

การไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
และสารละลายไฮโดรเจนเพอรอกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hydrolysis of Sugarcane Bagasse by using Hot-compressed Water,  
Water under Pressurization of Carbon Dioxide and Hydrogen Peroxide  
Solution under Pressurization of Carbon Dioxide



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Bachelor of Engineering in Chemical Engineering  
Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การไฮโดรไลซิซซานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดย นายชัยรัช จัตตะมะละกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาและอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



(ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์)

ประธานกรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชสิทธิ์ วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
โดย	นายชัยรัช จัตตะมละกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไฮโดรไลซิสขานอ้อย 3 วิธี ได้แก่ การใช้น้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อผลิตน้ำตาลรีตีวซ์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส เวลา 0 และ 30 นาที โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ภาวะที่เหมาะสมพิจารณาจากความสามารถในการกำจัดเอมิเซลลูโลสออกจากโครงสร้างวัสดุลิกโนเซลลูโลสและปริมาณไซโลแซ็กคาไรด์ พบว่าการไฮโดรไลซิสขานอ้อยทั้ง 3 วิธี มีภาวะที่เหมาะสมเหมือนกัน ได้แก่ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 0 นาที ร้อยละผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์มีค่าเท่ากับ 22.02, 17.89 และ 10.03 โดยมวล คิดเป็นร้อยละผลได้คืนมาเท่ากับ 73.45, 59.67 และ 33.46 โดยมวล ตามลำดับ การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ทำให้ผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดัน แต่วิธีอัดสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็นกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก สามารถเพิ่มผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์อย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 0 นาที และผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้แก่ ไซโลส ปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 170-210 องศาเซลเซียส เนื่องจากกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกและไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งย่อยสลายน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นกรดอินทรีย์ จึงทำให้มีผลได้ไซโลแซ็กคาไรด์ต่ำกว่าการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยวิธีน้ำร้อนอัดความดันและน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Report Title	Hydrolysis of Sugarcane Bagasse by using Hot-compressed Water, Water under Pressurization of Carbon Dioxide and Hydrogen Peroxide Solution under Pressurization of Carbon Dioxide
By	Mr.Chaitat Juttamalakul
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Dr.Natthanon Phaiboonsilpa

## ABSTRACT

Hydrolysis of sugarcane bagasse by 3 methods, i.e., hot-compressed water, water under pressurization of carbon dioxide, and hydrogen peroxide solution under pressurization of carbon dioxide was investigated for the production of reducing sugars. The experiments were conducted at a temperature range of 150-250°C for 0 and 30 min in a 10-ml batch reactor. The suitable conditions were determined in terms of degree of hemicelluloses removal from the lignocellulosic cell wall structure and the maximum yield of xylo-saccharides. The conditions of the hydrolysis of sugarcane bagasse by these 3 methods were the same at 210°C and 0 min. The obtained xylo-saccharide yields were 22.02, 17.89 and 10.03 wt%, corresponding to 73.45, 59.67 and 33.46 wt% of recovery hemicelluloses, respectively. Compared to the hot-compressed water method, the hydrolysis of sugarcane bagasse by water under pressurization of carbon dioxide showed no significant xylo-saccharide yield. However, the hydrolysis by using hydrogen peroxide solution under pressurization carbon dioxide, which led to the formation of peroxy carbonic acid, resulted in significantly higher yield of xylo-saccharides at 170°C and 0 min and greater amount of xylose in a low range of temperature (170-210°C). Nevertheless, due to presence of peroxy carbonic acid and hydrogen peroxide, which enhanced the oxidation of mono-saccharides to organic acids, the xylo-saccharide yield was lower than those obtained by hot-compressed water and water under pressurization of carbon dioxide.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ กระผมขอขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูงที่คอยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อโครงการ ตลอดจนดูแลและแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี และขอขอบคุณทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สัญญาเลขที่ MRG5980129 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนเงินในการซื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย อีกทั้งคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ดังรายนามต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ กรรมการผู้ตรวจสอบปริญญาานิพนธ์ที่ตรวจแก้รายงานให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ศาสตราจารย์ ดร.นवल เหล่าศิริพจน์ อาจารย์ประจำบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ดร.วีระวัฒน์ แซ่มปรีดา หัวหน้าห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์/ห้องปฏิบัติการพลังงานและเคมีชีวภาพ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่เอื้อเพื่อเงินทุนวิจัยห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือสำหรับการทดลอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์สำหรับการทดลอง ดร.ธีรินทร์ ฉายศิริโชติ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่เอื้อเพื่อหม้อนึ่งอัดไอน้ำ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี รวมถึงเจ้าหน้าที่และรุ่นพี่รุ่นน้องภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจตลอดการทำโครงการ อีกทั้งการสนับสนุนทางการเงินต่างๆ ตลอดมา หากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด กระผมขอน้อมรับ และกราบขออภัยมา ณ ที่นี้

