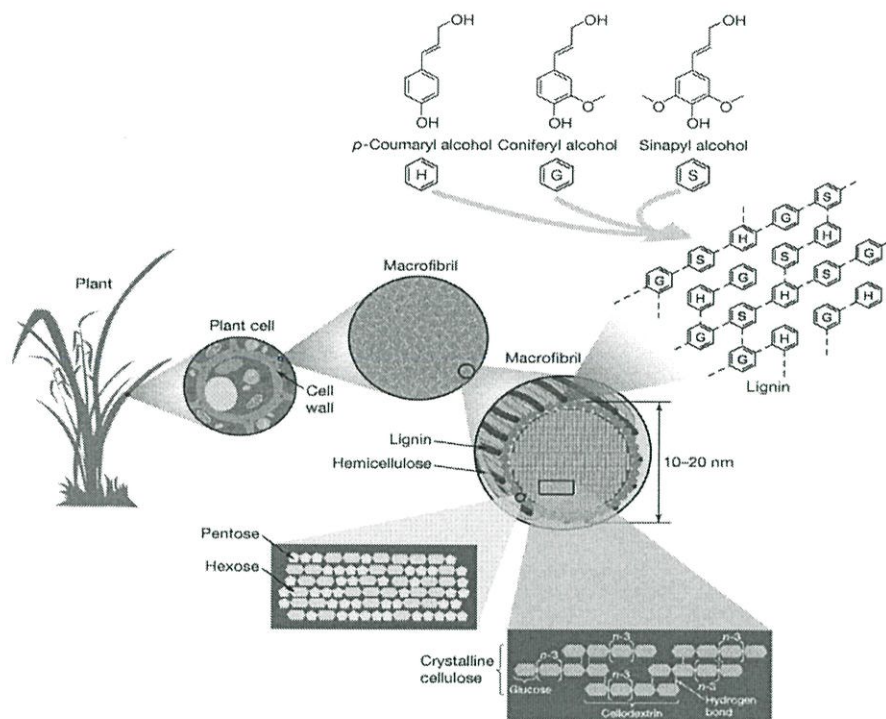
วัสดุลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic material) หมายถึง ชีวมวลที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (รูปที่ 2.1) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่พบเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช (รูปที่ 2.2) โดยพืชแต่ละชนิดจะมีปริมาณสัดส่วนแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและส่วนต่างๆของพืช (ตารางที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมี ก. เซลลูโลส ข. ตัวอย่างเฮมิเซลลูโลส ค. ลิกนิน

(ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/cellulose>, <http://en.wikipedia.org/>

wiki/File:Hemicellulose.png, <http://2008.igem.org/Team:Wisconsin/Project>)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างภายในผนังเซลล์ของพืช

(ที่มา: Rubin, 2008)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในวัสดุลิกโนเซลลูโลสแต่ละประเภท (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)

ชนิดของวัสดุ ประเภทลิกโนเซลลูโลส	ปริมาณองค์ประกอบ			
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อ้างอิง
เหง้ามันสำปะหลัง	82.14	11.41	6.45	พรธณวิไล, 2545
ฟางข้าว	38.56	19.69	13.64	Zhu et al., 2005
ฟางข้าวสาลี	48.57	27.70	8.17	Badal et al., 2005
หญ้าแฝกหอม	34.41	34.04	15.95	อรุณวรรณ, 2547
ชานอ้อย	34.08	20.31	8.93	หรรษา และ เนริสา, มปป.
เปลือกถั่วลิสง	35.13	12.96	9.04	หรรษา และ เนริสา, มปป.
รำข้าวเจ้า	8.30	17.58	2.38	หรรษา และ เนริสา, มปป.
รำข้าวสาลี	9.07	26.10	2.74	หรรษา และ เนริสา, มปป.

ชนิดของวัสดุ ประเภทลิกโนเซลลูโลส	ปริมาณองค์ประกอบ			
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อ้างอิง
ไม้เนื้อแข็ง				
- แบล็ค โลกัสท์	41.61	17.66	26.70	วนิดา, 2553
- ป็อปลาร์	44.70	18.55	26.44	วนิดา, 2553
- ยูคาลิปตัส	49.50	13.07	27.71	วนิดา, 2553
ไม้เนื้ออ่อน				
- ต้นสน	44.50	21.09	27.67	วนิดา, 2553
หญ้า				
- สวิตช์	31.98	25.19	18.17	วนิดา, 2553

เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$)_x เฮมิเซลลูโลส เช่น ไซแลน ($C_5H_8O_4$)_m และลิกนิน ($C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0.9-1.7}$)_n ในลำดับ ไบและเป็ลือก (วนิดา, 2553) เนื้อหาต่อไปจะทบทวนความรู้ทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบดังกล่าว

2.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีลักษณะเป็นเส้นใย พบทั่วไปในธรรมชาติ โดยพบเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในผนังเซลล์พืช ไม่พบในเซลล์สัตว์ มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงของน้ำตาลกลูโคสมากกว่า 10,000 โมเลกุล มาเรียงต่อกันเป็นสายโซ่ยาวด้วยพันธะ β (1,-4)-glycosidic bond ทำมุม 180 องศา ตามแนวแกนตั้งรูปที่ 2.1ก ในแต่ละสายโซ่ของเซลลูโลสจะมีแรงดึงดูดกับสายโซ่ข้างเคียงด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ (วนิดา, 2553) ซึ่งมีผลทำให้เกิดลักษณะของเส้นใย (microfibril) ที่ไม่ละลายน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายต่างอ่อน แต่จะละลายในกรดและด่างแก่ นอกจากนี้ยังพบว่ากรย่อยสลายโดยสมบูรณ์ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสอย่างเดียว แต่ถ้การย่อยสลายไม่สมบูรณ์จะได้ เซลโลไบโอส (Cellobiose) ซึ่งเป็นน้ำตาลไดแซคคาไรด์ (Disaccharide) และได้โอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) (ฉัตติยา, 2553)

2.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

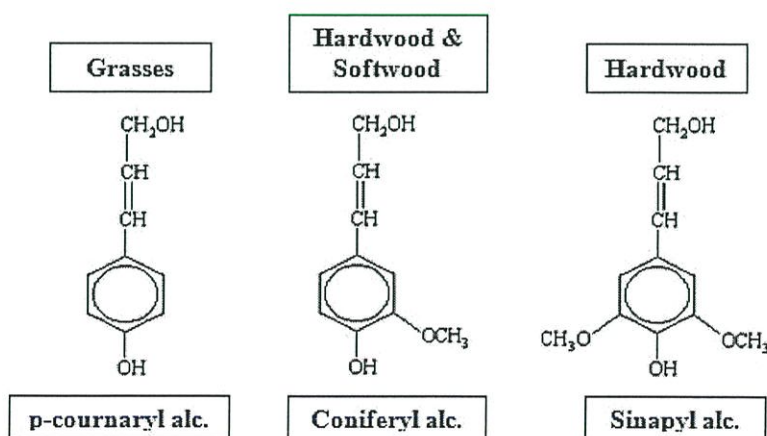
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ของน้ำตาลเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยน้ำตาลเพนโตส (ไซโลส (xylose), อะราบินโนส (arabinose)) สายโพลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเฮทเทอโรจีนัส ประกอบด้วยโพลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกัน คือ เพนโตแซน ส่วนใหญ่เป็นไซแลนและอาราเบน เมื่อนำไปย่อยจะได้น้ำตาลไซโลสและอะราบินโนส

เฮกโซแซน ส่วนใหญ่เป็นแมนแนน กาแลคแทนและกลูแคน เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโทส กาแลคโตส และกลูโคส ตามลำดับ (นคร, 2554) และ โพลีโรไนด์ ส่วนมากเป็นสารประกอบของ กรดยูเรนิคปอยู่ด้วย ที่สำคัญคือ เฮกซูลอนิก

เฮมิเซลลูโลสพบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชทำหน้าที่คล้ายตัวเชื่อมระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน โดยมีเพคติน (pectin) ทำหน้าที่เป็นตัวประสานเกิดเป็นร่างแหของไฟเบอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับ เซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก เฮมิเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัว โครงสร้างแบบสุ่มมีการแตกกิ่งมาก และไม่เป็นผลึกรูปร่างเป็นอสัณฐานทำให้ถูกไฮโดรไลซิสได้ง่ายด้วยกรดอ่อนหรือเบสอ่อน

2.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติกหรือที่เรียกว่าเป็น ฟีนอลิกพอลิเมอร์ โดยมีหน่วย ฟีนิลโพรเพน (phenyl propane) ดังรูปที่ 2.3 เรียงต่อกันแบบสุ่ม ที่หน่วยฟีนอลอาจเป็นกัวอีเอซิลหรือไซรินกิล ที่ตำแหน่งแอลฟาและเบต้าของ โมเลกุลลิกนิน โครงสร้างของ ลิกนินมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง (highly crosslinked) ดังรูปที่ 2.1ค ทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น ใน เอทานอล หรือเมทานอลที่ร้อน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปกติลิกนินจะอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืชระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและเพคติน โดยสร้างพันธะโคเวเลนต์กับเฮมิเซลลูโลส หรืออาจจะสร้างพันธะกับพอลิแซคคาไรด์อื่นๆ ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของ พืช ขัดขวางการย่อยสลายของจุลินทรีย์และขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเคมี ลิกนินจะมีปริมาณมากขึ้นตามอายุของพืช ซึ่งจะทำให้ผนังเซลล์ถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้ยากขึ้น อาจเกิดพันธะในอีกหน่วยหนึ่ง ภายในสายพอลิเมอร์ที่ประกอบกันเป็น โมเลกุลลิกนิน ปกติลิกนินจะอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืช บริเวณรอบๆ เซลลูโลส โดยเป็นตัวป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยอีกด้วย (อนุก, 2528 อ้างถึงใน ปัญญาพงษ์และพรทิพย์, 2551)

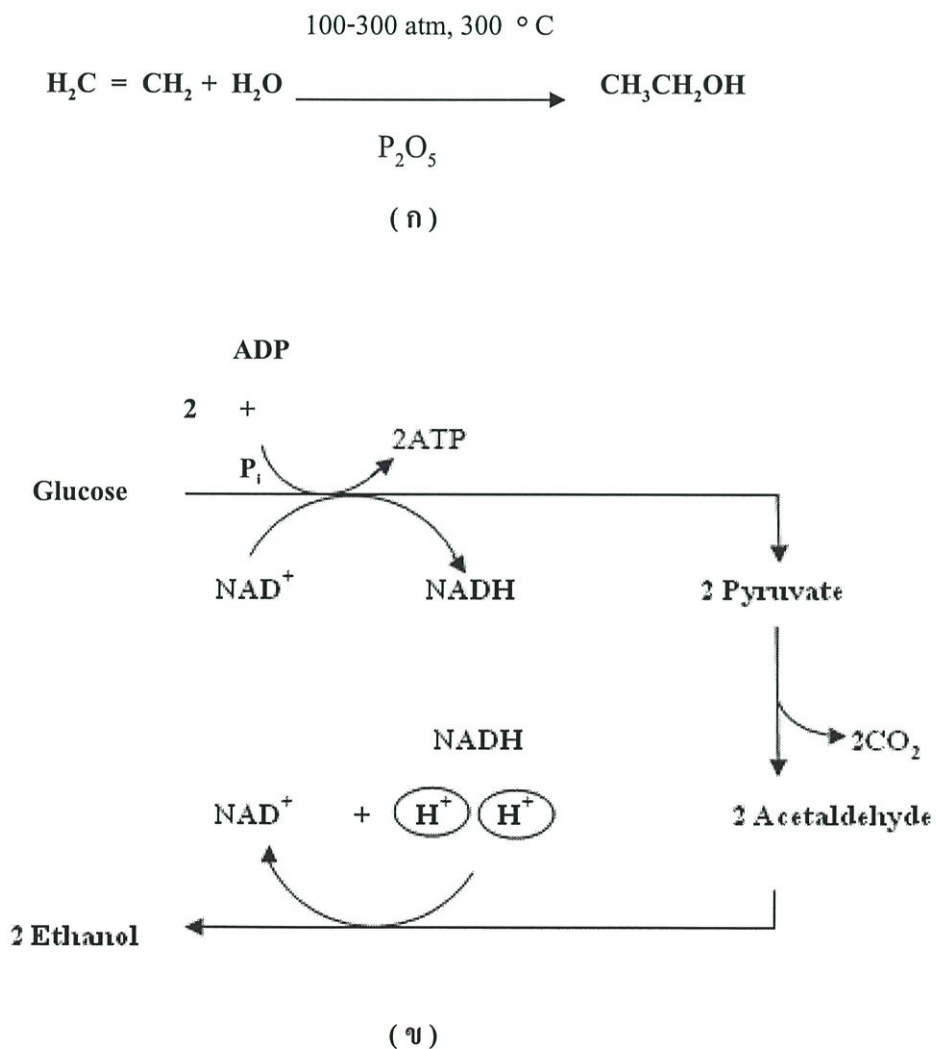


รูปที่ 2.3 หน่วยซ้ำของลิกนิน

ที่มา: http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php

2.2 การผลิตเอทานอลจากกลีโคซิล

เอทานอล (ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) คือสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีสูตรโมเลกุล คือ C_2H_5OH เป็นของเหลวใส ไม่มีสี จุดติดไฟง่าย สามารถละลายน้ำและสารอินทรีย์อื่นได้ ให้ค่าพลังงานความร้อน (calorific value) โดยการเผาไหม้ประมาณ 12,800 บีทียู (BTU ย่อมาจาก British Thermal Unit ซึ่งเป็นค่าวัดพลังงาน) มีจุดเดือด 78 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็ง -117.3 องศาเซลเซียส และมีความถ่วงจำเพาะ 0.794 ที่ 11.6 องศาเซลเซียส (สารวัดรี, 2540 อ้างถึงใน วนิดา, 2553) การผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม สามารถทำได้ 2 วิธีการด้วยกัน คือการผลิตเอทานอลทางเคมี และการผลิตเอทานอลทางชีวภาพ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตเอทานอล

(ก) กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี และ (ข) การหมักด้วยจุลินทรีย์

2.2.1 เอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลส (cellulosic ethanol)

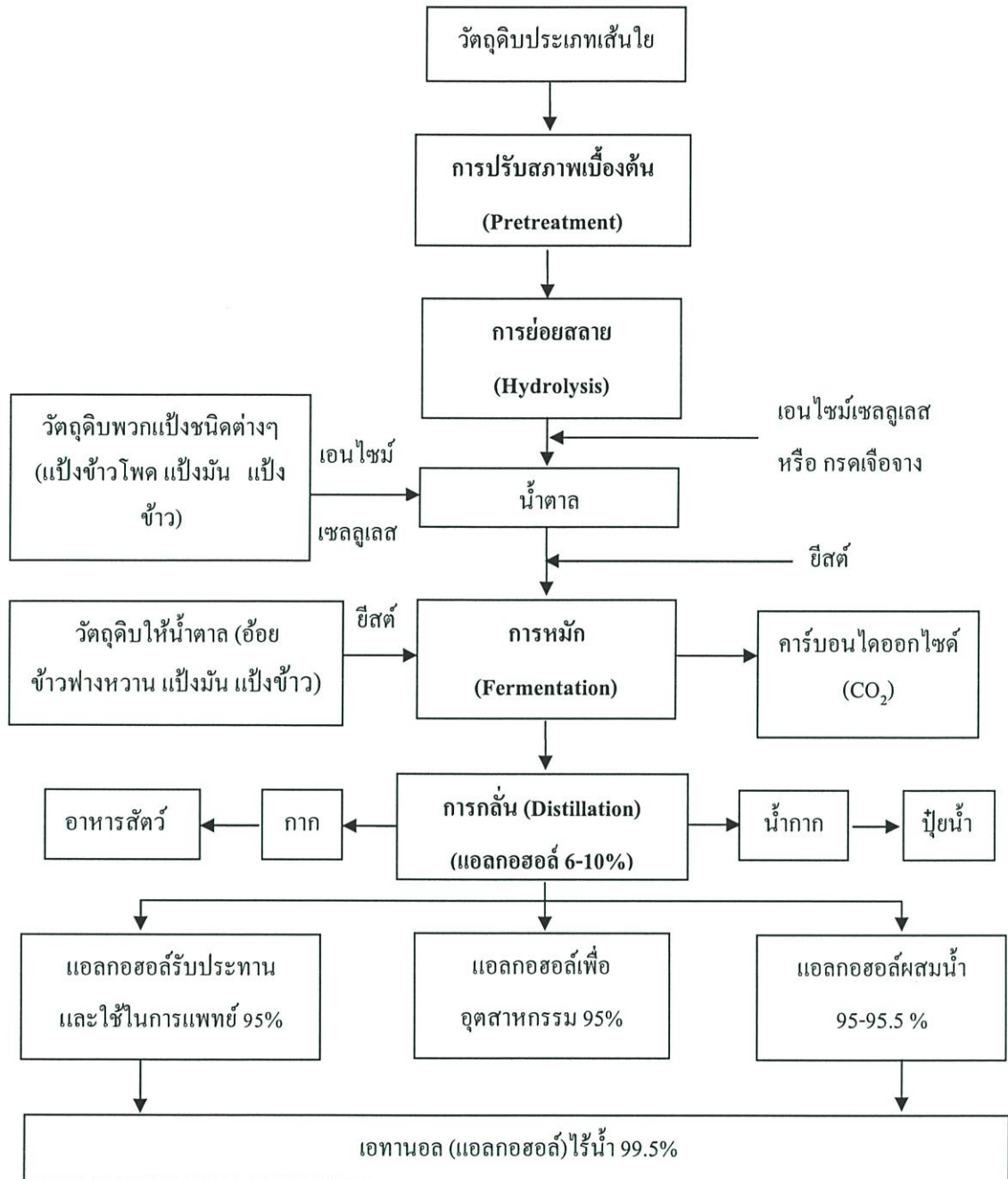
เซลลูโลสเอทานอลหรือเอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลส เป็นเอทานอลที่ผลิตได้จากวัตถุดิบหลักประเภท ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกไม้ และเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นต้น เรียกวัตถุดิบประเภทนี้ว่า “ วัสดุกลีโนเซลลูโลส ” ซึ่ง เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์พืช ซึ่งเกิดขึ้นจากหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคส เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลสจึงมีคุณสมบัติและลักษณะทางเคมีเช่นเดียวกับเอทานอลที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาลและแป้งที่ได้จากอ้อยหรือมันสำปะหลัง ซึ่งกระบวนการผลิตเซลลูโลสเอทานอลจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.5

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอล แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ

(1) วัตถุดิบประเภทแป้ง (starchy material) เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวบาเลย์ มันฝรั่ง มันเทศ เป็นต้น วัตถุดิบพวกนี้สามารถย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลได้โดยการใช้เอนไซม์หรือกรด แป้งที่สามารถนำมาผลิตเอทานอลได้ต้องเป็นแป้งที่สามารถละลายน้ำได้ในน้ำร้อน ซึ่งจะถูกเอนไซม์ย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลที่สามารถหมักได้ (เทพปัญญา, 2545)

(2) วัตถุดิบประเภทน้ำตาล (saccharide material) เช่น อ้อย กากน้ำตาล ข้าวฟ่างหวาน หัวผักกาดหวาน เป็นต้น (ธีรภัทร, 2543)