ชัยธัช จัตตะมละกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลิกโนเซลลูโลส.....	4
2.1.1 เซลลูโลส.....	4
2.1.2 เฮมิเซลลูโลส.....	5
2.1.3 ลิกนิน.....	6
2.2 วิธีการปรับสภาพทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลส.....	7
2.2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ.....	7
2.2.2 การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์.....	7
2.2.3 การใช้น้ำร้อนอัดความดัน.....	7
2.2.4 การใช้น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	8
2.2.5 การใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	8
2.2.6 การใช้น้ำที่ภาวะเหนือหรือใต้วิกฤต.....	8
2.2.7 การปรับสภาพโดยใช้กรด.....	9
2.2.8 การปรับสภาพโดยใช้ด่าง.....	9
2.2.9 การย่อยเปื่อย.....	9
2.3 น้ำตาลรีดิวิซ.....	9
2.4 การไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลส.....	10
2.4.1 การไฮโดรไลซิสด้วยกรด.....	10
2.4.2 การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การเกิดกรดคาร์บอนิกในน้ำ.....	11
2.6 สมดุลการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ.....	12
2.7 การเกิดเพอร์ออกซี.....	14
2.8 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว.....	15
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	20
3.1 การเตรียมขานอ้อย.....	20
3.1.1 การลดขนาดขานอ้อย.....	20
3.1.2 การสกัดด้วยอะซิโตน.....	20
3.1.3 การสกัดด้วยน้ำร้อน.....	21
3.2 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อย.....	21
3.2.1 การวิเคราะห์เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธีเคลซอนลิกนิน.....	22
3.3 การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน.....	23
3.3.1 ภาวะที่ศึกษา.....	23
3.3.2 วัสดุและสารเคมี.....	23
3.3.3 อุปกรณ์.....	23
3.3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	24
3.4 การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	24
3.4.1 ภาวะที่ศึกษา.....	24
3.4.2 วัสดุและสารเคมี.....	24
3.4.3 อุปกรณ์.....	24
3.4.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	25
3.5 การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	25
3.5 การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน.....	25
3.6 การวิเคราะห์ผล.....	25
3.6.1 การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเซต.....	25
3.6.2 การวิเคราะห์เฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลในไฮโดรไลเซต.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.3 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของกากของแข็ง.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	28
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อย.....	28
4.2 การไฮโดรไลซิซขานอ้อยด้วยน้ำและสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	29
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการไฮโดรไลซิซขานอ้อยเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	31
4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์.....	34
4.2.3 กลไกการย่อยสลายโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในขานอ้อย.....	37
4.2.4 ผลพลอยได้จากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในการไฮโดรไลซิซขานอ้อย.....	41
4.2.5 ผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์และผลพลอยได้จากการไฮโดรไลซิซขานอ้อยด้วยวิธีต่างๆ ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมที่สุด.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม.....	46
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	53