(3) วัตถุดิบที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (cellulosic biomass) เช่น ฟางข้าว ผักตบชวา หญ้าแฝก หรือเชื้อยจากพืชชนิดต่างๆ (ธีรภัทร, 2543; อำนวย, 2548) วัสดุเหลือทิ้งจากโรงเลื่อย โรงงานทำกระดาษ กระดาษหนังสือพิมพ์ (เทพปัญญา, 2543) วัตถุดิบประเภทนี้มีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและมีองค์ประกอบอื่นๆ คือ ลิกนิน โปรตีน เถ้า และสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ (Murphy and McCarty, 2005)



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตเซลลูโลสเอทานอลจากพืชชีวมวลแบบครบวงจร

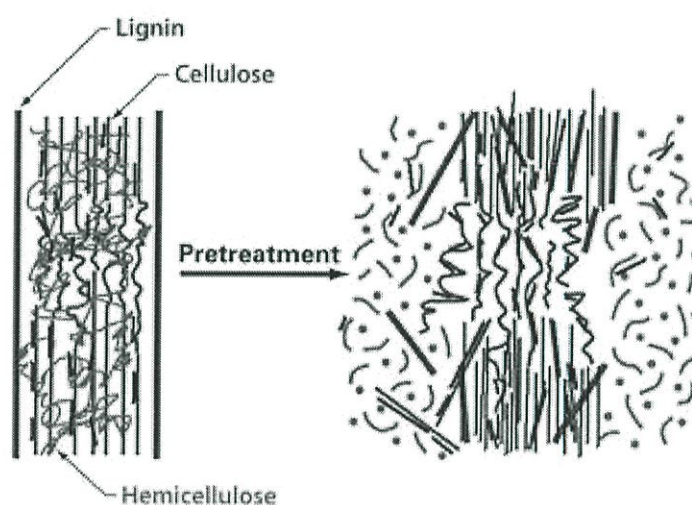
(ดัดแปลงจาก ชัชนันท์ และเฉลิม, 2555)

โดยการปรับสภาพนั้นเป็นขั้นตอนการเตรียมลิกโนเซลลูโลสให้อยู่ในรูปที่พร้อมต่อการย่อย ขั้นตอนแรกนี้จัดเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่กำหนดอัตราการผลิตและผลได้ทั้งหมดของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว รวมทั้งต้นทุนการผลิตเอทานอล (วนิดา, 2553 ; Sathisuksanoh et al., 2012) ลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพจากขั้นตอนแรกนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยใช้วิธีการย่อยสลายทางเคมีด้วยกรด หรือการใช้เอนไซม์ น้ำตาลที่ได้จากการย่อยจะถูกนำไปหมักด้วย จุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นเอทานอลต่อไป

2.3 การปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment)

กระบวนการปรับสภาพเป็นการเตรียมวัตถุดิบโนเซลลูโลสให้มีความง่ายต่อการย่อยสลายเป็นน้ำตาลได้มากขึ้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้โครงสร้างที่เป็นผลึกหรือโครงสร้างที่เป็นเส้นใยที่ติดอยู่ให้แตกออก ดังรูปที่ 2.6 และเพิ่มความพรุนในวัตถุดิบอีกด้วย (วนิดา, 2553) ประโยชน์ของการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ทำให้วัสดุหมักสามารถที่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นน้ำตาลได้ง่าย
- (2) ลดการสูญเสียคาร์โบไฮเดรต
- (3) ลดการเกิดผลพลอยได้ (by-products) ซึ่งจะยังเป็นตัวยับยั้งในขั้นตอนกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกระบวนการหมัก
- (4) ลดปัญหาเรื่องต้นทุนในการผลิต



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสหลังการปรับสภาพ

(Kumar et al., 2009)

โดยวิธีการปรับสภาพสามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธี ดังนี้

2.3.1 การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Pretreatment)

เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบ และทำให้เส้นใยเซลลูโลสแตกออก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ด้วยการบดหรือตัดและการใช้ความร้อน เป็นต้น การปรับสภาพด้วยวิธีเชิงกล โดยวิธีบด ตัดหรือไม่บด ซึ่งจะทำให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีขนาดเล็กลงและทำให้โครงสร้างผลึก (Crystalline) ของเส้นใยที่ประกอบด้วยไมโครไฟบริลจำนวนมากแตกออก ซึ่งขนาดของวัสดุที่ได้จากการตัดจะมีขนาด 10-30 มิลลิเมตรและหลังจากการโม่หรือบดจะมีขนาด 0.2-2 มิลลิเมตร (วนิดา, 2553) นอกจากนี้การลดขนาดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดการเพิ่มพื้นที่ผิวและลดจำนวนโมโนเมอร์ เหลือในโมเลกุลของโพลิเมอร์ หรือองศาของการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of

Polymerization, DP) โดยปัจจัยเหล่านี้จะทำให้การย่อยลิกโนเซลลูโลสเกิดได้ดีขึ้น 5-25% (วนิดา, 2553)

2.3.2 การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ (Physico-Chemical Pretreatment)

- การระเบิดด้วยไอน้ำ (Stream Explosion Process) หลักการคือทำให้วัตถุดิบที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ อิ่มตัวด้วยไอน้ำภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงแล้วลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน ความชื้นและอุณหภูมิสูงทำให้พืชปลดปล่อยกรดอินทรีย์ออกมา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติก ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสให้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์ และน้ำตาลเพนโทสบางส่วนจะกลายเป็นเฟอฟูรัล (Furfural) รวมทั้งน้ำตาลเฮกโซสบางส่วนก็เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิล เมทิลเฟอฟูรัล (Hydroxyl methyl furfural) ดังนั้นการย่อยสลายเซลลูโลสในขั้นต่อไปจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

- การใช้น้ำร้อน (Liquid hot water, LHW) เป็นการใช้น้ำร้อนแทนไอน้ำ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อสลายเฮมิเซลลูโลส ทำให้เข้าถึงเซลลูโลสได้ดีขึ้น และทำให้การย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น 2-5 เท่า (Hendriks and Zeeman, 2009 อ้างถึงใน วนิดา, 2553)

- การระเบิดด้วยสารละลายเบสเจือจาง ชนิดของสารละลายเบสเจือจางที่นิยมใช้กัน ได้แก่

(1) Ammonia fiber explosion (AFEX) เป็นวิธีการหนึ่งของการปรับสภาพทางด้านเคมีกายภาพ ซึ่งวัตถุประสงค์ลิกโนเซลลูโลสจะถูกกรรมด้วยแอมโมเนียเหลวที่ความดันและอุณหภูมิสูงตามระยะเวลาที่กำหนด หลังจากนั้นความดันจะลดลงทันที ซึ่งหลักการคล้ายกับวิธี steam explosion โดยในกระบวนการ AFEX ปริมาณของแอมโมเนียเหลวที่ใช้จะอยู่ในระดับ 1-2 กรัมแอมโมเนียต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

(2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุด สามารถกำจัดลิกนินได้ดี เนื่องจาก NaOH เป็นเบสแก่ ซึ่งในบางครั้ง NaOH ไม่ได้กำจัดลิกนินออกไปเพียงอย่างเดียว แต่อาจทำลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วนออกไปด้วย ดังนั้นการใช้ NaOH จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับพืชชนิดนั้นๆ ผลผลิตที่ได้จึงจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Wang et al., 2010)

(3) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้น้อยที่สุด แต่เป็นสารที่กำจัดลิกนินได้ดีที่สุด โดยที่ Na_2S จะมีความจำเพาะเจาะจงกับลิกนินเท่านั้น โดยจะไม่มีผลต่อ เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส เหตุผลที่นิยมใช้ Na_2S ก่อนข้างน้อย ก็อาจเนื่องจากกลิ่นของแก๊สไข่เน่าที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายลิกนิน แต่อย่างไรก็ตาม Na_2S ยังคงใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องกำจัดลิกนินออกเท่านั้น เช่น อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในหลายบริษัท เป็นต้น

2.3.3 การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Pretreatment)

เป็นการปรับสภาพวัตถุดิบโดยใช้สารละลายกรด สารละลายด่าง ตัวทำละลายอินทรีย์หรือ สารละลายออกซิแดนท์ (Oxidant reagent) วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อย เซมิเซลลูโลสในกรณีของสารละลายกรด หรือเพิ่มปริมาณการละลายของเซมิเซลลูโลสและ ลิกนินกรณีการใช้สารละลายด่าง นอกจากนี้สารละลายด่างยังช่วยให้เกิดการบวม (swelling) ของ โครงสร้าง ซึ่งเชื่อว่าจะช่วยเพิ่มปริมาณการย่อย เนื่องจากเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น

- การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้กรด (acid hydrolysis)

การปรับสภาพโดยการใช้กรดนั้นมีจุดประสงค์คือ เพื่อให้ได้น้ำตาลในปริมาณที่สูงจาก วัตถุดิบจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส เนื่องจากสามารถเข้าไปทำลายพันธะของโครงสร้างวัตถุดิบได้ดี และนิยมกันอย่างแพร่หลาย เพราะราคาไม่สูงมากนัก ซึ่งชนิดของกรดที่นิยมนำมาปรับสภาพวัตถุดิบ ได้แก่ กรดซัลฟูริก ไฮโดรคลอริก กรดไนตริกหรือกรดฟอสฟอริก แต่การปรับสภาพวัตถุดิบโดยใช้ กรดที่มีความเข้มข้นสูงจะมีอันตรายเพราะมีความเป็นพิษสูง เกิด by product ที่ยับยั้งกระบวนการ หมักของจุลินทรีย์ ดังนั้นการใช้กรดเจือจางจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและสนใจที่จะศึกษากัน แพร่หลายที่สุด (Ballesteros et al., 2008)

- การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้ด่าง (alkaline hydrolysis)

การใช้ด่างเจือจางในวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสจะมีผลทำให้เกิดการบวมภายใน โครงสร้างของ วัตถุดิบ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและเพิ่มความพรุนในการทำปฏิกิริยา โดยที่ความพรุนของ วัตถุดิบจะสามารถเพิ่มขึ้นได้นั้นต้องกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อภายในโครงสร้าง ทำให้ลดความเป็น โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ สามารถแยกสาย โครงสร้างของลิกนิน อย่างไรก็ตามการใช้ด่างเพื่อปรับสภาพมักจะไม่มียผลต่อวัสดุพวกไม้เนื้ออ่อน เท้าไม้เนื้อแข็ง

- การใช้สารออกซิแดนท์ (Oxidant)

สารเคมีที่ใช้ได้แก่ SO_2 และตัวทำละลายชนิดอื่น ๆ ที่สามารถกำจัดลิกนินได้เช่น NaClO_2 , KB_2O_2 , KIO_3 , SO_3 โดยจะมีผลต่อการละลายของลิกนิน วิธีการนี้จะมีปัญหาทางสิ่งแวดล้อมโดยจะ เกิดสาร Lignosulphonate ซึ่งไม่สามารถใช้ในการหมักได้จึงถูกกำจัดออกจากระบบซึ่งเป็นปัญหา เดียวในอุตสาหกรรม Sulphite pulping

2.3.4 การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological Pretreatment)

วิธีการนี้ใช้เอนไซม์จากจุลินทรีย์เพื่อช่วยในการย่อยวัตถุดิบ เช่น ราขาว (White-rot fungi) ราน้ำตาล (Brown-rot fungi) ในการลดเซมิเซลลูโลสและลิกนิน เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างที่ซับซ้อนของ เซลลูโลสให้อยู่ในรูปโซ่ตรงและช่วยลดความเป็นผลึก จุดเด่นของวิธีนี้คือมีการใช้พลังงานต่ำ ไม่ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีจุดด้อยคือมีอัตราการไฮโดรไลซิสต่ำมาก ซึ่งเชื้อราจุลินทรีย์แต่ละชนิด

จะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน บางตัวอาจจะมีผลทำลายเซลล์ด้วย ดังนั้นควรเลือกตัวที่สามารถทำลายเอมิเซลลูโลสและลิกนินเท่านั้น

2.4 การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรไลซิส เป็นการย่อยสลายเซลล์ให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และการย่อยสลายเอมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของน้ำตาลคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม จะได้น้ำตาลไซโลส แมนโนส อะราบิโนส และกลูโคส ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Bosch et al., 2010) ซึ่งการย่อยสลายจะทำให้สายพอลิเมอร์ทั้งเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลสถูกทำให้สั้นลงกลายเป็นน้ำตาลอิสระก่อนที่จะนำไปหมักเป็นเอทานอล ซึ่งในการย่อยสลาย มี 2 กระบวนการหลักๆ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไป

2.4.1 การย่อยด้วยสารเคมี (Chemical Hydrolysis)

สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดเจือจางหรือด่างเจือจาง ซึ่งการย่อยสลายด้วยกรดหรือด่าง โดยจะทำลายพันธะไกลโคซิดิกระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจนอะตอม ส่วนใหญ่การย่อยสลายแบบนี้ต้องการสภาวะที่รุนแรง

1. การย่อยสลายด้วยกรด อาจแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการคือ

ก. กระบวนการแบบโฮโมจีนัส (Homogeneous Process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) หรือกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) ผลลัพธ์ที่ได้ส่วนใหญ่คือ น้ำตาลกลูโคส แต่มีข้อเสียคือ ต้องมีการแยกกรดที่ใช้ออกจากน้ำตาลก่อนนำไปใช้ และเรื่องการสึกกร่อนของเครื่องมือรวมทั้งปัญหาการสูญเสียกรดไปกับส่วนที่ไม่ถูกย่อยสลาย

ข. กระบวนการย่อยแบบเฮเทอโรจีนัส (Heterogeneous Process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดอ่อนกว่า แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส ผลการย่อยคือ เซลลูโลสยังมีโครงสร้างของเส้นใยอยู่ (fibrous structure) วิธีการนี้จะไม่สามารถนำกรดกลับมาใช้ใหม่ แต่จะถูกทำให้เป็นกลางด้วยปูนขาว หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (รัตติยาธร, 2550)

วิธีการย่อยด้วยกรดมี ข้อดี - ข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยกรด

ผลดี	ผลเสีย
1. ปฏิกิริยาเกิดเร็ว ง่าย และสั้น	1. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่เจาะจงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่บริสุทธิ์
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ราคาถูกและหาง่าย	2. ต้องใช้อุณหภูมิสูง (กรณีใช้กรดอ่อน)
3. ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิ (กรณีใช้กรดแก่)	3. น้ำตาลที่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นสารอื่น เช่น เฟอฟูรัล และสารเคมีอื่นๆ

ผลดี	ผลเสีย
4. ให้ผลิตภัณฑ์สูง(กรณีใช้กรดแก่)	4. ผลพลอยได้ของปฏิกิริยาการย่อยด้วยกรด เช่น เฟอฟูรัล เป็นต้น

ที่มา : ะระวีวรรณ แก้วกล้า, 2537 อ้างถึงใน เกศมณี และคณะ, 2545

1 .การย่อยด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis)

สารละลายที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง เอทิลีนไดอะมีน (ethylene diamine) และแอมโมเนีย (ammonia) เป็นต้น การใช้สารละลายด่างในการย่อยจะทำให้สายของโพลีแซคคาไรด์สั้นลง ปฏิกิริยานี้จะเกิดในสภาพอุณหภูมิสูงประมาณ 160 ถึง 180 องศาเซลเซียส และต้องการออกซิเจนในปริมาณเล็กน้อยซึ่งใช้ในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส

การย่อยสลายด้วยสารเคมีนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่เฉพาะเจาะจงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่บริสุทธิ์ ผลิตภัณฑ์บางส่วนเปลี่ยนไปเป็นสารอื่นเช่นเฟอฟูรัล (Furfural) และไฮดรอกซิลเมทิลเฟอฟูรัล (Hydroxyl methyl furfural) ซึ่งเป็นสารที่ไม่ใช่น้ำตาลที่ต้องการและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตเอทานอล

2.4.2 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis)

เอนไซม์ที่ใช้ในการปรับสภาพหรือการย่อยสลาย (hydrolysis) ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ เอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ซึ่งมีความจำเพาะสูง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสจะเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส ซึ่งในด้านค่าใช้จ่ายโดยการใช้เอนไซม์จะต่ำกว่าการใช้กรดหรือเบสเนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงปัญหาจากการกัดกร่อน โดยเอนไซม์เซลลูเลสสามารถผลิตได้จากแบคทีเรียและเชื้อรา โดยปกติในกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยเอนไซม์เซลลูเลส ประกอบด้วยการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส 3 กลุ่ม คือ

- (1) endoglucanase (EG, endo-1,4-D-glucanohydrolase หรือ EC 3.2.1.4) เอนไซม์ในกลุ่มนี้เป็นเอนไซม์ที่เข้าทำปฏิกิริยาในบริเวณที่มีลักษณะเป็นผลึกต่ำของเซลลูโลส
- (2) exoglucanase หรือ cellobiohydrolase (CHB, 1,4-β-D-glucan cellobiohydrolase หรือ EC 3.2.1.91) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยเซลลูโลสให้เป็นเซลโลไบโอส (cellobiose)
- (3) β-glucosidase (EC 3.2.1.21) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยเซลโลไบโอสเป็นกลูโคส

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

1. อุณหภูมิ

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่สำคัญคืออุณหภูมิ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดได้ต้องอาศัยความร้อนเพื่อทำให้น้ำเข้าทำลายพันธะของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสคือ 180 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการ

ไฮโดรไลซิสเซลลูโลสคือ 250 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะมีผลทำให้น้ำตาลที่ไฮโดรไลซิสออกมาได้ถูกทำลายไป แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะมีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสมีปริมาณน้อยมาก (นันทิษา และคณะ, 2554)

2. ความดัน

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

3. ความเข้มข้นของสารละลายกรด

ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต้องอาศัยสารละลายกรดเจือจางเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้นและเกิดได้มากขึ้น เนื่องจากถ้าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยและช้ากว่าการมีตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้สารละลายกรดเจือจางที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะมีผล ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่ความเข้มข้นของสารละลายกรดที่ควรใช้คือ 0.5 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรเท่านั้น ถ้าใช้มากกว่านี้อาจจะกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์ได้ และมีผลทำลายน้ำตาลที่ได้อีกด้วย กรดที่นิยมใช้ เช่น กรดอะซิติก กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น

4. เวลา

ถ้าเพิ่มเวลาในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้มากขึ้น ปริมาณน้ำตาลที่ได้ออกมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็จะมากตามไปด้วย เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถูกทำลายพันธะมากขึ้น

5. พื้นที่ผิว

ขนาดของเปลือกกล้วยที่เป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีผลต่อปริมาณน้ำตาลที่ได้ เนื่องจากขนาดของเปลือกกล้วยยิ่งเล็กก็ยิ่งมีผลทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้นและปริมาณน้ำตาลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

2.5 กล้วย

ชื่อสามัญ	กล้วยน้ำว้า (Pisang Awak)
ชื่อวงศ์	Musaceae
ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Musa sapientum</i> L.
ชื่ออื่น	กล้วยมะลิอ่อง (จันทบุรี) กล้วยใต้ (เชียงใหม่, เชียงราย) กล้วยอ่อง (ชัยภูมิ) กล้วยตานีอ่อง (อุบลราชธานี)

2.5.1 องค์ประกอบทั่วไป

กล้วยน้ำว้าเป็นพืชที่คนส่วนใหญ่รู้จักดีมากที่สุด เพราะสามารถใช้ได้ทุกส่วนของต้น ผลสามารถใช้รับประทานผลสุกและประกอบอาหารได้มากมาย รวมทั้งผลิตภัณฑ์ส่งขายภายในประเทศ และต่างประเทศ กล้วยน้ำว้าสามารถผลิตออกสู่ตลาดได้ตลอดทั้งปี พื้นที่เพาะปลูกกล้วยน้ำว้าปี 2551/52 มีประมาณ 686,937 ไร่ ผลผลิต 1,115,101 ตัน ทั้งพื้นที่เพาะปลูก และผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.4 และ 0.06 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา สำหรับแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญ ได้แก่ ชุมพร เลย ระนอง นครราชสีมา และหนองคาย ราคาที่เกษตรกรขายได้เฉลี่ยในช่วง 7 เดือนแรกของปี 2552 อยู่ที่ 5.4 บาท/กิโลกรัม สูงขึ้นกว่าปีที่แล้วที่มีราคาขายเฉลี่ยอยู่ที่ 5.0 บาท/กิโลกรัม (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย, 2553) ถ้าหากมีการปรับปรุงคุณภาพให้ดีกว่าเดิม และมีการเพิ่มปริมาณผลผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาด จะสามารถทำรายได้ให้ประเทศได้มากขึ้น

2.5.2 ส่วนประกอบทางกายภาพของกล้วย

ผลกล้วยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ส่วนที่กินได้ และ 2) ส่วนที่กินไม่ได้ คือเปลือกกล้วย เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ยังไม่มีการนำเอามาใช้อย่างจริงจัง สามารถนำเอามาประกอบเป็นอาหารสัตว์ได้ ทั้งสัตว์ปีกและสุก

2.5.3 ลักษณะทั่วไปของพืช

กล้วยน้ำว้าเป็นพืชล้มลุกขนาดใหญ่ สูงประมาณ 2-5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร ก้านใบมีร่องค่อนข้างแคบ เส้นกลางใบสีเขียว ก้านช่อดอกไม่มีขน ใบประดับรูปไข่ค่อนข้างป้อม ม้วนงอขึ้นปลายป้าน ด้านบนสีแดงอมม่วงมีนวล ด้านล่างสีแดงเข้ม ผลและเปลือกหนากว่ากล้วยไข่ กล้วยน้ำว้าเมื่อสุกเปลือกจะเปลี่ยนสีเหลืองปนน้ำตาล เนื้อสีขาว รสหวานที่แกนกลางหรือ เรียกว่าไส้กลาง มีสีเหลือง ชมพู หรือขาว ซึ่งทำให้แบ่งออกได้เป็น กล้วยน้ำว้าเหลือง กล้วยน้ำว้าแดงและกล้วยน้ำว้าขาว กล้วยน้ำว้าจะใช้ระยะเวลาการปลูกถึงเก็บเกี่ยวผลไม่ ระยะเวลาประมาณ 1 ปี จำนวน 10 หัวต่อเครือ ตั้งแต่ปลูกจนถึงแทงปลีใช้ระยะเวลา 250-260 วัน แทงปลีถึงระยะเก็บเกี่ยว 110-120 วัน ชอบอากาศร้อน ชื้นและอบอุ่น อุณหภูมิที่เหมาะสมไม่ควรต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 35 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต่ำทำให้กล้วยแทงปลี (การออกดอก) ช้า ควรมีความชื้นสัมพัทธ์อย่างน้อย 60% ปริมาณฝนตกเฉลี่ย 200-220 มิลลิเมตรต่อเดือน ส่วนดินที่เหมาะสมควรเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ การระบายน้ำดีและหมุนเวียนอากาศดี มีความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ระหว่าง 4.5-7 แต่ที่ดีควรอยู่ในระดับ 6 กล้วยน้ำว้าปลูกทั่วไปในประเทศไทย กินกันมากในทุกๆภาค ปลูกเป็นการค้าทั่วไปในภาคกลาง ภาคเหนือปลูกมากในจังหวัดพิษณุโลก ซึ่ง จะพบทั่วไป ในพื้นที่แถบเอเชีย แต่ถ้าพื้นที่นั้นมีอากาศร้อนยาวนาน แต่มีการชลประทานที่ดี คือ มีน้ำสม่ำเสมอจะสามารถปลูกกล้วยได้ดี และให้ผลผลิตสม่ำเสมอ

2.5.4 เปลือกกล้วย

เปลือกกล้วยมีโปรตีน คิดจากน้ำหนักแห้งประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ มีไขมันคิดจากน้ำหนักแห้งประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ จากส่วนประกอบทางเคมีดังกล่าวเปลือกกล้วยน่าจะเหมาะสำหรับเลี้ยงสัตว์ทุกชนิด ทั้งสัตว์กระเพาะเดี่ยวและสัตว์กระเพาะรวม แม้จะมีระดับโปรตีนค่อนข้างต่ำ แต่มีไขมันมากทำให้สามารถให้พลังงานแก่สัตว์มาก นอกจากนั้น เปลือกกล้วยน่าจะย่อยได้มากเพราะมีเยื่อใยอยู่น้อย (ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์)

ในปัจจุบันมีการนำกล้วยมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ทำให้มีเปลือกกล้วยเหลือทิ้งปริมาณมาก เกษตรกรที่อยู่ใกล้แหล่งดังกล่าว อาจจะใช้เปลือกกล้วยเป็นอาหารหลักเลี้ยงโค-กระบือ และสุกรกรณีมีเปลือกกล้วยเหลือทิ้งในแต่ละวัน เกษตรกรอาจจะนำเปลือกกล้วยมาหมักร่วมกับหญ้าสด หรืออาหารหยาบอื่นๆ เก็บไว้เลี้ยงสัตว์ในฤดูแล้งจะได้ อาหารหมักที่มีความน่ากิน และมีคุณค่าทางอาหารเหมาะสำหรับเลี้ยงสัตว์

2.5.5 ส่วนประกอบทางกายภาพและทางโภชนาการของกล้วยและเปลือกกล้วย

กล้วยและผลิตภัณฑ์ของกล้วยนอกจากใช้เป็นอาหารมนุษย์แล้ว ผลผลิตและผลพลอยได้ยังสามารถนำมาเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ได้ โดยเฉพาะส่วนลำต้นเทียม และก้านใบ จากการวิเคราะห์ส่วนใบและลำต้นเทียมของต้นกล้วยพบว่า ส่วนของใบสดและลำต้นสดและสภาพหมักนั้นมีโปรตีนสูง (Dividch et al., 1976) รายงานถึงส่วนประกอบทางเคมีของผลกล้วยแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีเป็นเปอร์เซ็นต์ของกล้วยดิบและกล้วยสุกในสภาพแห้ง

ส่วนประกอบ	กล้วยดิบ (%air-dry basis)	กล้วยสุก (%air-dry basis)
วัตถุแห้ง	88.8	91.3
โปรตีน	6.4	5.3
ไขมัน	-	-
เยื่อใย	3.7	3.8
เถ้า	4.6	5.2
แป้ง	72.3	3.4
น้ำตาล	1.8	73.6

ที่มา : Dividch et al. (1976)

สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยซึ่งอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและตากแดด และผลการวิเคราะห์เปลือกกล้วยดิบและเปลือกกล้วยสุกอบแห้ง แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบ โภชนะทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้า

ส่วนประกอบ	เปลือกกล้วยอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (%air-dry basis)	เปลือกกล้วยตากแห้งโดยการ ตากแดด (%air-dry basis)
วัตถุแห้ง	84.59	96.41
โปรตีน	6.55	8.37
ไขมัน	8.50	6.03
เยื่อใย	10.25	15.99
เถ้า	11.95	12.05
ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก	62.65	52.69
แคลเซียม	0.41	-
ฟอสฟอรัส	0.22	-

ที่มา: ฉัตติยา, 2553

ฉัฐิมา และ คณะ (2539) รายงานถึงองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ ห้าม และ สุก พบว่าเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกโปรตีนต่ำที่สุด ส่วนองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆใกล้เคียงกันและเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบที่มีไขมันต่ำที่สุดดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบ ห้ามและสุก

ส่วนประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้า	เปลือกกล้วยน้ำว้า (เปอร์เซ็นต์)		
	ดิบ	ห้าม	สุก
ความชื้น ¹	8.38	7.72	4.01
โปรตีน ¹	5.19	6.61	4.77
ไขมัน ¹	10.66	14.20	14.56
เยื่อใย ¹	11.58	11.10	11.95
เถ้า ¹	16.30	14.27	0.36
แคลเซียม ²	3.37	0.38	0.23
พลังงานรวม ¹ (กิโลแคลอรี/กิโลกรัมวัตถุแห้ง)	4382.60	4691.81	4591.73
แทนนิน ²	6.8	4.97	4.69

การหาเปอร์เซ็นต์ของวัตถุแห้ง (Dry matter) คำนวณจากน้ำหนักสด

หมายเหตุ: ¹วิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการอาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²วิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ข้อมูลเพิ่มเติมจาก : FAO Feed Information Summaries and Nutritive Value. (1981)

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสในเปลือกกล้วยน้ำว้า

องค์ประกอบ	% of wet weight ของเปลือกกล้วย
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSs)	14.53-17.12
ความชื้น	82.47-86.21
สารประกอบอินทรีย์ (% TSs)	
เฮมิเซลลูโลส	12.57±1.41
เซลลูโลส	15.48±0.24
ลิกนิน	11.48±1.67
โปรตีน	6.41±0.43
แป้ง	32.75±0.21

ที่มา: ดัดแปลงจาก ฉัตติยา (2553)

2.5.6 ประโยชน์ของกล้วยน้ำว้า

การใช้ประโยชน์จากเปลือกกล้วยน้ำว้าในปัจจุบันคือ เป็นอาหารสัตว์ การใช้ประโยชน์ด้านเพื่อความงาม เช่น ใช้ขัดถูบริเวณข้อศอก เข่า เพื่อป้องกันความหยาบกระด้าง ใช้ทาบริเวณยุ้งก้นหรือมดกัด แก่ผื่น คัน (เบญจมาศ, 2538) นอกจากนี้ เปลือกกล้วยยังมีแทนนิน ซึ่งเป็นสารประกอบ โพลีฟีนอลที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร และมีนักวิจัยให้ความสำคัญและศึกษาการสกัดแทนนินจากเปลือกกล้วย ซึ่งจากกระบวนการศึกษาพบว่า หากนำมาผลิตในเชิงอุตสาหกรรมไม่คุ้มทุน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขวัญสุดา (2549) ทำการศึกษาการย่อยชานอ้อยด้วยวิธีทางเคมีเพื่อการผลิตเอทานอล 3 ขั้นตอนคือ การกำจัดลิกนินด้วยด่าง การย่อยเฮมิเซลลูโลสด้วยกรดอ่อนและการย่อยเซลลูโลสด้วยกรดแก่ พบว่าสภาวะที่เลือกใช้ในการย่อยเฮมิเซลลูโลสจากชานอ้อยเพื่อเตรียมวัตถุดิบสำหรับการย่อยเซลลูโลส คือ การย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ซึ่งเป็นภาวะที่ให้ผลของความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลห้าคาร์บอนเฉลี่ย 22.07 และ 32.60 กรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 0.31 และ 0.45 กรัม น้ำตาลต่อกรัม ชานอ้อย ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยเฮมิเซลลูโลสด้วยกรดไฮโดรคลอริกมากที่สุดคือ อุณหภูมิ และปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมาคือ ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ ส่วนเวลาที่ใช้ในการย่อยไม่มีอิทธิพลต่อการย่อยชานอ้อยอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นนำชานอ้อยที่กำจัดลิกนินและย่อยเฮมิเซลลูโลสแล้วมาย่อยเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริก 5% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที ซึ่งให้ผลของความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ย 11.43 กรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 0.22 กรัมของน้ำตาลต่อกรัมชานอ้อย

ดรณวรรณ และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวส์ด้วยกรดเจือจาง โดยปัจจัยที่ศึกษา คือความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 2-10 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 30-90 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการไฮโดรไลซิส 15-75 นาทีและจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่มีความเหมาะสม คือที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 4% อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ 24.3 กรัมต่อลิตร

ณัฐดา (2553) ได้ทำการศึกษาปัจจัยการแปลงไม้ไผ่ให้เป็นกลูโคสโดยกระบวนการปรับสภาพทำที่อุณหภูมิคงที่คือ 140 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของกรด 0.4, 0.6, 1.0, 1.4 และ 1.6 % w/w และเวลา 45, 60, 90, 120 และ 135 นาที ส่วนกระบวนการไฮโดรไลซิสใช้เอนไซม์เซลลูเลส และเบต้ากลูโคซิเดส ที่ pH 4.8 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุน 150 รอบต่อวินาที เวลาที่ใช้คือ 12, 48 และ 72 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำตาลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปัจจัยทั้งความเข้มข้นของกรดและเวลา ซึ่งวัตถุดิบที่ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ หน่อไม้ไผ่ไผ่อ่อน และไม้ไผ่แก่ ตามลำดับ กล่าวคือหน่อไม้ที่ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 34.50 mg/ml (135 นาที, 1.0 %w/w) ไม้ไผ่อ่อนได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 25.83 mg/ml (120 นาที, 1.4 %w/w) และไม้ไผ่แก่ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 17.88 mg/ml (135 นาที, 1.0 %w/w) ตามลำดับ และปริมาณน้ำตาลไซโลสพบว่าวัตถุดิบที่ให้ปริมาณมากที่สุดคือ ไม้ไผ่อ่อน ไม้ไผ่แก่ และหน่อไม้ ตามลำดับ กล่าวคือไม้ไผ่อ่อนได้ปริมาณไซโลสมากที่สุดคือ 16.91 mg/ml (90 นาที, 1.6 %w/w) ไม้ไผ่แก่ได้ปริมาณไซโลสมากที่สุดคือ 11.66 mg/ml (90 นาที, 1.0 %w/w) และหน่อไม้ได้ปริมาณไซโลสมากที่สุดคือ 9.42 mg/ml (90 นาที, 1.6 %w/w) ตามลำดับ และจากการศึกษาจากกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์พบว่าผลมีความสอดคล้องกับกระบวนการปรับสภาพ คือสภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลน้อยจากการปรับสภาพด้วยกรดเจือจาง เมื่อผ่านขั้นตอนการไฮโดรไลซิสทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางทำให้การทำงานของเอนไซม์ดีขึ้นและทั้งนี้เอนไซม์จะสามารถทำงานได้ดีขึ้นเมื่อมีการปรับสภาพในระดับความรุนแรงที่เหมาะสมต่อวัตถุดิบนั้น

พรวิวิห์ และคณะ (2549) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลเซลลูโลส เพื่อหาปริมาณน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย โดยวิธีการไฮโดรไลต์ด้วยกรดซัลฟิวริกโดยศึกษาอุณหภูมิ และระยะเวลา โดยสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลสเปลือกกล้วยน้ำว้า คือ ที่ระดับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 4% ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที โดยมีค่าความเข้มข้น 11.83 เปอร์เซ็นต์ brix

แพรวพรรณ และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการแยกส่วนเฮมิเซลลูโลสจากขานอ้อยและความร้อนให้ได้ปริมาณน้ำตาลต่อน้ำหนักขานอ้อยสูงสุด โดยได้ทดลองย่อยขานอ้อยซ้ำ 3 รอบด้วยกรดซัลฟิวริก 1% และ 2% ที่อุณหภูมิ 140 และ 170 องศาเซลเซียส เวลาที่ย่อยอยู่ในช่วง 15-120 นาที ผลการทดลองจากการย่อยขานอ้อยด้วยกรดซัลฟิวริก 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ที่

อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยคือ การย่อยด้วยกรด 2% ให้ปริมาณสูงสุดที่เวลา 90 นาที ซึ่งคิดเป็น 214 ± 59 มิลลิกรัมน้ำตาลต่อชานอ้อย และได้ทำการทดลองย่อยชานอ้อยที่สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุดคือการใช้กรดซัลฟิวริก 2% ใช้เวลาในการย่อย 45 นาที คิดเป็น 171 ± 62 มิลลิกรัมน้ำตาลต่อชานอ้อย ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ได้ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรดย่อยที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และในทุกเวลาที่ใช้ในการย่อยด้วยกรดทั้งสองความเข้มข้นพบว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าสูงสุดในการย่อยครั้งที่ 1 และนอกจากนั้นยังพบว่าการเพิ่มปริมาตรการย่อยชานอ้อยทำให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการย่อยทั้ง 2 อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรการย่อยจาก 100 มิลลิลิตรเป็น 200 มิลลิลิตร แต่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตรการย่อยสูงกว่า 200 มิลลิลิตร และพบว่าการกวนมีผลต่อการทำงานของกรดที่สามารถผสมกับชานอ้อยและช่วยในการย่อยทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น

มณิษา (2555) ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการปรับสภาพผักตบชวาทางกายภาพร่วมกับเคมี โดยนำผักตบชวาที่ผ่านการอบแห้งปริมาณ 200 กรัมมาต้มด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 โดยปริมาตร ปริมาณ 2000 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที พบว่าปริมาณเฮมิเซลลูโลสในผักตบชวามีค่าลดลงจาก 24.14 ± 0.25 เหลือเท่ากับ 19.90 ± 0.32 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และปริมาณเซลลูโลสในผักตบชวาลดลงจาก 49.83 ± 0.73 เหลือเท่ากับ 49.45 ± 0.61 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง จากการต้มผักตบชวากับกรดซัลฟิวริกเจือจาง ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 19.42 ± 2.17 มิลลิกรัมต่อกรัมผักตบชวาแห้ง

รัชพล (2554) ได้ทำการศึกษาการเตรียมไฮโดรไลสจากผักตบชวาโดยใช้หม้อนึ่งไอน้ำ คือการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับการปรับสภาพทางเคมีในการปรับสภาพเพื่อแยกกลีซินออกจากผักตบชวาใช้ 3 วิธีที่แตกต่างกัน คือแช่ด้วยน้ำเปล่า แช่สารละลายต่างและแช่สารละลายกรด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถกำจัดกลีซินและไม่ทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูญเสียไปคือ สภาวะที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงเป็นวิธีปรับสภาพที่ดีที่สุดพบว่าได้เซลลูโลสร้อยละ 47.38 โดยน้ำหนัก และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 23.16 โดยน้ำหนักและปริมาณกลีซินเหลืออยู่เพียงร้อยละ 3.71 โดยน้ำหนัก

รัตติยาธร (2550) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากมันสำปะหลังโดยการฉายรังสีแกมมาตามด้วยการย่อยสลายด้วยกรด โดยใช้หัวมันสำปะหลังเป็นตัวอย่างสำหรับงานวิจัยและแบ่งการย่อยสลายโมเลกุลแป้งดิบมี 2 วิธี คือการย่อยสลายด้วยกรดไนตริก หรือ กรดไฮโดรคลอริก และการย่อยสลายด้วยรังสีร่วมกับกรดไนตริกหรือกรดไฮโดรคลอริก ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายมันสำปะหลัง คือ การฉายรังสีแกมมาที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกและไฮโดรคลอริก 0.7 M ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เป็นสภาวะที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงสุดร้อยละ 84.6 โดยน้ำหนัก