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบหลักทางเคมีของลิกโนเซลลูโลส.....	4
ตารางที่ 4.1	ปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในองค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย.....	28
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย.....	29
ตารางที่ 4.3	ผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และกากของแข็ง จากการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลส ในชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสาร ละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ภายใต้ภาวะที่ทำให้เกิดผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์สูงที่สุด.....	43
ตารางที่ ข.1	พื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน.....	55
ตารางที่ ข.2	พื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมของกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.....	56
ตารางที่ ข.3	พื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมของไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.....	57
ตารางที่ ข.4	พื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมของอะราบิโนสและอะราบิโนสทั้งหมดที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.....	57
ตารางที่ ข.5	พื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมของเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จาก การไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์.....	58
ตารางที่ ข.6	ร้อยละโดยมวลของปริมาณกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน.....	59
ตารางที่ ข.7	ร้อยละโดยมวลของปริมาณกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ชานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	59
ตารางที่ ข.8	ร้อยละโดยมวลของปริมาณกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ชานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	60
ตารางที่ ข.9	ร้อยละโดยมวลของปริมาณไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน.....	60

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข.10 ร้อยละโดยมวลของปริมาณไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	61
ตารางที่ ข.11 ร้อยละโดยมวลของปริมาณไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	61
ตารางที่ ข.12 ร้อยละโดยมวลของปริมาณอะราบิโนสและอะราบิโนสทั้งหมดที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน.....	62
ตารางที่ ข.13 ร้อยละโดยมวลของปริมาณอะราบิโนสและอะราบิโนสทั้งหมดที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	62
ตารางที่ ข.14 ร้อยละโดยมวลของปริมาณอะราบิโนสและอะราบิโนสทั้งหมดที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้น ร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	63
ตารางที่ ข.15 ร้อยละโดยมวลของปริมาณเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน.....	63
ตารางที่ ข.16 ร้อยละโดยมวลของปริมาณเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	64
ตารางที่ ข.17 ร้อยละโดยมวลของปริมาณเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	64
ตารางที่ ข.18 ปริมาณกากของแข็งหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดันน้ำอัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	65
ตารางที่ ข.19 ดัชนีความเป็นผลึกของกากของแข็งหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัด ความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	65

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างเซลลูโลสแบบผลึกและเซลลูโลสแบบกึ่งผลึก.....5
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของอะราบิโนกลูโคโรโนไซแลน.....6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของลิกนิน.....6
รูปที่ 2.4	ผลได้ของกลูโคสจากการไฮโดรไลซิสกระดาษด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 0.2 โดยมวล ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....13
รูปที่ 2.5	ค่าคงที่เฮนรีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....13
รูปที่ 2.6	ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของน้ำตาลกลูโคส.....16
รูปที่ 2.7	ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของไซโลสเป็นกรดไซโลนิก.....17
รูปที่ 2.8	ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของไซโลสเป็นกรดไซลาริก.....17
รูปที่ 4.1	รูปแบบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....30
รูปที่ 4.2	รูปแบบของความดันในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....30
รูปที่ 4.3	ปริมาณกากของแข็งหลังการไฮโดรไลซิสขานอ้อยที่อุณหภูมิต่างๆ.....32
รูปที่ 4.4	การเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งหลังการไฮโดรไลซิสขานอ้อยที่อุณหภูมิต่างๆ.....33
รูปที่ 4.5	ผลได้ของไซโลส ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ และไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส เฮมิเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....35
รูปที่ 4.6	ผลได้ของอะราบิโนสที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....36
รูปที่ 4.7	ผลได้ของกลูโคส เซลโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ และไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....37
รูปที่ 4.8	กลไกการสลายตัวที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน และน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....38
รูปที่ 4.9	กลไกการสลายตัวที่เป็นไปได้ในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....39
รูปที่ 4.10	กลไกการสลายตัวที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน และน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....40
รูปที่ 4.11	กลไกการสลายตัวที่เป็นไปได้จากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยน้ำสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 ผลได้ของเฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน.....	41
รูปที่ 4.13 ผลได้ของเฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	41
รูปที่ 4.14 ผลได้ของเฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิส ขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	42
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานพื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของกลูโคส.....	53
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานพื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของไซโลส.....	53
รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานพื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของอะราบิโนส.....	54
รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานพื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของเฟอร์ฟูรัล.....	54
รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานพื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของไฮดรอกซี เมทิลเฟอร์ฟูรัล.....	55