วรรณิ และวิชัย (2546) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการไฮโดรไลซิสเพื่อสกัดน้ำตาลจากฟางข้าว โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1% 5% และ 10% โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่มีความเหมาะสมในการไฮโดรไลซิสฟางข้าวให้เป็นน้ำตาล โดยได้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด คือ 1% และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุด คือ 8 ชั่วโมง โดยปริมาณน้ำตาลต่อน้ำหนักฟางข้าวที่ได้เท่ากับ 90 $\mu\text{g/g}$

เหรียญทอง และคณะ (2554) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตเซลลูโลสจากเปลือกกล้วยโดยใช้เปลือกกล้วยสุก 3 ระยะคือ เปลือกกล้วยสุกระดับ 5 , 6 และ 7 และพบว่าเปลือกกล้วยสุกระดับ 5 ให้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุด การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกกล้วยใช้ แอลกอฮอล์ ค้าง และฟอกสี จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยแอลกอฮอล์ คือ เอทานอล 95% เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่สภาวะต่างใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอช 12 เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกสี ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 15% ระยะเวลา 12 ชั่วโมง

Zhu et al. (2011) ทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวิสจากกากถั่วโดยการไฮโดรไลซิสในน้ำกึ่งวิกฤตและผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาสัมผัส และคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อการเกิดน้ำตาลรีดิวิสจากการศึกษาพบว่าในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดการไฮโดรไลซิส นอกจากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มการเกิดน้ำตาลรีดิวิส ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเกิดน้ำตาลรีดิวิสได้สูงสุด คือ 65% ที่ 300 องศาเซลเซียส และเวลา 360 วินาที

Lloyd and Wyman (2005) ได้ศึกษาการปรับสภาพของเปลือกข้าวโพดด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับกรดเจือจาง ใช้กรดในช่วงความเข้มข้นของ(กรดซัลฟิวริก) 0.22%, 0.49%, และ 0.98% w/w ที่อุณหภูมิ 140, 160, 180 และ 200 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าน้ำตาลกลูโคสเพิ่มสูงสุด 56% ของปริมาณน้ำตาลรวม ปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสม คือ 60% เมื่อ glucose ถูกปล่อยออกมา ระหว่างการปรับสภาพรวมกับปริมาณ ไซโลส จะได้น้ำตาลสูงสุด 34% ของปริมาณน้ำตาลรวม

Singh et al. (1984) ได้ทำการศึกษาผลผลิตของน้ำตาลรีดิวิสจากชานอ้อยและแกลบโดยใช้กรดในการไฮโดรไลซิส พารามิเตอร์ที่ศึกษาในกระบวนการไฮโดรไลซิส คือ สัดส่วนของแข็งต่อของเหลว, ขนาดอนุภาค, ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของกรด จากการศึกษาพบว่าการใช้กรดซัลฟิวริกดีกว่ากรดไฮโดรคลอริก ซึ่งความเข้มข้นที่ใช้คือ 75% โดยน้ำหนัก แห้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:12 ขนาดอนุภาคจะใช้น้อยกว่า 417 ไมโครเมตร สำหรับการไฮโดรไลซิสระยะเวลาที่ใช้ให้ความร้อนเวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หลังเจือจางด้วยน้ำ 3 เท่า ที่สภาวะดังกล่าว จะทำให้ได้การไฮโดรไลซิสมากถึง 78 % ในขณะที่การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้ผลผลิตเท่ากับ 78% ของชานอ้อยและ 74% ของแกลบ นอกจากนี้วัตถุดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จะได้ผลผลิตเท่ากับ 58% และ 49.5% สำหรับชานอ้อยและแกลบ

Sun and Cheng (2005) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเอทานอล จากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส พวกหญ้าแห้ง และ Bemuda grass เนื่องจากพืชเหล่านี้ประกอบด้วยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในปริมาณที่สูง นำไปผลิตเอทานอลได้ โดยปรับสภาพวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการโดยใช้กรดเจือจาง หาค่าสภาวะที่เหมาะสมตั้งแต่ 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.5% ของซัลฟิวริกเข้มข้น ที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที โดยอัตราของแข็งที่ได้มีค่า 10% และถูกปรับสภาพที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรด และเวลาที่ทำปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของน้ำตาลกลูโคส

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1. สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก 37% (HCl), AR grade, Carlo Erba
2. กรดซัลฟิวริก 96% (H₂SO₄), AR grade, Carlo Erba
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), AR grade, Carlo Erba
4. อะซิโตน (C₃H₆O), AR grade, Carlo Erba
5. แอนไฮดรัส โซเดียมซัลไฟต์ (Na₂SO₃ anhydrous), AR grade, Rankem
6. โซเดียมลอริลซัลเฟต, AR grade, Carlo Erba
7. ไดโซเดียมเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิเตต (EDTA), AR grade, Carlo Erba
8. โซเดียมบอเรตเดคาไฮเดรต (Na₂B₄O₇.10H₂O), AR grade, Carlo Erba
9. แอนไฮดรัส ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na₂HPO₄ anhydrous), AR grade, Rankem
10. เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB), AR grade, Acros
11. ดี-กลูโคส (C₆H₁₂O₆), AR grade, Carlo Erba
12. กรดไดไนโตรซาลิซิลิกแอซิด (3,5-dinitrosalicylic), AR grade, Carlo Erba
13. โพแทสเซียมโซเดียมทราเทรต (KNaC₄H₄O₆), AR grade, Carlo Erba
14. ไตรเอทิลีนไกลคอล (C₆H₁₄O₄), AR grade, Acros

2. อุปกรณ์

1. เครื่องกรองสุญญากาศ Tokyo rikakikai
2. เตาเผา Nabertherm
3. ตู้อบ Memmert
4. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง Thermo scientific
5. เครื่องชั่งแบบละเอียด Shimadzu
6. โถดูดความชื้น

3.2 วัตถุประสงค์และการเตรียมตัวอย่าง

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย คือ เปลือกกล้วยน้ำว้า ที่เหลือจากการทำกล้วยทอด นำมาล้างด้วยน้ำเปล่าให้สะอาดและตากแดดให้แห้งบดด้วยเครื่องบดให้ละเอียด จากนั้นร่อนตัวอย่างที่บดแล้วผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช โดยตัวอย่างจะมีขนาด 1 มิลลิเมตร อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาวางทิ้งไว้ในเคซิเคเตอร์จนเย็น เก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิด และเอาใส่ไว้ในเคซิเคเตอร์ เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกกล้วย

เปลือกกล้วยในหัวข้อที่ 3.2 จะนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังตารางที่

3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ไฮโดรไลสของเปลือกกล้วย

พารามิเตอร์	วิธีการ/ เครื่องมือ
ปริมาณองค์ประกอบเยื่อใย*	Detergent method (Van Soest, 1967) (รายละเอียดวิธีการดังแสดงในภาคผนวก ก)
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	3,5-Dinitrosalicylic acid Method (DNS) (Miller 1959) (รายละเอียดวิธีการดังแสดงในภาคผนวก ก)
โครงสร้างทางกายภาพ	กล้องอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง(Scanning electron microscope, SEM)

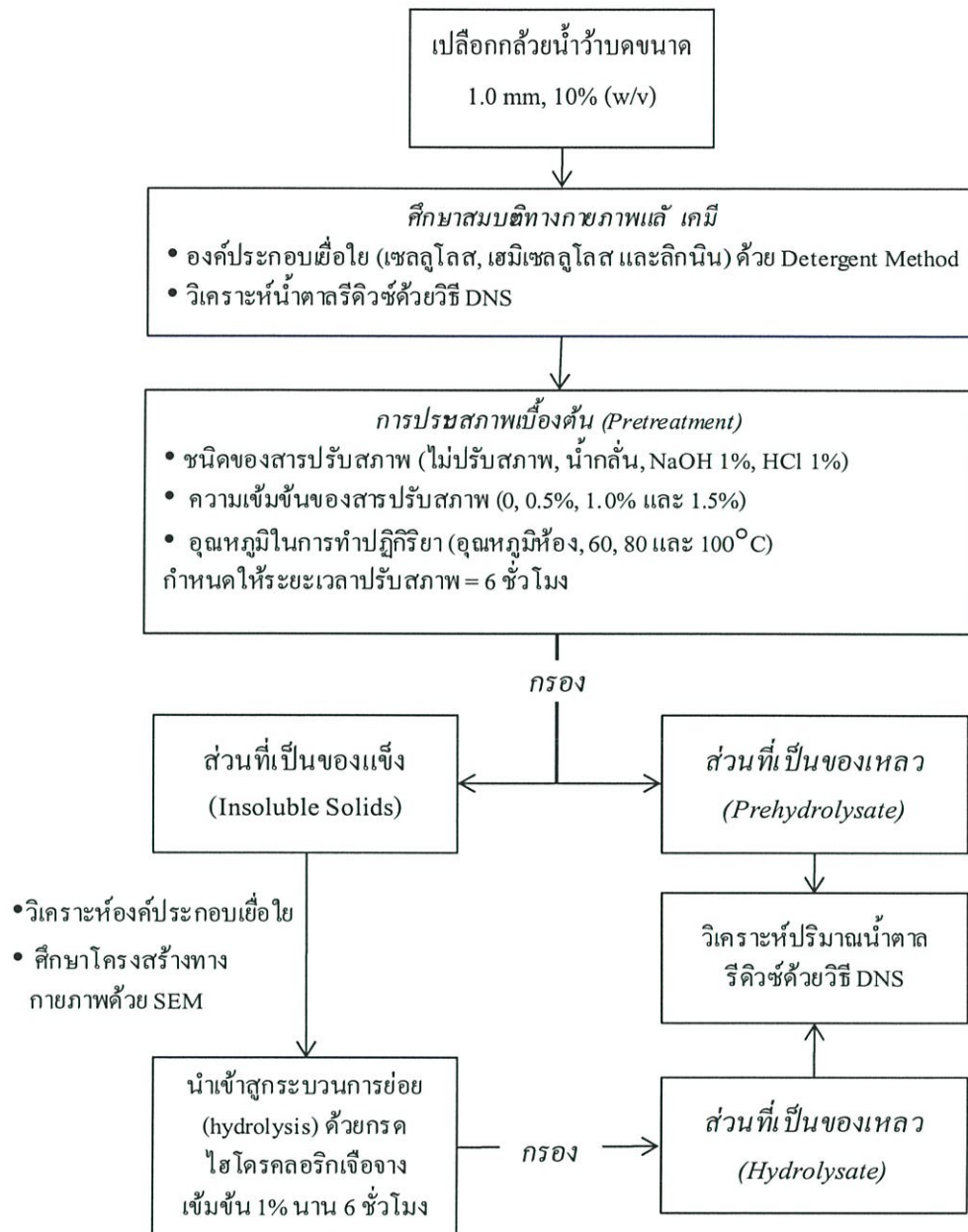
*องค์ประกอบเยื่อใยที่วิเคราะห์ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี และหาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลให้เกิดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (hydrolysate) สูงสุด เพื่อนำไปใช้การผลิตไบโอเอทานอลต่อไป โดยมีแผนการดำเนินงานวิจัยเป็นดังรูปที่ 3.1

3.4.1 การศึกษาผลของชนิดสารเคมีปรับสภาพต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย

1. ซังเปลือกกล้วยที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างในข้อ 3.2
2. เติมน้ำกลั่นในอัตราส่วนเปลือกกล้วยต่อสารปรับสภาพ 1:30 และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายไปกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

4. นำส่วนที่เป็นของเหลว (prehydrolysate) ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS

5. นำส่วนที่เป็นของแข็ง (insoluble solids, IS) ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเยื่อใย (เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ด้วยวิธี Detergent method ศึกษาโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (และนำไปย่อยเพื่อผลิตไฮโดรไลเซตด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% รายละเอียดวิธีดังแสดงในหัวข้อ 3.5)

6. ทำซ้ำ แต่เปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพในข้อ 2 จากน้ำกลั่น เป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% และกรดไฮโดรคลอริก 1% ตามลำดับ

3.4.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารปรับสภาพต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย

1. ชั่งเปลือกกล้วยในข้อ 3.2
2. เติมสารปรับสภาพที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.1 ความเข้มข้นเท่ากับ 1% ในอัตราส่วนเปลือกกล้วยต่อสารปรับสภาพเท่ากับ 1:30
3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองสารละลายแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนที่เป็นของเหลว (prehydrolysate) ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ด้วยวิธี DNS
6. นำส่วนที่เป็นของแข็ง (insoluble solids, IS) ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเยื่อใย (เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ด้วยวิธี Detergent method ศึกษาโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (และนำไปย่อยเพื่อผลิตไฮโดรไลเสทด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% รายละเอียดวิธีดังแสดงในหัวข้อ 3.5)
7. ทำซ้ำ แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารปรับสภาพจาก 1% เป็น 0.5% และ 1.5% ตามลำดับ

3.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย

1. ชั่งเปลือกกล้วยในข้อ 3.2
2. เติมสารปรับสภาพที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.2 ในอัตราส่วนเปลือกกล้วยต่อสารปรับสภาพเท่ากับ 1:30
3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำไปต้มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
5. กรองสารละลายแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
6. นำส่วนที่เป็นของเหลว (prehydrolysate) ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ด้วยวิธี DNS
7. นำส่วนที่เป็นของแข็ง (insoluble solids, IS) ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเยื่อใย (เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ด้วยวิธี Detergent method ศึกษาโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (และนำไปย่อยเพื่อผลิตไฮโดรไลเสทด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% รายละเอียดวิธีดังแสดงในหัวข้อ 3.5)

8. ทำซ้ำ แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของการปรับสภาพจาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.5 การเตรียมไฮโดรไลเสทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ

เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพในหัวข้อ 3.4.1 – 3.4.3 จะนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% โดยมีรายละเอียดวิธีการดังนี้

1. ชั่งเปลือกกล้วยที่ผ่านการอบแห้งของขั้นตอนที่ 3.4.1-3.4.3
2. เติมน้ำละลายกรดไฮโดรคลอริก 1% ในอัตราส่วน 1:30
3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองแบบลดความดันโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
5. นำส่วนที่เป็นของเหลว (hydrolysate) ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วยด้วยวิธีทางกายภาพร่วมกับวิธีทางเคมี พร้อมกับศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อย (hydrolysis) ได้แก่ ชนิดของสารเคมีปรับสภาพ ความเข้มข้นของสารปรับสภาพ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1 องค์ประกอบทางเคมีในเปลือกกล้วยน้ำว้า

เปลือกกล้วยที่ใช้ในการศึกษาเป็นเปลือกกล้วยน้ำว้าที่เก็บรวบรวมจากร้านขายกล้วยทอดเมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยที่ศึกษาเทียบกับเปลือกกล้วยจากงานวิจัยอื่น

สมบัติ	ค่าที่วัดได้		นัตติยา (2553)
	ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา 1 ⁺	2 ⁺	
ความชื้น (%dry basis)	ND	ND	82.47-86.21
องค์ประกอบเยื่อใย			
- เซลลูโลส (%)	28.52±3.97	29.63	15.48±0.24
- เฮมิเซลลูโลส (%)	6.42±2.38	7.91	12.57±1.41
- ลิกนิน (%)	23.92±2.56	24.94	11.48±1.67
น้ำตาลรีดิวซ์ (mg/g น้ำหนักแห้ง)	80.93±5.03	ND	ND

1⁺: วิเคราะห์โดยผู้ทำการทดลอง

2⁺: ผลการวิเคราะห์โดยภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตรและการจัดการทรัพยากร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ND : Not determined

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เปลือกกล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในช่วง 28.52±3.97% เฮมิเซลลูโลส 6.42±2.38% และลิกนิน 23.92±2.56% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยน้ำว้าของผู้วิจัยกับผลการวิเคราะห์โดยสาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตรและการจัดการทรัพยากร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบัน

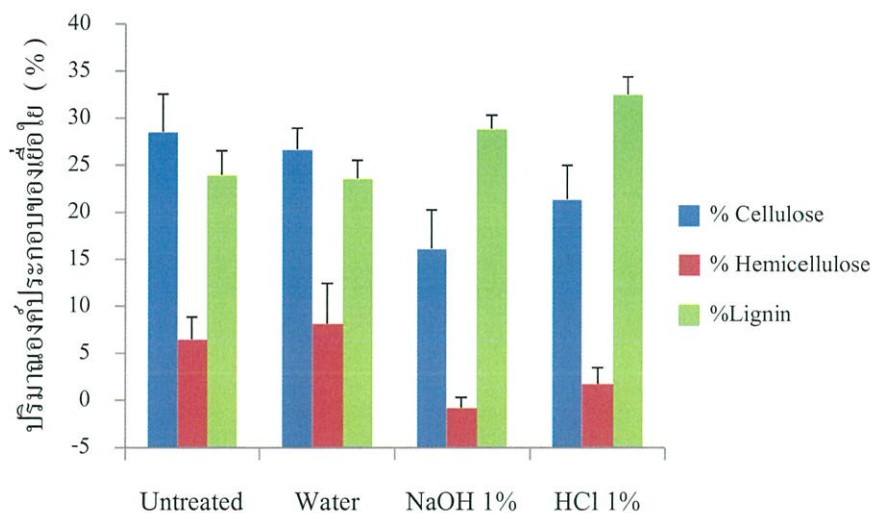
เทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พบว่าค่าปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนินที่วัดได้มีความใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเยื่อใยของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกล้วยน้ำว้าในงานวิจัยของฉัตติยา (2553) พบว่าเปลือกกล้วยตัวอย่างที่ใช้ศึกษามีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินสูงกว่า แต่มีเฮมิเซลลูโลสในปริมาณต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเปลือกกล้วยที่ใช้ในงานวิจัยทั้งสองมีระยะความสุกต่างกัน โดยงานวิจัยของเหรียญทองและจิราภรณ์ (2554) พบว่าระยะความสุกที่แตกต่างกันของกล้วยจะมีผลต่อปริมาณเซลลูโลสในเปลือกกล้วย โดยระยะความสุกที่เพิ่มขึ้นของกล้วยจะทำให้เปลือกกล้วยมีปริมาณเซลลูโลสลดลง

4.2 ผลการศึกษาชนิดของสารปรับสภาพต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย

จากการนำเปลือกกล้วยตัวอย่างไปแช่ในสารปรับสภาพที่แตกต่างกัน 3 ชนิดได้แก่ น้ำกลั่น โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1% ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกกล้วยต่อปริมาตรของสารปรับสภาพเท่ากับ 1:30 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 6 ชั่วโมง ทำการกรองแยกส่วนของแข็ง (Insoluble Solids, IS) ออกจากของเหลวขั้นต้น (Prehydrolysate) พร้อมกับนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีในส่วนที่เป็นของแข็ง และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในส่วนที่เป็นของเหลว ผลการทดลองเป็นดังนี้

4.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ

เมื่อนำเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพหรือ IS ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเยื่อใย (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) พบว่าเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีทั้งสามชนิดมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินแตกต่างจากที่พบในเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) (รูปที่ 4.1)



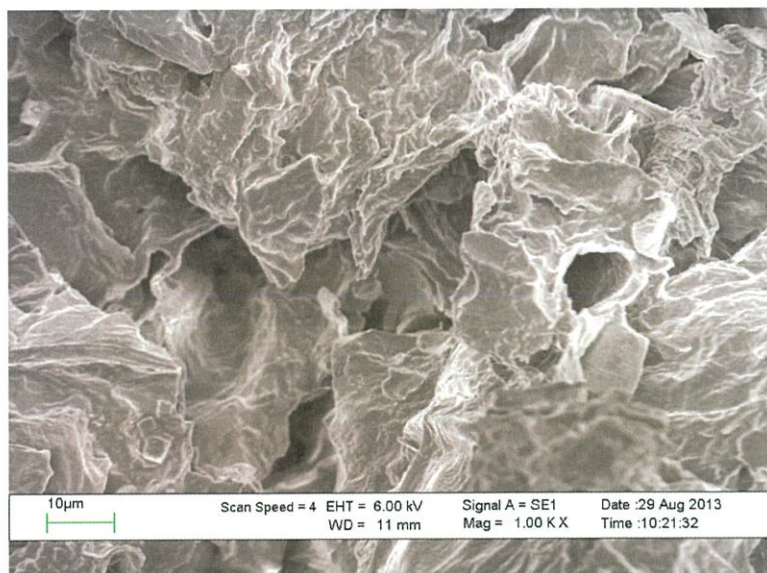
รูปที่ 4.1 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างชนิดกันเทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (untreated)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณเซลลูโลสของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีทั้งสามชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) โดยในชุดการทดลอง Untreated จะมีปริมาณเซลลูโลสสูงสุด คือ $28.52 \pm 3.97\%$ รองลงไปคือเปลือกกล้วยที่แช่น้ำกลั่น ($26.64 \pm 2.23\%$) เปลือกกล้วยที่แช่ในกรดไฮโดรคลอริก ($21.32 \pm 3.60\%$) และเปลือกกล้วยที่แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($16.08 \pm 4.09\%$) ทั้งนี้ปริมาณเซลลูโลสในเปลือกกล้วยที่แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณเซลลูโลสในเปลือกกล้วยที่แช่ในกรด แต่จะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเทียบกับปริมาณเซลลูโลสในเปลือกกล้วยที่แช่น้ำกลั่น และเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ก.2) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพเทียบกับชุดตัวอย่าง Untreated พบว่าเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและเปลือกกล้วยที่แช่น้ำกลั่นมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ใกล้เคียงกัน (6.42 ± 2.38 หน่วย และ $8.09 \pm 4.29\%$ ตามลำดับ) แต่การแช่ในสารละลายกรดหรือด่าง ทำให้เปลือกกล้วยมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง โดยเปลือกกล้วยที่แช่ในกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ $1.73 \pm 1.66\%$ และ $-0.81 \pm 1.07\%$ ตามลำดับ การลดลงอย่างเห็นได้ชัดของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% และกรดไฮโดรคลอริก 1% แสดงให้เห็นว่ากรดและด่างซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเส้นใย สามารถทำให้ microfibril ของพืชแตกออก ลดความเป็นผลึกและทำลายโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสหลังการปรับสภาพมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ทั้งนี้การปรับสภาพด้วย

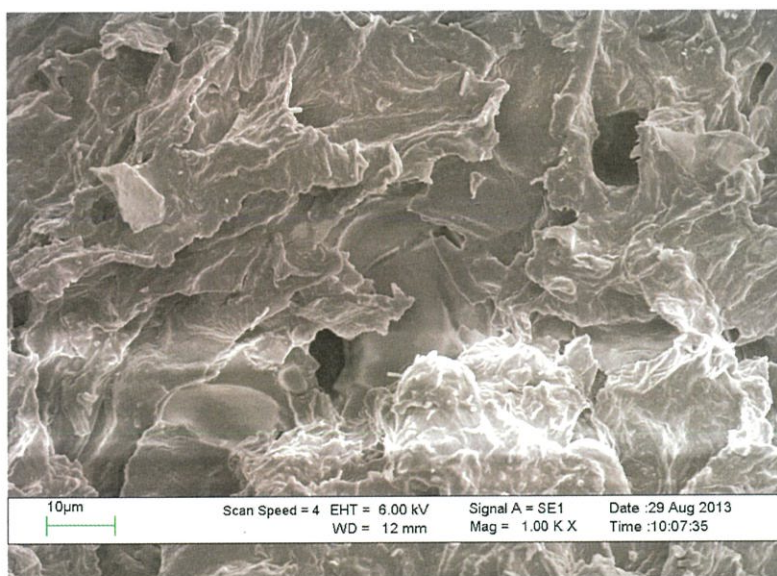
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% นั้น สามารถลดปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้มากกว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริก 1% สอดคล้องกับงานวิจัยของรัชพล (2011) ซึ่งเปรียบเทียบองค์ประกอบของเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดและเบสต่างชนิดกัน พบว่า การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง สามารถลดปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้มากที่สุด

เมื่อพิจารณาปริมาณลิกนินในเปลือกกล้วยน้ำว้าภายหลังการปรับสภาพด้วยสารเคมี พบว่าเปลือกกล้วยที่แช่ในน้ำกลั่นมีปริมาณลิกนินใกล้เคียงกับที่พบในเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพใดๆ ในทางกลับกันการปรับสภาพเปลือกกล้วยด้วยกรดหรือด่าง ทำให้ปริมาณลิกนินในเปลือกกล้วยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเปลือกกล้วยที่แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% และกรดไฮโดรคลอริก 1% มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น $28.82 \pm 1.43\%$ และ $32.45 \pm 1.86\%$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับปริมาณลิกนิน $23.92 \pm 2.56\%$ และ $23.53 \pm 1.92\%$ ในเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและเปลือกกล้วยที่แช่ในน้ำกลั่น ตามลำดับ (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ก.6) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณลิกนินในวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับสภาพได้มีการรายงานไว้ในงานวิจัยของ Sannigrahi et al. (2011) ซึ่งศึกษาการปรับสภาพไม้เนื้อแข็ง Poplar ด้วยกรด *p*-dioxane/0.10 N HCl และพบว่าลิกนินโดยเฉพาะ acid insoluble lignin (Klason lignin) ในไม้ poplar ที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและระยะเวลาการปรับสภาพที่นานขึ้น โดยลิกนินเหล่านี้จะเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ (polymerization) ของคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์พืช นอกจากนี้พบว่าวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 100-200°C มีปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้นในปริมาณสูง (Xiao et al., 2011)

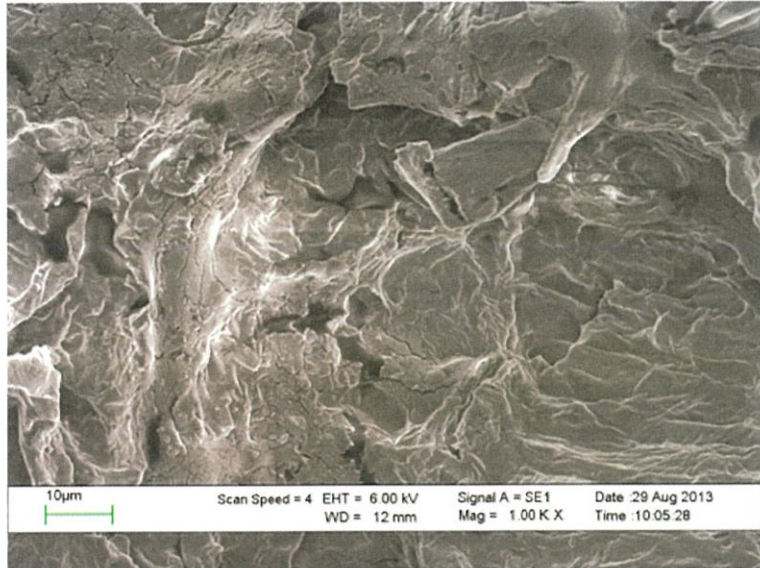
เมื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารเคมีทั้งสามชนิดเทียบกับชุดตัวอย่าง Untreated ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2-4.5



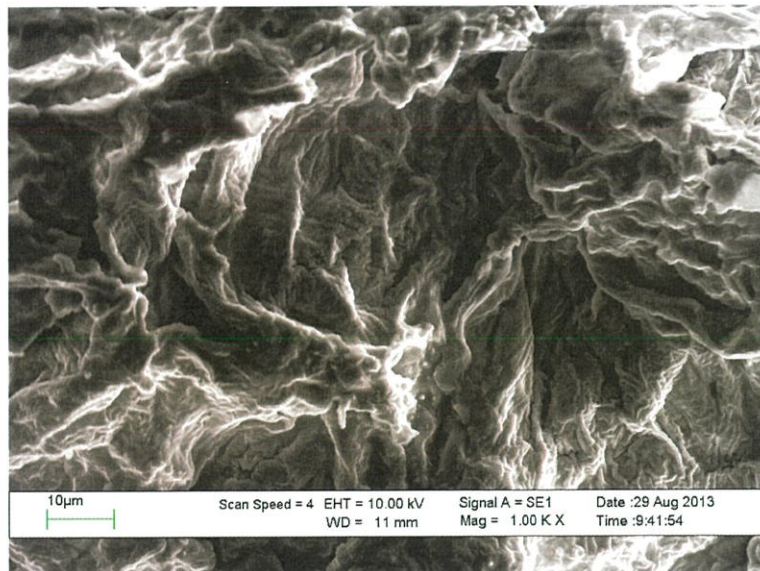
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ(Untreated) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.2 - 4.5 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนเรียงตัวหลายชั้น มีช่องว่างเล็กๆจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำดังรูปที่ 4.3 แสดงว่าน้ำไม่สามารถเข้าไปทำลายโครงสร้างหรือเพิ่มความพรุนให้กับเปลือกกล้วยได้ ส่วนโครงสร้างที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% จะมีลักษณะเป็นแนวราบ ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน และช่องว่างมีปริมาณน้อยดังรูปที่ 4.4 เป็นผลเนื่องมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% ได้เข้าไปทำลายโครงสร้างเยื่อใยได้มาก จนโครงสร้างที่เคยเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ถูกทำลายลง ในขณะที่โครงสร้างของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% จะมีลักษณะบวม พู และเกิดช่องว่างเป็นบริเวณกว้างและลึกดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่ากรดสามารถเข้าไปทำลายโครงสร้างของเปลือกกล้วยได้มากจนโครงสร้างเกิดช่องว่างหรือหลุมเป็นบริเวณกว้างและลึก สอดคล้องกับบทความวิจัยของ Hendriks and Zeeman (2009) ที่รายงานว่ากรดและด่างสามารถปรับสภาพโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส

4.2.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในส่วนของเหลว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในส่วนของเหลวขั้นต้น (prehydrolysate) และปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ที่เกิดจากการย่อยสลายหรือไฮโดรไลต์เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี หรือไฮโดรไลเสท (Hydrolysate) เทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างชนิดกันเทียบกับชุดตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

วิธีการปรับสภาพ	ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ (mg/g น้ำหนักแห้ง)		
	หลังปรับสภาพ	หลังไฮโดรไลซิส	รวม
ไม่ผ่านการปรับสภาพ	73.57	10.92	84.49
แช่ในน้ำกลั่น	81.62	3.91	85.52
แช่ในNaOH 1%	35.27	6.01	41.27
แช่ในHCl 1%	127.67	12.62	140.58

จากตารางที่ 4.2 พบว่าการปรับสภาพด้วยสารเคมีจำพวกกรดและด่าง จะส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในไฮโดรไลเสทที่เตรียมได้ โดยเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณน้ำตาลรีดิวส์เท่ากับ 84.49 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง น้ำตาลดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามธรรมชาติของคาร์โบไฮเดรตจำพวกแป้งตามระยะเวลาการสุก (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

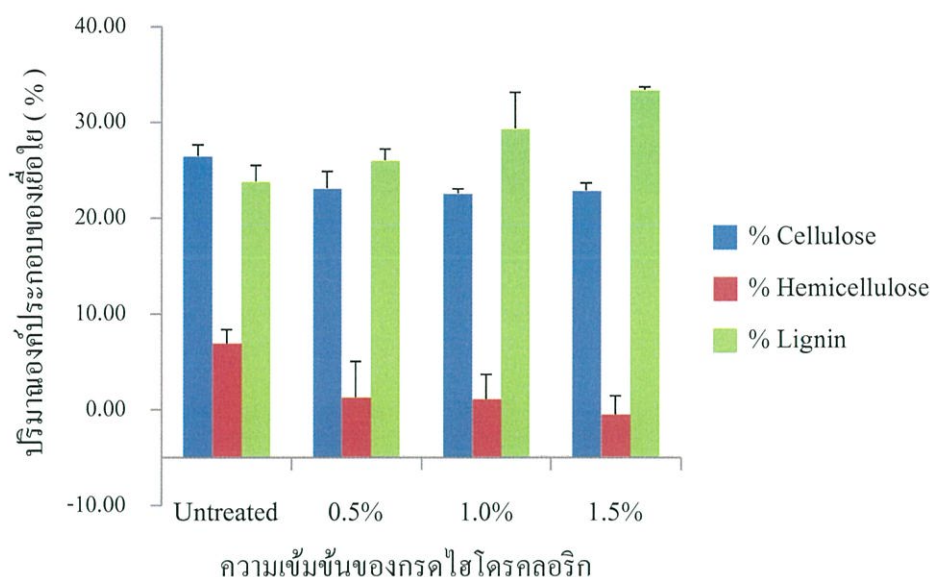
ในกรณีของการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น พบว่าเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็น 85.52 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง การเพิ่มขึ้นของน้ำตาลเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid-catalyzed hydrolysis) ของโพลีแซคคาไรด์ไปเป็นโมโนแซคคาไรด์ (Xiao et al., 2011) ส่งผลให้เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยที่โครงสร้างเยื่อใยไม่ถูกทำลาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเปลือกกล้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (รูปที่ 4.3) จะเห็นได้ว่าลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่นมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกัน สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% พบว่าได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยที่สุด นั่นเป็นเพราะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสไม่สมบูรณ์ ทำให้ได้เซลโลไบโอส น้ำตาลไดแซคคาไรด์ หรือโอลิโกแซคคาไรด์ (สุจิตตรา, 2549) ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จึงทำปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่วิเคราะห์ได้หลังการปรับสภาพมีค่าน้อย ส่วนการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1% นั้น ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์รวมมากที่สุด (140.58 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง) โดยปริมาณที่วัดได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยเปลือกกล้วยที่แช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ค.8) เนื่องจากกรดได้ไปปรับสภาพโครงสร้างเซลลูโลสให้มีความบวมฟู เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้การทำปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (รูปที่ 4.5) นอกจากนี้กรดยังเข้าทำลายพันธะ $\beta(1-4)$ -glycosidic ในโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้สมบูรณ์มากกว่า ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากถึง 127.7 mg/g น้ำหนักแห้ง นอกจากนี้เมื่อนำเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไปย่อยต่อ พบว่าได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด เมื่อเทียบกับเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยน้ำกลั่น และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากกรดช่วยเพิ่มความเป็นรูพรุนของผิววัตถุ (รูปที่ 4.5) ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้ง่าย

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้น จึงเลือกกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารปรับสภาพที่นำไปศึกษาในปัจจัยอื่นๆต่อไป

4.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารปรับสภาพต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย

จากการนำเปลือกกล้วยตัวอย่างไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.5% , 1% และ 1.5% ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกกล้วยต่อปริมาตรของสารปรับสภาพเท่ากับ 1:30 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 6 ชั่วโมง ทำการกรองแยกส่วนของแข็ง (Insoluble Solids, IS) ออกจากของเหลวขั้นต้น (Prehydrolysate) พร้อมกับนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของ

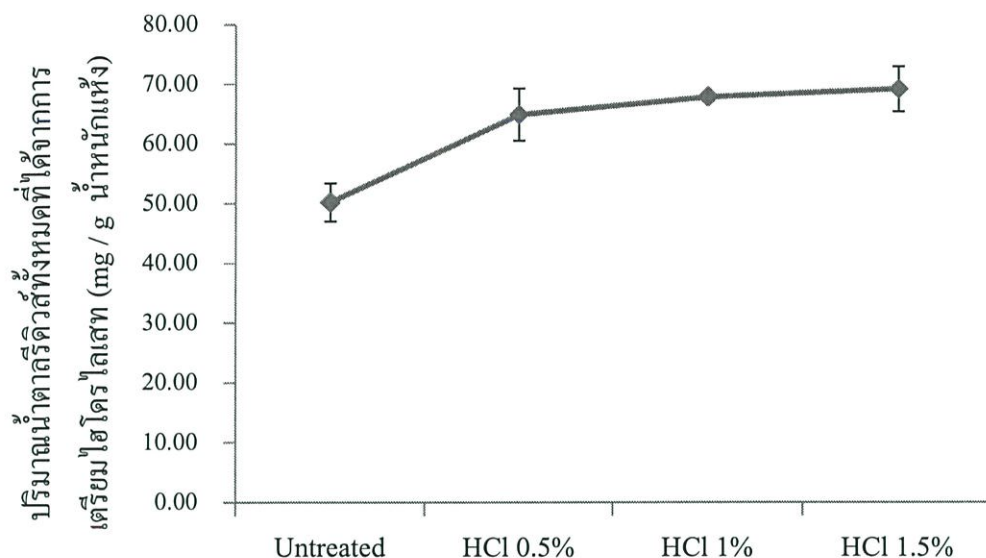
เยื่อใยในส่วนที่เป็นของแข็ง และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในส่วนที่เป็นของเหลว ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.6 – 4.7



รูปที่ 4.6 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันเทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (untreated)

จากรูปที่ 4.6 พบว่ากรดไฮโดรคลอริกมีผลทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเปลือกกล้วยมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ(รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ค.10 และค.12) ดังจะเห็นได้จากปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Untreated) มีค่าเท่ากับ $26.46 \pm 1.13\%$ และ $6.93 \pm 1.41\%$ เมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.5% เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเปลือกกล้วยมีปริมาณลดลงเหลือ $23.09 \pm 1.72\%$ และ $1.27 \pm 3.75\%$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า กรดเข้าไปทำลายโครงสร้าง Microfibril ของเซลล์พืชให้แตกออก รวมทั้งทำลายพันธะ $\beta(1-4)$ -glycosidic ในเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจาก 0.5% เป็น 1.0% และ 1.5% ทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่การลดลงนี้ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ค.10 และค.12) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณกรดที่มากขึ้นจะเข้าทำลายโครงสร้างของเซลล์พืช และทำลายโครงสร้างเซลลูโลสได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการปรับสภาพ โดยการปรับสภาพเปลือกกล้วยด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1.5% จะมีปริมาณลิกนินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับเปลือก

กล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ก.14) ลิกนินเหล่านี้ อาจเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดโพลีเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตในเปลือกกล้วย ดังที่ได้ อธิบายไว้ในงานวิจัยของ Sannigrahi et al. (2011) และ Xiao et al. (2011)