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกภาคส่วนตามนโยบายการพัฒนาพลังงานทดแทน นอกจากเป็นการลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ยังเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทน 9,025 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2556 ร้อยละ 9.6 และคิดเป็นร้อยละ 11.9 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย ส่งผลให้มีการลดการนำเข้าพลังงาน คิดเป็นมูลค่า 215,065.75 ล้านบาท (รายงานดุลยภาพพลังงานของประเทศไทย, 2557) การแสวงหาพลังงานอื่นๆ มาทดแทนจึงเป็นเรื่องที่สำคัญโดยเฉพาะการวิจัยและพัฒนาพลังงานทางเลือกต่างๆ เช่น พลังงานชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งการใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดทางด้านเทคนิค และต้องใช้เวลาในการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

พลังงานจากชีวมวล คือ พลังงานที่ได้จากอินทรีย์สารของพืชหรือสัตว์ ซึ่งได้แก่ พืชเกษตรกรรม พืชพลังงาน วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและอุตสาหกรรมการเกษตร รวมทั้งขยะอินทรีย์ และมูลสัตว์ พลังงานชีวมวลจัดเป็นพลังงานสีเขียวซึ่งสามารถนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมที่ใช้แล้วหมดไป ในบรรดาแหล่งพลังงานชีวมวลทั้งหลาย ชีวมวลที่มีปริมาณและศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นพลังงานมากที่สุด คือ วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส ซึ่งมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช แหล่งวัตถุดิบของลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ชานอ้อย แกลบ ฟางข้าว และซังข้าวโพด วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหาร และเศษกระดาษ ในประเทศไทยพบว่ามีชานอ้อยและฟางข้าวเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตรจำนวนมากในแต่ละปี ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบของลิกโนเซลลูโลสได้ (พลังงานจากชีวมวลที่มีพลังงานสูง, 2555)

ชานอ้อย คือ กากเหลือทิ้งจากกระบวนการหีบอ้อย จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ในปี พ.ศ. 2553 พบว่ามีชานอ้อยเหลือทิ้งเฉลี่ย 4,190,794 ตันต่อปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2558) เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ชานอ้อยแห้งประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 45 โดยมวล เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 27 โดยมวล และลิกนิน 30 โดยมวล ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสไปผลิตเป็นพลังงานทดแทนหรือผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่นการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีต่างๆ เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และใช้เซลลูโลสเป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำตาลและหมักเป็นเอทานอล

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นโดยน้ำเข้าไปสลายพันธะทำให้สารที่มีโมเลกุลใหญ่ย่อยสลายเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง การไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลสด้วยน้ำมีข้อดี คือ ไม่ใช้สารเคมีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการทำปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส จึงมีการใช้กรดเช่น สารละลายกรดซัลฟิวริก เพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลสและลดอุณหภูมิลง แม้ว่า การใช้กรดสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ค่อนข้างดี แต่กรดมีความเป็นพิษ มีฤทธิ์กัดกร่อน และก่อให้เกิดอันตรายได้ ดังนั้นในโครงการนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบวิธีการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อทำให้เกิดกรดคาร์บอนิก และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อทำให้เกิดกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสขานอ้อยเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว กรดคาร์บอนิกหรือกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกจะสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำหรือสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จึงสามารถลดขั้นตอนเพื่อกำจัดกรดภายหลังการไฮโดรไลซิส นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ปลอดภัยจากสารเคมีอันตราย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้ปริมาณสูงสุด

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบหลักทางเคมีของขานอ้อย ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
- 1.3.2 ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.3.3 วิเคราะห์ชนิดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.3.4 เปรียบเทียบผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.2 เตรียมตัวอย่างขานอ้อยปราศจากสารสกัดและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
  - 1.4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
  - 1.4.4 สรุปผลการดำเนินงานและจัดทำรายงาน
- 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ
- 1.5.1 ชี้ให้เห็นแนวทางในการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้แก่ขานอ้อย และแก้ไขปัญหาการกำจัดขยะชีวมวลที่ไม่มีประสิทธิภาพ
  - 1.5.2 สามารถประยุกต์ใช้วิธีการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กับวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรประเภทอื่นๆ ได้
  - 1.5.3 ชี้ให้เห็นความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากขานอ้อยที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวัสดุลิกโนเซลลูโลส เทคนิคต่างๆ ในการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลส น้ำตาลรีดิวซ์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและวิธีการไฮโดรไลซิสต่างๆ รวมถึงวิธีการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อัดในน้ำและสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงาน

#### 2.1 ลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลส คือ สารอินทรีย์ที่ได้จากผนังเซลล์ของพืช โครงสร้างมีลักษณะเชิงซ้อน ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งจากไม้ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ชานอ้อย แกลบ ฟางข้าว และซังข้าวโพด และวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากชุมชนหรือบ้านเรือน (อรุณี, 2555)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของลิกโนเซลลูโลส (Rabemanolontsoa และ Saka, 2008)

ลิกโนเซลลูโลส	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยมวล)			
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ*
พืชใบเลี้ยงคู่				
สนญี่ปุ่น	38.67	23.16	33.78	4.39
พืชญี่ปุ่น	43.94	28.43	24.02	3.60
พืชใบเลี้ยงเดี่ยว				
ไผ่	39.80	31.41	20.81	7.98
ฟางข้าว	34.53	21.82	20.22	23.42
ซังข้าวโพด	34.61	33.10	18.16	14.13
ชานอ้อย	40.92	33.01	22.33	3.74
ลำต้นปาล์ม	31.10	28.86	28.66	11.38

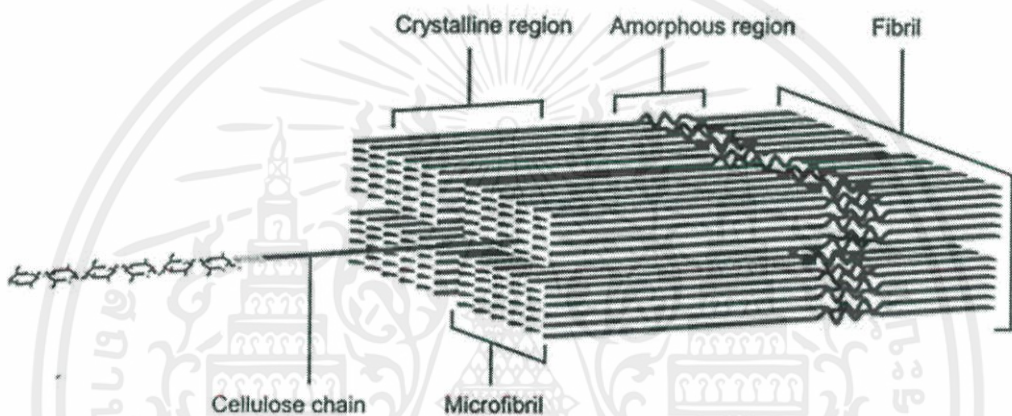
\*อื่นๆ ได้แก่ โปรตีน แป้ง สารสกัด และเถ้า

##### 2.1.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดในลิกโนเซลลูโลส พบอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในผนังเซลล์ของพืช ปริมาณเซลลูโลสในลิกโนเซลลูโลสแตกต่างกันขึ้นกับชนิดและส่วนของพืช เช่น ไม้เนื้อแข็งประมาณร้อยละ 40-50 โดยมวล และเส้นใยฝ้ายพบประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