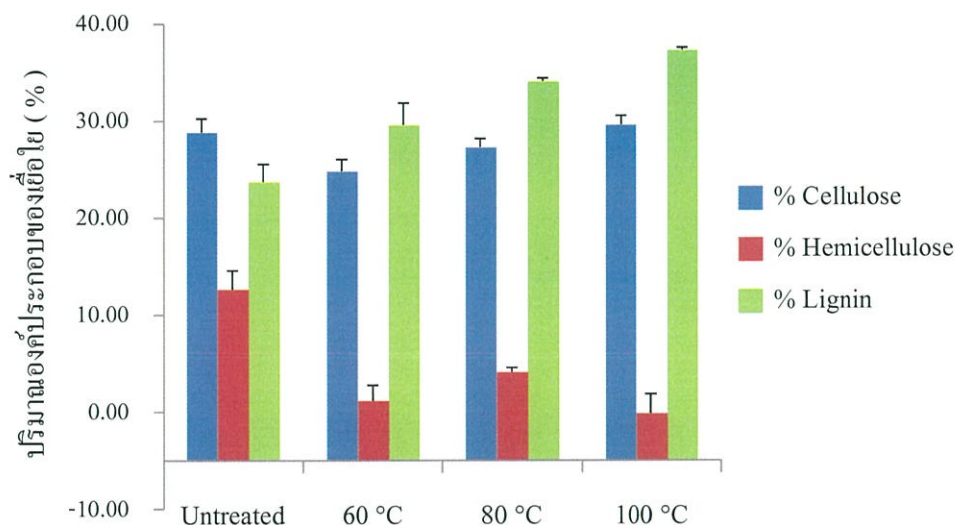


รูปที่ 4.7 ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ในไฮโดรไลเสทที่เตรียมจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้จากการเตรียมไฮโดรไลเสทจากเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ นอกจากนี้ ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (0.5% 1.0% และ 1.5%) อย่างไรก็ตามพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกไม่ได้มีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ก.16) โดยที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงสุดเท่ากับ 1.5% จะได้ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้สูงสุดเท่ากับ 142.43 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ นคร (2554) ซึ่งเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการปรับสภาพไม้มะพร้าวด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.6 % กับ 1.4% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นจาก 16.25 เป็น 25.83 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง จากผลการทดลองดังกล่าว จึงเลือกกรดไฮโดรคลอริก 1.5% ไปศึกษาในปัจจัยอื่นๆต่อไป

4.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิของการปรับสภาพต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วย

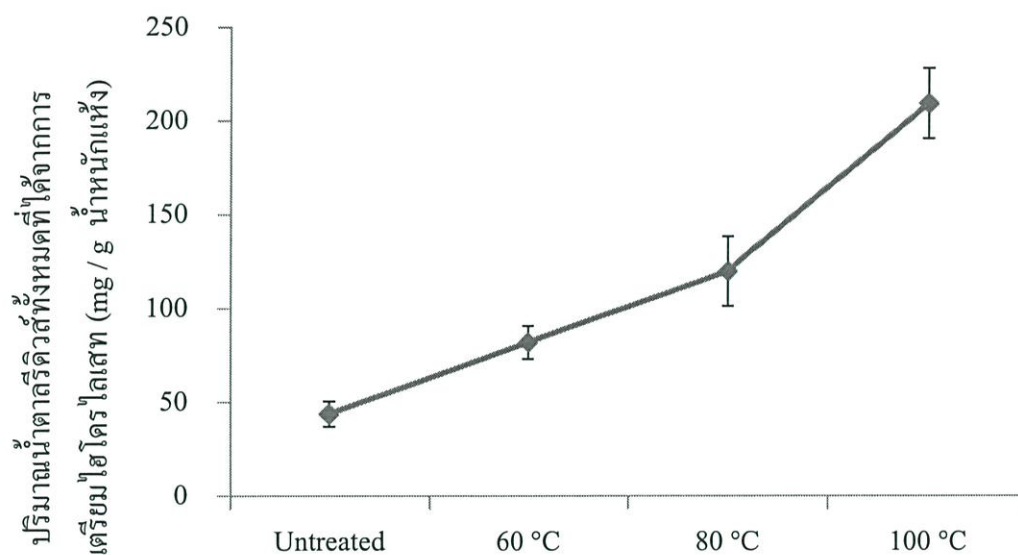
จากการนำเปลือกกล้วยตัวอย่างไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.5% ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกกล้วยต่อปริมาตรของสารปรับสภาพเท่ากับ 1:30 แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ทำการกรองแยกส่วนของแข็ง (Insoluble Solids, IS) ออกจากของเหลวขั้นต้น (Prehydrolysate) พร้อมก็นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเยื่อใยในส่วนที่เป็นของแข็ง และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในส่วนที่เป็นของเหลว ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.8 – 4.9



รูปที่ 4.8 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.5% โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเทียบกับชุดทดลองที่ไม่ปรับสภาพ

จากรูปที่ 4.8 พบว่าปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน ในเปลือกกล้วยมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ดังจะเห็นได้จากปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (untreated) มีค่าเท่ากับ $28.81 \pm 1.39\%$ และ $23.69 \pm 1.84\%$ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส ปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน มีค่าเท่ากับ $24.84 \pm 1.20\%$ และ $29.55 \pm 2.24\%$ เช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 80 องศาเซลเซียสไปเป็น 100 องศาเซลเซียส ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจาก $27.25 \pm 0.90\%$ เป็น $29.60 \pm 0.89\%$ ตามลำดับ ปริมาณลิกนินก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันจาก $34.04 \pm 0.34\%$ เป็น $37.21 \pm 0.30\%$ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิในการปรับสภาพนั้นจะส่งผลให้ลิกนินในเปลือกกล้วยมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับปริมาณลิกนินในเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ก.22) ในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณเฮมิเซลลูโลสกลับมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (untreated) พบว่าอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส

ลดลงจาก $12.61 \pm 1.92\%$ เป็น $1.17 \pm 1.58\%$ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น 80 องศาเซลเซียส เป็น 100 องศาเซลเซียส ปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ $4.07 \pm 0.49\%$ และ $-0.17 \pm 1.98\%$ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xiao et al. (2011) ที่พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ปรับสภาพจาก 100 องศาเซลเซียส เป็น 200 องศาเซลเซียส ทำให้ไม้พุ่มทามาริกซ์มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง เนื่องจากหมู่อะซิดิลที่ได้จากการแตกตัวให้สั้นลงของไซแลน จะเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเฮมิเซลลูโลส (Liu and Wyman, 2004 อ้างถึงใน Xiao et al., 2011) ในทางกลับกัน การปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้วัสดุที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 37-43% เทียบกับวัสดุดิบเริ่มต้นก่อนปรับสภาพที่มีเซลลูโลสอยู่เพียง 30% เช่นเดียวกันกับเซลลูโลส ปริมาณลิกนินในตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเพิ่มตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเสทที่เตรียมจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่า น้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเสทมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (รายละเอียดผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในภาคผนวก ค.24) สอดคล้องกับงานวิจัยของครุวรรณและคณะ (2552) ซึ่งใช้กรดซัลฟูริกในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกกล้วยโดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่า 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส และพบว่าได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด เมื่อใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น แต่มีข้อควรระวังในเรื่องการเกิดสารประกอบฟูแรน ซึ่งอาจยับยั้งการเกิดเอทานอลในขั้นตอนการหมักต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วยน้ำว้า โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารปรับสภาพ ความเข้มข้นของสารปรับสภาพ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ทำวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพและวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในส่วนที่เป็นของเหลว หรือไฮโดรไลเสทที่ได้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการปรับสภาพและการเตรียมไฮโดรไลเสทจากเปลือกกล้วยของสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% และกรดไฮโดรคลอริก 1% พบว่าการแช่ในสารละลายกรดหรือด่าง ทำให้เปลือกกล้วยมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างชัดเจนเทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ไฮโดรไลเสทที่เตรียมจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการแช่ในกรดไฮโดรคลอริก 1% จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์สูงสุดถึง 140.58 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

2. การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจาก 0.5% เป็น 1% และ 1.5% ทำให้เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเซลลูโลสลดลงจาก 23.09% เป็น 22.56% และ 22.83% ตามลำดับ และมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงจาก 1.27% เป็น 1.10% และ -0.51% ในขณะที่ปริมาณลิกนินมีแนวโน้มเพิ่มตามความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการปรับสภาพ ไฮโดรไลเสทของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างกัน มีปริมาณน้ำตาลรีดิวส์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก โดยที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกสูงสุดเท่ากับ 1.5% จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์สูงสุดเท่ากับ 142.43 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

3. การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพเปลือกกล้วยน้ำว้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1.5% จาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 80 และ 100 องศาเซลเซียส ทำให้เปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงเทียบกับเปลือกกล้วยที่ไม่ปรับสภาพ นอกจากนี้พบว่าการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เปลือกกล้วยมีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 29.60% เทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้นก่อนปรับสภาพที่มีเซลลูโลสอยู่เพียง 28.81% เช่นเดียวกันกับปริมาณลิกนิน ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ นอกจากนี้พบว่าไฮโดรไลเสทของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1.5% มีปริมาณน้ำตาลรีดิวส์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสูงขึ้น โดยได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์สูงสุดเท่ากับ 373.77 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากเปลือกกล้วย
2. ควรศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการย่อยเซลลูโลส/เฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาล รวมทั้งศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเตรียมไฮโดรไลสเสทแบบอื่นๆ เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้ลูกแป้ง
3. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการหมักไฮโดรไลสเสทที่เตรียมได้เป็นเอทานอล พร้อมทั้งวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมัก

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ม.ป.ป. เอทานอล. [Online].

เข้าถึงได้จาก

http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/usr/bers/gasohol_documents/gasohol_2009/REDP_Chapter8_Ethanol.pdf สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2556

กรมส่งเสริมการเกษตร, กลุ่มงานส่งเสริมและพัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตร ส่วนส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน สำนักพัฒนาเกษตรกร. 2547. [Online]. เข้าถึงได้จาก

<http://agrimedia.agritech.doae.go.th/book/book-praeroob/fd050.pdf> สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 13 ตุลาคม 2556

เกษมณี ดาดทอง, ขนิษฐา สกุดวา, นฤมล เป็นอินทร์, และวริยา คำภา. 2545. การผลิตเอทานอล จากเปลือกสับปะรด. ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลสววรรค์ พ.ศ. 2545.

ขวัญสุตา อนุอัน. 2549. การย่อยขานอ้อยด้วยวิธีทางเคมีเพื่อการผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพคณะเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2549.

ชัชชนันท์ นิวาสวงษ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2555. การผลิตเซลลูโลสในประเทศไทย.

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2555.

ณัฐธิดา จันทอม. 2553. การวิเคราะห์ปัจจัยของการแปลงไม้ไผ่ให้เป็นกลูโคสโดยการทำปฏิกิริยาด้วยกรดเจือจางและการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมพลังงานคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2553.

ณัตติยา จันทวรษา. 2553. การพัฒนาการแปรรูปเปลือกทุเรียนและเปลือกกล้วยน้ำว้าเป็นน้ำตาลสำหรับการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการทางชีวภาพ. ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2553.

ณัฐมา เฉลิมแสน, ทินกร ทาตระกูล, วุฒวรพงษ์ ศรีเมือง และบุญชุนาวานุเคราะห์. 2539.

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาของเปลือกกล้วยน้ำว้าในสุกรรุ่น. คณะวิชาสัตวศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พ.ศ. 2539

- ครุณวรรณ ชื่นบุบผา, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และอนุสิทธิ์ ชนะพิมพ์เมธา. 2552. การผลิตน้ำตาลรีดิซ์จากกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจาง. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขนพ.ศ. 2552.
- ทัศนีย์ เชื้อทอง. 2534. การผลิตน้ำตาลเซลลูโลสจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2534.
- เทพปัญญา เจริญรัตน์. 2545. การผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังแบบครึ่งคราวโดยการเติมกลับสเตรตซึ้นกับพีเอช. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2545.
- ธนธร วิทิตสานต์, ชมพูนุช วิภูณานนท์ และวรวุฒิ จุฬาลักษณ์านุกูล. 2546. ยุทธศาสตร์ทางพันธุศาสตร์สู่ความสำเร็จในการผลิตเซลลูโลสเอทานอล. หน่วยปฏิบัติการวิจัยเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยตัวเร่งชีวภาพ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2546.
- ธีรภัทร ศรีนรคุตร. 2543. เชื้อเพลิงเอทานอลจากวัสดุทางการเกษตร:แหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ของคนไทย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 15(3): 5-8
- นคร ทิพย์วงศ์. 2554. โครงการการประเมินผลการผลิตเอทานอลจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2554.
- นันทิกา คล้ายชม, จรัญฉัตร มานพ และเพ็ญจิตร ศรีนพคุณ. 2554. การผลิตน้ำตาลรีดิซ์จากขางข้าวฟ่างหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจาง. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2554.
- นันทิชา สิงห์ชนะ, ยศวดี ว่องธนาการ และยุวดี อินทร์วิไลย์. 2554. การผลิตเอทานอลจากแกลบด้วยกระบวนการแซคคาริฟิเคชันพร้อมทั้งกระบวนการหมัก: การปรับสภาพแกลบด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับการใช้เชื้อ *Trichoderma harzianum* โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2554.
- เบญจมาศ ศิลาชัย. 2545. กล้วย. พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร
กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- ปัญจพงษ์ ศรีปัญญา และพรทิพย์ ร้ายไพบร์. 2551. การไฮโดรไลซิสฟางข้าวให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยกรดอะซิติก. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2551.
- พรรณวิไล กิ่งสุวรรณรัตน์. 2545. การผลิตเอทานอลจากเหง้ามันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2545.
- แพรวพรรณ ยูเดชกุล, บัวสาย อัครชาติ และมัลลิกา บุญมี. 2556. การย่อยชานอ้อยซ้ำด้วยกรดอ่อนเพื่อผลิตเอทานอลโดยใช้ *Candida shehatae* TISTR 5843. ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พรวิภาห์ เวียงแก้ว, อนุวัฒน์ บัวผัน และไตรรงค์ เปลื้องแสง. 2549. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและปริมาณน้ำตาลจากเปลือกกล้วยโดยการไฮโดรไลต์ด้วยกรดซัลฟิวริก. ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร พ.ศ. 2549
- รวิวรรณ แก้วกล้า. 2538. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2538.
- มนิษา ปุลววัน. 2555. การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้เชื้อรา ไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิชาเคมี สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2555.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์. 2554. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลสัทผักตบชวาโดยหมอนึ่ง ไอน้ำแรงดันสูงเพื่อผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน พ.ศ. 2544.
- รัตติยาธร ตระจาดต์. 2550. การผลิตน้ำตาลกลูโคสจากมันสำปะหลังโดยการฉายรังสีแกมมาตามด้วยการย่อยสลายด้วยกรด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์. พ.ศ. 2550.
- วนิดา ปานอุทัย. 2553. การผลิตเอทานอลจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสโดยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2553.

- วรรณิ์ เฟ่งจันทีก์ และวิชัยเพ็ชรดี. 2546. **ศึกษาและพัฒนาการผลิตเอทานอลจากฟางข้าว**. ปรินญา
นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2546.
- สุจิตตรา ตั้งประกอบเจริญ. 2549. **การพัฒนาวิธีการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับประรด เปลือก
ทุเรียนและเปลือกกล้วย**.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัย
ราชภัฏจ้ทรเกษม พ.ศ. 2549.
- ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2553. **ผลไม่ไทยที่ควรเร่งพัฒนาให้เป็นอุตสาหกรรม**. [Online] เข้าถึง ได้จาก
<http://www.positioningmag.com/prnews/prnews.aspx?id=82319> สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 3
ตุลาคม 2556
- หรรษา ปุณณะพยัคฆ์ และเนริสา คุณประทุม. ม.ป.ป. **การผลิตเอโนไซน์จากวัสดุทางการเกษตรเพื่อ
เป็นแนวการใช้ในอาหารสัตว์**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เหรียญทองสิงห์ จานุสงค์ และจิราภรณ์ สอดจิตร์. 2554. **การผลิตเซลลูโลสจากเปลือกกล้วย**.
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาอุตสาหกรรมการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร พ.ศ. 2554.
- อนกรัตนะ กนกชัย. 2528. **การผลิตเอโนไซน์เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจากวัสดุเหลือทิ้งจาก
การเกษตร**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2528.
- อรุณวรรณ นุชพ่วง. 2547. **การย่อยสลายหญ้าแฝกหอม (*Vetiveriazizanioides Nash*) โดยใช้
เชื้อราที่ย่อยสลายเซลลูโลสได้**.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2547.
- อำนาจ ขวัญเมือง. 2548. **การหมักแอลกอฮอล์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้เซลลูเลสและ
*Saccharomyces cerevisiae***. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2548.
- Ballesteros, M., Oliva, J.M., Negro, M.J., Manzanares, P.,2004. Ethanol from Lignocellulosic
Materials by a Simultaneous Saccharification and Fermentation Process (SFS) with
Kluveromycesmarxianus CECT 10875. **Process Biochemistry**. 39: 1843-1848.
- Badal, C.S.,Loren, B.I., Michael, A.C., and Wu,V.Y. 2005. Dilute Acid Pretreatment
Enzymatic Saccharification and Fermentation of Wheat Straw to Ethanol. **Process
Biochemistry**. 40: 3693-3700.

- Bosch, P., Wallberg, O., Joelsson, E., Galbe, M. and Zacchi, G. 2010. Impact of Dual Temperature Profile in Dilute Acid Hydrolysis of Spruce for Ethanol Production. **Biotechnology for Biofuels**. 3: 15.
- Dividich, J.I., Ceoffory, F., Canope, I., and Chenost, M., 1976. **Using Waste Banana as Animal Feed** *Word Anim.* 20(20): 22-30.
- Hendriks, A.T.W.M., Zeeman, G. 2009. Pretreatments to Enhance the Digestibility of Lignocellulosic Biomass. **Bioresource Technology**. 100: 10-18.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y. Holtzapple, M., and Ladisch, M., 2005. Features of Promising Technologies for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. **Bioresource Technology**. 96(6), 673-686.
- Kumar, P., Barrett, D.M., Delwiche, M.J., and Stroeve, P., 2009. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production **Industrial & Engineering Chemical Research**. 48: 3713-3729.
- Lorenz, M.L. 1959. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**. 31: 426.
- Lloyd, T.A., and Wyman, C.E., 2005. Combined Sugar Yield for Dilute Sulfuric Acid Pretreatment of Corn Stover Followed by Enzymatic Hydrolysis of the Remaining Solids. **Bioresource Technology**. 96(18): 1967-1977
- Miller, G.L. 1959. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**. 31(3): 426.
- Murphy, J.D. and McCarty, K. 2005. Ethanol Production From Energy Crops and Wastes for Use as a Transport Fuel in Ireland. **Applied Energy**. 82: 148-166.
- Rubin. 2008. [Online]. Available:
http://www.nature.com/nature/journal/v454/n7206/fig_tab/nature07190_F2.html สืบค้น
 ข้อมูลเมื่อวันที่ 29 กันยายน 2556
- Saha, B.C., Iten, L.B., Cotta, M.A. and Wu, Y.V. 2005. Dilute Acid Pretreatment Enzymatic Saccharification and Fermentation of Wheat Straw to Ethanol. **Process Biotechnology**. 40: 3693-3700.
- Sannigrahi, P., Dong Ho, K., Jung, S., and Ragauskas, A. 2011. Pseudo-Lignin and Pretreatment Chemistry. **Energy & Environmental Science**.