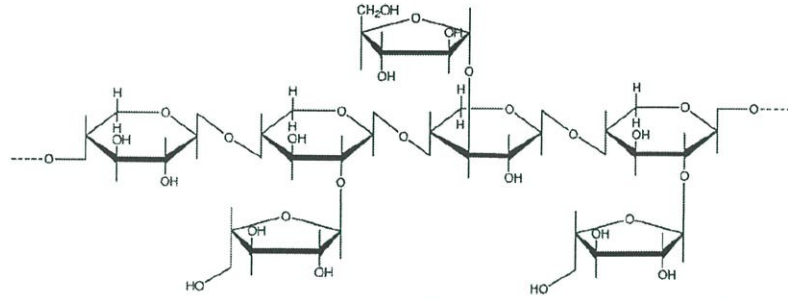
ร้อยละ 98 โดยมวล เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อย คือ เบต้า-D-กลูโคไพราโนส ( $\beta$ -D-Glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4-Glycosidic linkage) เกิดเป็นกลูแคน (Glucan) ในธรรมชาติ พบว่ามีความยาวประมาณ 10,000 หน่วย กลูแคนจะจัดเรียงตัวและยึดเหนี่ยวกันอย่างหนาแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นเส้นใยขนาดเล็กเรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) โดยทั่วไปในธรรมชาติพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ เซลลูโลสแบบผลึก และเซลลูโลสแบบกึ่งผลึก โดยส่วนของเซลลูโลสแบบผลึกจะถูกละลายด้วยปฏิกิริยาหรือเอนไซม์ยากกว่าเซลลูโลสแบบกึ่งผลึก โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเซลลูโลสแบบผลึกและเซลลูโลสแบบกึ่งผลึก (Desvaux, 2005)

### 2.1.2 เฮมิเซลลูโลส

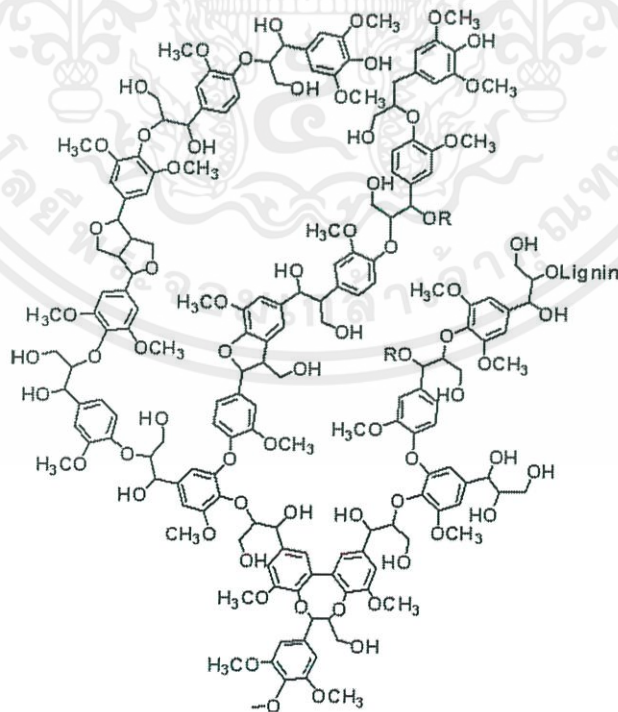
เฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ (Heteropolymer) ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด ได้แก่ ไซโลส อะราบินอส แมนโนส กลูโคส และกาแล็กโทส โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย เฮมิเซลลูโลสที่พบในวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร มีไซโลสเป็นองค์ประกอบหลักมากถึงร้อยละ 85-93 โดยไซโลสที่พบจะเชื่อมต่อกันเป็นสายไซไซแลน (Xylan) ด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก และมีน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ต่อเป็นโซ่กิ่ง ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (Amourphous) (Bobleter, 1994) น้ำตาลกรดและกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดกลูควิโรนิก กรดกาแล็กโทโรนิก และกรดอะซิติก สามารถตรวจพบได้เช่นกัน แต่มีปริมาณน้อย โครงสร้างของอะราบินอกลูโคโรโนไซแลน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะราบินอกลูโคโรโนไซแลน (Bastawde และคณะ, 1992)

### 2.1.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนขอบมุมของผนังเซลล์ของพืช มีปริมาณแตกต่างกันไปตามชนิดพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนประกอบที่ช่วยป้องกันเซลล์ไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ โครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนเชื่อมต่อกันแบบสุ่ม ซึ่งทำให้เกิดลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติ ด้วยพันธะอีเทอร์ พันธะเอสเทอร์ หรือพันธะระหว่างคาร์บอน 2 โมเลกุล เนื่องจากความซับซ้อนและลักษณะความไม่มีซ้ำของโมเลกุล ทำให้ลิกนินมีความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์ โครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของลิกนิน (Lignin, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วิธีการปรับสภาพทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลส

วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพ คือ การกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส ลดความเป็นผลึก เพิ่มความเป็นรูพรุนของวัสดุ และเพิ่มพื้นที่ผิวเซลลูโลส เพื่อให้เอนไซม์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสได้อย่างสมบูรณ์ (Zheng และคณะ, 2009)

### 2.2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ

หลักการของวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ คือ ทำให้ลิกโนเซลลูโลสอิมัตว์ด้วยไอน้ำภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง จากนั้นลดความดันลงทันทีทำให้น้ำระเหยออกจากโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เส้นใยของเซลลูโลสแยกออกจากกัน และเฮมิเซลลูโลสบางส่วนถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลรีดิวิซ์ ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในขั้นตอนถัดไป และช่วยลดการเกิดสารที่เป็นตัวยับยั้งในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Ragg และ Fields, 1987)

### 2.2.2 การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์คล้ายกับการระเบิดด้วยไอน้ำ เป็นการใช้กรดคาร์บอนิกที่เกิดจากการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ กรดคาร์บอนิกจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวทำละลายสารอินทรีย์ร่วมด้วย เช่น เอทานอล เพื่อช่วยในการขจัดลิกนิน วิธีการนี้ได้ผลผลิตต่ำกว่าการใช้ไอน้ำ แต่ไม่เกิดตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสเหมือนวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Ragg และ Fields, 1987)

### 2.2.3 การใช้น้ำร้อนอัดความดัน

วิธีการนี้ใช้น้ำอุณหภูมิ 160-240 องศาเซลเซียส ที่ความดันสูงกว่าความดันอิมัตว์สำหรับการไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลส โดยทั่วไปใช้ความดันมากกว่า 5 เมกะปาสคาล วิธีการนี้ทำให้เกิดน้ำตาลรีดิวิซ์ผสมโดยมีโอลิโกแซ็กคาไรด์เป็นผลิตภัณฑ์หลัก Mosier และคณะ (2005) รายงานว่าหากเติมกรดในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสด้วยน้ำร้อนอัดความดันเพื่อปรับพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 4-7 สามารถผลิตไซโลสได้มากถึงร้อยละ 88-90 โดยมวล และลดการรวมตัวของน้ำตาลรีดิวิซ์เป็นพอลิเมอร์ใหม่อีกครั้ง นอกจากนี้การไฮโดรไลซิสด้วยวิธีน้ำร้อนอัดความดันทำให้เกิดสารยับยั้งซึ่งขัดขวางการเติบโตของจุลินทรีย์ปริมาณน้อย เช่น เพอร์ฟูรัล ไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟูรัล และกรดคาร์บอกซิลิก