- Sathitsuksanoh, N., Gorge, A., Zhang, Y., and Percival, H., 2013. New Lignocelluloses Pretreatments Using cellulose Solvents : a Review. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. 88(2): 169-180.
- Singh, A., Das, K., and Sharma, D.K. 1984. Production of Reducing Sugars From Bagasse and Rice Husk by acid Hydrolysis. **Agricultural Wastes**. 9(2): 131-145
- Sun, Y. and Cheng, J.J. 2005. Dilute Acid Pretreatment of Rye Straw and Bermuda Grass for Ethanol Production. **Bioresource Technology**. 96: 1599-1606.
- Van Soest, P.J. 1959. Development of a Comprehensive System of Feed Analyses and its Application to Forages. **Journal of Analytical science**.26:119-128.
- Wang, Z., Keshwani, D.R. Redding, A.P. and Cheng J.J. 2011. Sodium Hydroxide Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Coastal Bermuda grass. **Bioresource Technology**. 101: 3583-3585.
- Xiao, L.-P., Sun, Z.-J., Shi, Z.-J., Xu, F., and Sun, Run-Cang. 2011. Hot Water Pretreated Woody Biomass. **BioresourcesTechnology**.6(2): 1576-1598.
- Zhang, B., Wang, L., Shahbazi, A., Diallo, O., and Whitmore, A., 2011. Dilute Sulfuric Acid Pretreatment of Cattails for Cellulose Conversion. **Bioresource Technology**.102: 308- 9312.
- Zhu, G., Qifan, X.Z., Wan, X., 2011. Production of reducing sugars from bean dregs waste by hydrolysis in subcritical water. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 90: 182-186.
- Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Zhang, X., Wang, C., Yu, F., Jin1, S., Zhao, Y., Tu, S., and Xue, Y. 2005. Simultaneous Saccharification Fermentation of Microwavealkali Pre-treated Rice Straw to Ethanol. **Biosystem Engineering**. 92(2): 229-235.
- [online]. Available : [www.http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hemicellulose.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hemicellulose.png)
- [online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/cellulose>
- [online]. Available : <http://2008.igem.org/Team:wisconsin/project>
- [online]. Available : http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารและวิธีวิเคราะห์

การเตรียมสารในการปรับสภาพ

1. สัตว์อกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1%
 - ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์มา 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร เทใส่ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ถ่ายสารละลายที่ได้ลงขวดสีชา
2. สัตว์อกสารละลายไฮโดรคลอริก 0.5%
 - ปีเปตกรดไฮโดรคลอริก 37% มา 13.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรที่มีน้ำอยู่แล้ว 600 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ถ่ายสารละลายที่ได้ลงขวดสีชา
3. สัตว์อกสารละลายไฮโดรคลอริก 1.0%
 - ปีเปตกรดไฮโดรคลอริก 37% มา 54 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 2000 มิลลิลิตรที่มีน้ำอยู่แล้ว 1500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ถ่ายสารละลายที่ได้ลงขวดสีชา
4. สัตว์อกสารละลายไฮโดรคลอริก 1.5%
 - ปีเปตกรดไฮโดรคลอริก 37% มา 81 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 2000 มิลลิลิตรที่มีน้ำอยู่แล้ว 1500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ถ่ายสารละลายที่ได้ลง ขวดสีชา

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS

สารเคมี

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

การเตรียมสาร

1. การเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
 - ชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร
2. การเตรียมสาร 3,5 dinitrosalicylic acid 1%
 - ชั่ง DNS 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 M ปริมาตร 200 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน นำไปอุ่นในอ่างน้ำร้อนจนได้สารละลายใส จากนั้นเติมโพแทสเซียมทราเทรตลงไปทีละน้อยจนครบ 300 กรัม ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร เก็บรักษาไว้ในขวดสีชา

การเตรียมกราฟมาตรฐาน

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

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง
2. เติม 3,5 dinitrosalicylic acid 1% ลงไป 1 มิลลิลิตร
3. นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที
4. แช่หลอดทดลองในน้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที
5. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
6. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเยื่อใย (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ด้วยวิธี Detergent method

วิธีวิเคราะห์ Neutral Detergent Fiber (NDF)

สารเคมี

1. โซเดียมลอร์ริลซัลเฟต, AR grade, Carlo Erba
2. ไดโซเดียมเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิเตต (EDTA), AR grade, Carlo Erba
3. โซเดียม บอเรต เดคาไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), AR grade, Carlo Erba
4. ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต (Na_2HPO_4 anhydrous), AR grade, Rankem
5. โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3 anhydrous), AR grade, Rankem
6. ไตรเอทิลีน ไกลคอล (C₆H₁₄O₄), AR grade, Acros
7. อะซิโตน (C₃H₆O), AR grade, Carlo Erba
8. น้ำกลั่น

การเตรียมสาร NDF

1. ชั่ง EDTA 37.22 กรัม และ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 13.62 กรัม แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร คนให้ละลาย อาจใช้ความร้อนช่วยให้ละลายเร็วขึ้น
3. ชั่ง sodium lauryl sulphate 60 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร และวาง Triethylene glycol 20 มิลลิลิตรใส่ลงไป เติมน้ำกลั่นประมาณ 400 มิลลิลิตร นำไปคนให้ละลายด้วยเครื่อง magnetic stirrer
4. ชั่ง Na_2HPO_4 13.62 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร แล้วใช้ความร้อนช่วยให้ละลาย
5. นำสารละลายที่เตรียมไว้ผสมให้เข้ากันในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร
6. ปรับปริมาตรให้เป็น 2 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

การวิเคราะห์หาปริมาณ neutral detergent fiber

1. นำ Sinter glass ขนาด 30 มิลลิลิตร (por.1) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ครบเวลานำ Sinter glass ไปใส่โถดูดความชื้น รอให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนัก Sinter glass
2. ชั่งตัวอย่างที่อบแห้งและบดผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร (20-30 mesh) 0.5 กรัม เติมน้ำกลั่น NDF 50 มิลลิลิตร และ sodium sulfite 0.5 กรัม ลงในขวดกั่นกลม
3. ต้มให้เดือด 5-10 นาที แล้วจึงทำการ Reflux 1 hr.

4. กรองสารละลายผ่าน sinter glass ที่แห้งและทราบน้ำหนักแน่นอน ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศแล้วล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อน โดยใช้น้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะใช้ได้
5. หยดเครื่องกรองสุญญากาศชั่วคราว ล้างกากใน sinter glass ด้วย acetone 2 ครั้ง ครั้งละ 15 มิลลิลิตร แล้วจึงเปิดเครื่องกรองสุญญากาศอีกครั้ง ดูจนหมดกลิ่น acetone
6. นำ sinter glass ที่มีกากไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตลอดคืน ออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่คงที่
7. คำนวณหา % NDF

วิธีวิเคราะห์ Acid Detergent Fiber (ADF)

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริก 96 % (H_2SO_4), AR grade, Carlo Erba
2. เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB), reagent grade, Acros
3. อะซีโตน (C_3H_6O), AR grade, Carlo Erba
4. น้ำกลั่น

การเตรียมสาร ADF

1. ปิเปต conc. H_2SO_4 มา 27.8 ml ลงในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ที่ได้เติมน้ำกลั่นไว้แล้วบางส่วน
2. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้ H_2SO_4 1 N
3. ผสม H_2SO_4 1 N ปริมาตร 1 ลิตรกับ CTAB 20 กรัม ให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นกวน

การวิเคราะห์หาปริมาณ acid detergent fiber

1. นำ Sinter glass ขนาด 30 มิลลิลิตร (por.1) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ครบเวลานำ Sinter glass ไปใส่โถดูดความชื้น รอให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนัก Sinter glass
2. ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดและอบแห้ง มา 0.5 g เติมสาร ADF 50 มิลลิลิตร ลงในขวดกั่นกลม
3. ต้มให้เดือด 5-10 นาที และทำการ Reflux 1 hr.
4. กรองสารละลายผ่าน sinter glass ที่แห้งและทราบน้ำหนักแน่นอน ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศแล้วล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อน โดยใช้น้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะใช้ได้
5. ล้างกากด้วย acetone จนสารละลายที่ล้างออกมาไม่มีสี
6. นำ sinter glass ที่มีกากไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตลอดคืน ออกมาทิ้งให้เย็น

ในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่คงที่ (ตัวอย่างนี้เก็บไว้วิเคราะห์ Lignin ต่อไป)

7. คำนวณหา % ADF

วิธีวิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL)

สารเคมี

1. กรดซัลฟูริก 96 % (H_2SO_4), AR grade, Carlo Erba
2. น้ำกลั่น

การเตรียมสาร ADL

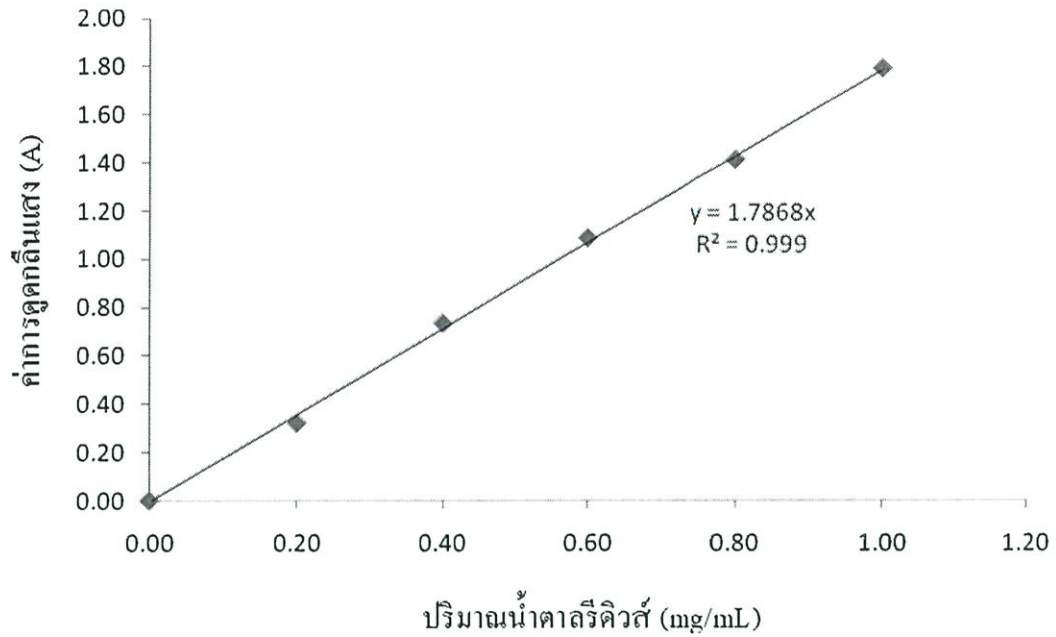
- เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ตวง conc H_2SO_4 มา 666.30 มิลลิลิตร ใส่น้ำกลั่นให้ครบ 1000 มิลลิลิตร แล้วรอให้เย็น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1000 มิลลิลิตร อีกครั้ง แล้วผสมให้เข้ากัน

การวิเคราะห์หาปริมาณ acid detergent fiber

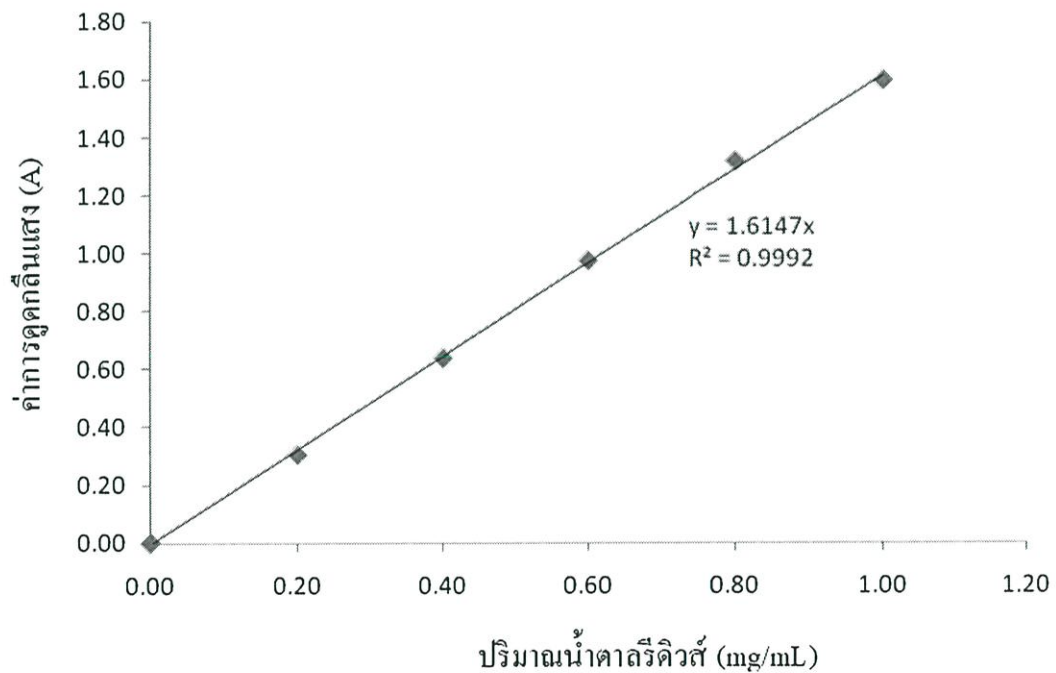
1. นำ sinter glass ที่มีกากตัวอย่างที่วิเคราะห์หา ADF แล้วมาทำการวิเคราะห์
2. เติมน้ำ H_2SO_4 72% ที่แช่เย็นลงไปครึ่ง sinter glass โดย sinter glass วางอยู่บนถาด คนด้วยแท่งแก้วเป็นครั้งคราว (แท่งแก้วจะต้องแช่ค้างอยู่ใน sinter glass ห้ามนำออก)
3. เติมน้ำ H_2SO_4 72% ลงไปครึ่งหนึ่งของการเติมครั้งแรก คนเป็นครั้งคราว 1 ชั่วโมง
4. จากนั้นทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20-23 องศาเซลเซียส
5. นำไปกรองโดยใช้เครื่องกรองสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดกรด (ทดสอบโดยใช้กระดาษลิตมัสสีน้ำเงิน)
6. นำ sinter glass ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตลอดคืน จากนั้นนำไปใส่ในโถดูดความชื้น เมื่อเย็นแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก
7. นำ sinter glass ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วนำไปโถดูดความชื้น เมื่อเย็นแล้วนำออกมาชั่งน้ำหนัก
8. คำนวณหา %ADL

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลองและวิธีคำนวณผล



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลรีควิสที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีควิสของไฮโดรไลเสทในตอนนที่ 3.4.1



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลรีควิสที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีควิสของไฮโดรไลเสทในตอนนที่ 3.4.2 และ 3.4.3

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เมื่อใช้สารเคมีปรับสภาพต่างชนิดกัน

สาร	ครั้งที่	น้ำหนักของเปลือกกล้วย (g)		ค่าการดูดกลืนแสง ที่ 520 nm		ความเข้มข้นของน้ำตาล (mg/ml)		ปริมาณน้ำตาล (มก/ก.น้ำหนักแห้ง)		ผลรวม ปริมาณ น้ำตาล(มก/ก. น้ำหนักแห้ง)
		ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	
Untreated	1	10.0025	4.0064	0.204	0.074	2.2844	0.4143	68.52	12.41	80.93
	2	10.0008	4.0035	0.234	0.562	2.6204	0.3147	78.61	9.43	88.04
น้ำกลั่น	1	10.0026	4.0021	0.267	0.040	2.9899	0.2240	89.67	6.72	96.39
	2	10.0021	4.007	0.219	0.013	2.4524	0.0364	73.56	1.09	74.65
โซเดียมไฮ ดรอกไซด์ 1%	1	10.0032	4.0088	0.101	0.024	1.1310	0.1344	33.92	4.02	37.94
	2	10.0018	4.0044	0.109	0.476	1.2206	0.2665	36.61	7.99	44.6
ไฮโดรคลอ ริก 1%	1	10.004	4.0073	0.471	0.147	5.2744	0.8231	158.17	24.65	182.82
	2	10.0014	4.002	0.291	0.035	3.2587	0.0196	97.75	0.59	98.34

Calibration curve : $y = 1.7868x$

ตารางที่ ข. 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นต่างกันในการปรับสภาพ

สาร	ครั้งที่	น้ำหนักของเปลือกกล้วย (g)		ค่าการดูดกลืนแสงที่ 520 nm		ความเข้มข้นของน้ำตาล (mg/ml)		ปริมาณน้ำตาล(มก./ก.น้ำหนักแห้ง)		ผลรวมปริมาณน้ำตาล(มก./ก.น้ำหนักแห้ง)
		ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	
Untreated	1	10.0019	4.006	0.599	0.039	3.7113	0.0242	111.32	0.72	112.04
	2	10.0038	4.0012	0.498	0.335	3.0855	0.2076	92.53	6.22	98.75
	3	10.0022	4.0032	0.545	0.036	3.3767	0.2230	101.28	6.69	107.96
ไฮโดรคลอริก 0.5%	1	10.0029	4.0025	0.479	0.009	2.9678	0.0056	89.01	0.17	89.17
	2	10.0042	4.0014	0.666	0.019	4.1264	0.1177	123.74	3.53	127.27
	3	10.0033	4.0038	0.712	0.041	4.4114	0.2540	132.30	7.61	139.91
ไฮโดรคลอริก 1%	1	10.0027	4.0029	0.230	0.058	1.4250	0.0359	42.74	1.08	43.82
	2	10.0048	4.0018	0.706	0.051	4.3742	0.3160	131.16	9.48	140.64
	3	10.0036	4.0004	0.666	0.08	4.1264	0.4957	123.75	14.87	138.62
ไฮโดรคลอริก 1.5%	1	10.0028	4.0028	0.558	0.020	3.4572	0.0124	103.69	0.37	104.06
	2	10.0026	4.0008	0.763	0.033	4.7274	0.2045	141.78	6.13	147.92
	3	10.0033	4.0035	0.717	0.02	4.4424	0.1239	133.23	3.71	136.94

Calibration curve : $y = 1.6147x$

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เมื่อใช้อุณหภูมิต่างกันในการปรับสภาพ

สาร	ครั้งที่	น้ำหนักของเปลือกกล้วย (g)		ค่าการดูดกลืนแสงที่ 520 nm		ความเข้มข้นของน้ำตาล (mg/ml)		ปริมาณน้ำตาล(มก/ก.น้ำหนักแห้ง)		ผลรวมปริมาณน้ำตาล(มก/ก.น้ำหนักแห้ง)
		ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	ปรับสภาพ	ไฮโดรไลซิส	
Untreated	1	10.0031	4.0059	0.515	0.237	3.1908	0.1468	95.70	4.40	100.09
	2	10.0031	4.0012	0.420	0.119	2.6022	0.0737	78.04	2.21	80.25
	3	10.0002	4.0045	0.207	0.318	1.2825	0.1970	38.48	5.90	44.38
60 °C	1	10.003	4.0057	0.973	0.045	6.0285	0.0279	180.80	0.84	181.64
	2	10.0023	4.0046	0.835	0.035	5.1735	0.0217	155.17	0.65	155.82
	3	10.004	4.0011	0.727	0.235	4.5043	0.1456	135.08	4.37	139.44
80 °C	1	10.0004	4.0051	1.440	0.339	8.9219	0.2100	267.65	6.29	273.94
	2	10.0006	4.003	1.178	0.046	7.2986	0.0285	218.95	0.85	219.80
	3	10.0007	4.0041	1.028	0.223	6.3693	0.1382	191.06	4.14	195.21
100 °C	1	10.0021	4.001	2.173	0.001	13.4634	0.0006	403.82	0.02	403.84
	2	10.0031	4.0028	2.466	0.017	15.2788	0.0105	458.22	0.32	458.54
	3	10.002	4.0025	1.379	0.143	8.5440	0.0886	256.27	2.66	258.92

Calibration curve : $y = 1.6147x$

การเปลี่ยนหน่วยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จาก mg/ml เป็น mg/g น้ำหนักแห้ง

จากการทดลอง ทำการการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้โดยนำสารละลายที่ต้องการวัดมา 1 มิลลิลิตร เติม DNS 1 มิลลิลิตร นำไปวัดด้วยเครื่องUV ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 2.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในสารละลาย 300 มิลลิลิตร คิดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดังนี้

สารละลายน้ำตาล	1 มิลลิลิตร	มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	2.00	มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
ถ้าสารละลายน้ำตาล	300 มิลลิลิตร	จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	$2.00 \times 300/1$	มิลลิกรัม
			= 600	มิลลิกรัม
เปลือกกล้วย	10 กรัม	มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	600	มิลลิกรัม
ถ้าเปลือกกล้วย	1 กรัม	จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	$600 \times 1/10$	มิลลิกรัม
			= 60	มิลลิกรัม

ดังนั้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากเปลือกกล้วย 1 กรัม มีค่า 60 มิลลิกรัม

วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเยื่อใย

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเยื่อใยของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน

สาร	ครั้งที่	วิเคราะห์ NDF				วิเคราะห์ ADF				วิเคราะห์ ADL		
		น้ำหนัก (g)			%NDF	น้ำหนัก (g)			%ADF	น้ำหนัก (g)		%ADL
		ตัวอย่าง	Sinter glass ก่อนอบ	Sinter glass หลังอบ		ตัวอย่าง	Sinter glass ก่อนอบ	Sinter glass หลังอบ		Sinter glass หลังอบ	Sinter glass หลังเผา	
Untreated	1	0.5019	31.0831	31.3920	61.5461	0.5020	29.8394	30.1077	53.4462	29.9622	29.8512	22.1116
	2	0.5041	31.0871	31.3703	56.1793	0.5006	31.8393	32.0968	51.4383	31.9422	31.8134	25.7291
Water	1	0.5007	31.4048	31.7127	61.4939	0.5070	29.9719	30.2273	50.3748	30.1851	30.0727	22.1696
	2	0.5028	31.4103	31.6868	54.9920	0.5028	31.1939	31.4450	49.9403	31.3126	31.1875	24.8807
NaOH	1	0.5061	31.3104	31.5393	45.2282	0.5023	30.0794	30.3144	46.7848	30.1099	29.9702	27.8121
	2	0.5012	31.3130	31.5283	42.9569	0.5038	31.5379	31.7546	43.0131	31.6876	31.5373	29.8333
HCl	1	0.5023	31.8189	32.1097	57.8937	0.5017	29.9449	30.2208	54.9930	30.0961	29.9399	31.1341
	2	0.5040	31.8263	32.0938	53.0754	0.5041	29.7674	30.0322	52.5293	29.9416	29.7714	33.7631

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อใยของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นต่างกัน

ความ เข้มข้น	ครั้งที่	วิเคราะห์ NDF				วิเคราะห์ ADF				วิเคราะห์ ADL		
		น้ำหนัก (g)			%NDF	น้ำหนัก (g)			%ADF	น้ำหนัก (g)		%ADL
		ตัวอย่าง	Sinter glass ก่อนอบ	Sinter glass หลังอบ		ตัวอย่าง	Sinter glass ก่อนอบ	Sinter glass หลังอบ		Sinter glass หลังอบ	Sinter glass หลังเผา	
Untreated	1	0.5020	31.4091	31.7201	61.9522	0.5045	31.8020	32.0734	53.7958	31.9568	31.8134	28.4241
	2	0.5021	31.4115	31.6834	54.1526	0.5020	29.8310	30.0731	48.2271	29.9524	29.8391	22.5697
HCl 0.5%	1	0.5020	31.0898	31.3510	52.0319	0.5034	31.1510	31.4413	57.6679	31.3276	31.1619	32.9162
	2	0.5031	31.0923	31.3425	49.7317	0.5028	30.0710	30.3280	51.1138	30.2148	30.0800	26.8099
HCl 1.0%	1	0.5015	31.3179	31.6017	56.5902	0.5069	31.5364	31.8373	59.3608	31.7305	31.5505	35.5099
	2	0.5033	31.3185	31.5876	53.4671	0.5025	29.9612	30.2335	54.1891	30.1313	29.9708	31.9403
HCl 1.5%	1	0.5018	31.8296	32.1187	57.6126	0.5033	29.9277	30.2222	58.5138	30.1104	29.9388	34.0949
	2	0.5033	31.8209	32.1062	56.6859	0.5023	29.7504	30.0308	55.8232	29.9281	29.7596	33.5457

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อใยของเปลือกกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยอุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิ	ครั้งที่	วิเคราะห์ NDF				วิเคราะห์ ADF				วิเคราะห์ ADL		
		น้ำหนัก (g)			%NDF	น้ำหนัก (g)			%ADF	น้ำหนัก (g)		%ADL
		ตัวอย่าง	Sinter glass ก่อนอบ	Sinter glass หลังอบ		ตัวอย่าง	Sinter glass ก่อนอบ	Sinter glass หลังอบ		Sinter glass หลังอบ	Sinter glass หลังเผา	
Untreated	1	0.5023	31.5428	31.8614	63.4282	0.5012	29.7459	30.0074	52.1748	29.8644	29.7522	22.3863
	2	0.5011	32.0140	32.3486	66.7730	0.5027	31.8058	32.0713	52.8148	31.9327	31.8071	24.9851
60 °C	1	0.5025	31.4105	31.6803	53.6915	0.5024	29.8293	30.0988	53.6425	29.9767	29.8362	27.9658
	2	0.5020	31.4083	31.6965	57.4103	0.5031	30.0688	30.3461	55.1183	30.2313	30.0774	31.1270
80 °C	1	0.5038	31.3185	31.6479	65.3831	0.5008	30.0690	30.3778	61.6613	30.2472	30.0780	33.7859
	2	0.5031	31.3184	31.6469	65.2952	0.5021	29.9273	30.2330	60.8843	30.1065	29.9344	34.2760
100 °C	1	0.5008	31.8337	32.1583	64.8163	0.5016	29.9600	30.2930	66.3876	30.1577	29.9700	37.4203
	2	0.5008	31.8250	32.1679	68.4704	0.5024	29.8294	30.1672	67.2372	30.0225	29.8366	37.0024

วิธีคำนวณปริมาณองค์ประกอบของเยื่อใย

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

W_0 = น้ำหนัก Sinter glass ก่อนอบ

W_t = น้ำหนัก Sinter glass หลังอบ

W = น้ำหนักตัวอย่าง

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

W_0 = น้ำหนัก Sinter glass ก่อนอบ

W_t = น้ำหนัก Sinter glass หลังอบ

W = น้ำหนักตัวอย่าง

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

W_t = น้ำหนัก Sinter glass หลังอบ

W_a = น้ำหนัก Sinter glass หลังเผา

W = น้ำหนักตัวอย่าง (จากขั้นตอนนี้ADF)

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

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

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

ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ One-Way ANOVA

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณเซลล์โลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	188.808	3	62.936	4.988	.077
Within Groups	50.470	4	12.617		
Total	239.278	7			

ตารางที่ ค.2 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณเซลล์โลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	น้ำ	1.885	3.552	.624	-7.98	11.75
	NaOH	12.445*	3.552	.025	2.58	22.31
	HCl	7.205	3.552	.112	-2.66	17.07
น้ำ	Un	-1.885	3.552	.624	-11.75	7.98
	NaOH	10.560*	3.552	.041	.70	20.42
	HCl	5.320	3.552	.209	-4.54	15.18
NaOH	Un	-12.445*	3.552	.025	-22.31	-2.58
	น้ำ	-10.560*	3.552	.041	-20.42	-.70
	HCl	-5.240	3.552	.214	-15.10	4.62
HCl	Un	-7.205	3.552	.112	-17.07	2.66
	น้ำ	-5.320	3.552	.209	-15.18	4.54
	NaOH	5.240	3.552	.214	-4.62	.10

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	101.449	3	33.816	4.836	.081
Within Groups	27.969	4	6.992		
Total	129.418	7			

ตารางที่ ค.4 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	น้ำ	-1.665	2.644	.563	-9.01	5.68
	NaOH	7.225	2.644	.052	-.12	14.57
	HCl	4.695	2.644	.150	-2.65	12.04
น้ำ	Un	1.665	2.644	.563	-5.68	9.01
	NaOH	8.890*	2.644	.028	1.55	16.23
	HCl	6.360	2.644	.074	-.98	13.70
NaOH	Un	-7.225	2.644	.052	-14.57	.12
	น้ำ	-8.890*	2.644	.028	-16.23	-1.55
	HCl	-2.530	2.644	.393	-9.87	4.81
HCl	Un	-4.695	2.644	.150	-12.04	2.65
	น้ำ	-6.360	2.644	.074	-13.70	.98
	NaOH	2.530	2.644	.393	-4.81	9.87

ตารางที่ ๕.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณลิคนินที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	108.793	3	36.264	9.226	.029
Within Groups	15.723	4	3.931		
Total	124.516	7			

ตารางที่ ๕.6 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณลิคนินที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	น้ำ	.395	1.983	.852	-5.11	5.90
	NaOH	-4.900	1.983	.069	-10.40	.60
	HCl	-8.525*	1.983	.013	-14.03	-3.02
น้ำ	Un	-.395	1.983	.852	-5.90	5.11
	NaOH	-5.295	1.983	.056	-10.80	.21
	HCl	-8.920*	1.983	.011	-14.42	-3.42
NaOH	Un	4.900	1.983	.069	-.60	10.40
	น้ำ	5.295	1.983	.056	-.21	10.80
	HCl	-3.625	1.983	.141	-9.13	1.88
HCl	Un	8.525*	1.983	.013	3.02	14.03
	น้ำ	8.920*	1.983	.011	3.42	14.42
	NaOH	3.625	1.983	.141	-1.88	9.13

ตารางที่ ค.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรไลสด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9933.699	3	3311.233	3.438	.132
Within Groups	3852.203	4	963.051		
Total	13785.902	7			

ตารางที่ ค.8 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรไลสด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	น้ำ	-1.035	31.033	.975	-87.20	85.13
	NaOH	43.215	31.033	.236	-42.95	129.38
	HCl	-56.095	31.033	.145	-142.26	30.07
น้ำ	Un	1.035	31.033	.975	-85.13	87.20
	NaOH	44.250	31.033	.227	-41.91	130.41
	HCl	-55.060	31.033	.151	-141.22	31.10
NaOH	Un	-43.215	31.033	.236	-129.38	42.95
	น้ำ	-44.250	31.033	.227	-130.41	41.91
	HCl	-99.310*	31.033	.033	-185.47	-13.15
HCl	Un	56.095	31.033	.145	-30.07	142.26
	น้ำ	55.060	31.033	.151	-31.10	141.22
	NaOH	99.310*	31.033	.033	13.15	185.47

ตารางที่ ค.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณเซลล์โลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	17.860	3	5.953	4.551	.038
Within Groups	10.465	8	1.308		
Total	28.325	11			

ตารางที่ ค.10 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณเซลล์โลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	0.5%	2.457*	.934	.030	.30	4.61
	1.0%	3.107*	.934	.010	.95	5.26
	1.5%	2.737*	.934	.019	.58	4.89
0.5%	Un	-2.457*	.934	.030	-4.61	-.30
	1.0%	.650	.934	.506	-1.50	2.80
	1.5%	.280	.934	.772	-1.87	2.43
1.0%	Un	-3.107*	.934	.010	-5.26	-.95
	0.5%	-.650	.934	.506	-2.80	1.50
	1.5%	-.370	.934	.702	-2.52	1.78
1.5%	Un	-2.737*	.934	.019	-4.89	-.58
	0.5%	-.280	.934	.772	-2.43	1.87
	1.0%	.370	.934	.702	-1.78	2.52

ตารางที่ ค.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	143.544	3	47.848	5.527	.024
Within Groups	69.252	8	8.656		
Total	212.795	11			

ตารางที่ ค.12 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	0.5%	8.370*	2.402	.008	2.83	13.91
	1.0%	7.530*	2.402	.014	1.99	13.07
	1.5%	7.973*	2.402	.011	2.43	13.51
0.5%	Un	-8.370*	2.402	.008	-13.91	-2.83
	1.0%	-.840	2.402	.736	-6.38	4.70
	1.5%	-.397	2.402	.873	-5.94	5.14
1.0%	Un	-7.530*	2.402	.014	-13.07	-1.99
	0.5%	.840	2.402	.736	-4.70	6.38
	1.5%	.443	2.402	.858	-5.10	5.98
1.5%	Un	-7.973*	2.402	.011	-13.51	-2.43
	0.5%	.397	2.402	.873	-5.14	5.94
	1.0%	-.443	2.402	.858	-5.98	5.10

ตารางที่ ค.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณลิกนินที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	116.975	3	38.992	3.432	.072
Within Groups	90.898	8	11.362		
Total	207.873	11			

ตารางที่ ค.14 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณลิกนินที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	0.5%	-2.983	2.752	.310	-9.33	3.36
	1.0%	-6.050	2.752	.059	-12.40	.30
	1.5%	-8.263*	2.752	.017	-14.61	-1.92
0.5%	Un	2.983	2.752	.310	-3.36	9.33
	1.0%	-3.067	2.752	.298	-9.41	3.28
	1.5%	-5.280	2.752	.091	-11.63	1.07
1.0%	Un	6.050	2.752	.059	-.30	12.40
	0.5%	3.067	2.752	.298	-3.28	9.41
	1.5%	-2.213	2.752	.445	-8.56	4.13
1.5%	Un	8.263*	2.752	.017	1.92	14.61
	0.5%	5.280	2.752	.091	-1.07	11.63
	1.0%	2.213	2.752	.445	-4.13	8.56

ตารางที่ ค.15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรไลเสทด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	457.536	3	152.512	13.962	.014
Within Groups	43.694	4	10.924		
Total	501.231	7			

ตารางที่ ค.16 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรไลเสทด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	0.5%	-14.685*	3.305	.011	-23.86	-5.51
	1.0%	-17.615*	3.305	.006	-26.79	-8.44
	1.5%	-18.980*	3.305	.005	-28.16	-9.80
0.5%	Un	14.685*	3.305	.011	5.51	23.86
	1.0%	-2.930	3.305	.425	-12.11	6.25
	1.5%	-4.295	3.305	.264	-13.47	4.88
1.0%	Un	17.615*	3.305	.006	8.44	26.79
	0.5%	2.930	3.305	.425	-6.25	12.11
	1.5%	-1.365	3.305	.701	-10.54	7.81
1.5%	Un	18.980*	3.305	.005	9.80	28.16
	0.5%	4.295	3.305	.264	-4.88	13.47
	1.0%	1.365	3.305	.701	-7.81	10.54

ตารางที่ ค.17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณเซลล์โลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	31.514	3	10.505	8.616	.007
Within Groups	9.754	8	1.219		
Total	41.268	11			

ตารางที่ ค.18 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณเซลล์โลสที่ได้จากการปรับสภาพด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	60°C	2.807*	.902	.014	.73	4.89
	80°C	.763	.902	.422	-1.32	2.84
	100°C	-1.707	.902	.095	-3.79	.37
60°C	Un	-2.807*	.902	.014	-4.89	-.73
	80°C	-2.043	.902	.053	-4.12	.04
	100°C	-4.513*	.902	.001	-6.59	-2.43
80°C	Un	-.763	.902	.422	-2.84	1.32
	60°C	2.043	.902	.053	-.04	4.12
	100°C	-2.470*	.902	.025	-4.55	-.39
100°C	Un	1.707	.902	.095	-.37	3.79
	60°C	4.513*	.902	.001	2.43	6.59
	80°C	2.470*	.902	.025	.39	4.55

ตารางที่ ค.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	240.464	3	80.155	23.320	.000
Within Groups	27.497	8	3.437		
Total	267.960	11			

ตารางที่ ค.20 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการปรับสภาพด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	60°C	10.430*	1.514	.000	6.94	13.92
	80°C	8.560*	1.514	.000	5.07	12.05
	100°C	11.270*	1.514	.000	7.78	14.76
60°C	Un	-10.430*	1.514	.000	-13.92	-6.94
	80°C	-1.870	1.514	.252	-5.36	1.62
	100°C	.840	1.514	.594	-2.65	4.33
80°C	Un	-8.560*	1.514	.000	-12.05	-5.07
	60°C	1.870	1.514	.252	-1.62	5.36
	100°C	2.710	1.514	.111	-.78	6.20
100°C	Un	-11.270*	1.514	.000	-14.76	-7.78
	60°C	-.840	1.514	.594	-4.33	2.65
	80°C	-2.710	1.514	.111	-6.20	.78

ตารางที่ ค.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณลิกนินที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	315.134	3	105.045	7.358	.011
Within Groups	114.215	8	14.277		
Total	429.349	11			

ตารางที่ ค.22 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณลิกนินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	60°C	-7.707*	3.085	.037	-14.82	-.59
	80°C	-11.153*	3.085	.007	-18.27	-4.04
	100°C	-13.573*	3.085	.002	-20.69	-6.46
60°C	Un	7.707*	3.085	.037	.59	14.82
	80°C	-3.447	3.085	.296	-10.56	3.67
	100°C	-5.867	3.085	.094	-12.98	1.25
80°C	Un	11.153*	3.085	.007	4.04	18.27
	60°C	3.447	3.085	.296	-3.67	10.56
	100°C	-2.420	3.085	.455	-9.53	4.69
100°C	Un	13.573*	3.085	.002	6.46	20.69
	60°C	5.867	3.085	.094	-1.25	12.98
	80°C	2.420	3.085	.455	-4.69	9.53

ตารางที่ ค.23 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรไลสเสทด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

ANOVA					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	38043.610	3	12681.203	51.957	.000
Within Groups	1708.495	7	244.071		
Total	39752.105	10			

ตารางที่ ค.24 ผลการเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรไลสเสทด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยเปรียบเทียบเป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD

Multiple Comparisons						
(I) sample	(J) sample	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
Un	60°C	-40.830*	12.756	.015	-70.99	-10.67
	80°C	-75.153*	12.756	.001	-105.32	-44.99
	100°C	-173.043*	14.262	.000	-206.77	-139.32
60°C	Un	40.830*	12.756	.015	10.67	70.99
	80°C	-34.323*	12.756	.031	-64.49	-4.16
	100°C	-132.213*	14.262	.000	-165.94	-98.49
80°C	Un	75.153*	12.756	.001	44.99	105.32
	60°C	34.323*	12.756	.031	4.16	64.49
	100°C	-97.890*	14.262	.000	-131.61	-64.17
100°C	Un	173.043*	14.262	.000	139.32	206.77
	60°C	132.213*	14.262	.000	98.49	165.94
	80°C	97.890*	14.262	.000	64.17	131.61