## 2.2.4 การใช้น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูงกว่า 5 เมกะปาสคาล ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิกละลายอยู่ในน้ำ และสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสพอลิแซ็กคาไรด์เป็นมอโนแซ็กคาไรด์ได้ในช่วงอุณหภูมิ 150-230 องศาเซลเซียส มีรายงานว่าผลได้ของไซโลสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากการไฮโดรไลซิสไซแลนด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีน้ำร้อนอัดความดัน (Van Walsum และคณะ, 2004; Miyazawa และ Funazukuri, 2005) การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นทางเลือกที่ปลอดภัยจากสารเคมีอันตรายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ต้องเติมกรดหรือด่าง และช่วยลดความจำเป็นของขั้นตอนการแยกโดยกรดคาร์บอนิกสามารถสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำหลังการทำปฏิกิริยา

## 2.2.5 การใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการนี้คล้ายกับการใช้น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์แทนน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในวัฏภาคของเหลวจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เกิดเป็นกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก และสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดได้ ซึ่งมีความรุนแรงของกรดมากกว่ากรดคาร์บอนิก วิธีการใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้ไม่พบว่าเคยถูกนำมาใช้ในการไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลส แต่มีการนำไปใช้เพื่อทำปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติดัดแปลงที่มีหมู่ปลายไฮดรอกซิล (Hydroxyl Telechelic liquid Natural Rubber: HTNR) ที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส และความดัน 12 เมกะปาสคาล (Thidarat และคณะ, 2015) แต่กรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นมีความเสถียรต่ำ โดยจะสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ (Nolen และคณะ, 2002)

## 2.2.6 การใช้น้ำที่ภาวะเหนือหรือใต้วิกฤต

น้ำที่ภาวะเหนือหรือใต้วิกฤต (อุณหภูมิวิกฤต 374.2 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤต 22.1 เมกะปาสคาล) เป็นของผสมระหว่างวัฏภาคของเหลวและก๊าซ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) มีค่าลดลง ทำให้เพิ่มสมบัติของสารที่ไม่สามารถแตกตัวให้อิออนได้ หรือเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic) และมีค่าไอออนิกโปรดักต์ (Ionic product) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำที่ภาวะดังกล่าวสามารถกลายเป็นแหล่งจ่ายไฮโดรเจนและไอออนไฮดรอกไซด์ได้ การใช้น้ำที่ภาวะเหนือหรือใต้วิกฤตในการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสจึงสามารถเกิดไฮโดรไลซิสได้เสมือนมีตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อัตราการเกิดไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน ปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งได้แก่การเกิดปฏิกิริยาดังน้ำออกจากโมเลกุลน้ำตาล (Dehydration) และปฏิกิริยาการแตกโมเลกุล (Fragmentation) สามารถเกิดขึ้นภายใต้ภาวะดังกล่าวเช่นกัน ทำให้ผลได้ของน้ำตาลลดลงอย่างมาก หากไม่มีการควบคุมภาวะการทำปฏิกิริยาที่ดี (Lu และคณะ, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.7 การปรับสภาพโดยใช้กรด

กระบวนการปรับสภาพโดยใช้กรดมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดลิกนินออกจากโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสเพิ่มพื้นที่ผิวของเซลลูโลส และผลิตภัณฑ์ให้ได้มากขึ้นในขั้นตอนถัดไปซึ่งได้แก่การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ ชนิดของกรดที่นำมาปรับสภาพมีหลายประเภท เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก หรือ กรดฟอสฟอริก ในกระบวนการแปลงสภาพสามารถใช้ได้ทั้งกรดเข้มข้นและเจือจางเพื่อเพิ่มการทำงานของกระบวนการไฮโดรไลซิส (Palmqvist และคณะ, 2002) การใช้สารละลายกรดเจือจางเพื่อปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสมักถูกใช้เพื่อไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลรีดิวิซ์ ตามด้วยการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคส (Silverstein และคณะ, 2007)

### 2.2.8 การปรับสภาพโดยใช้ด่าง

กลไกการทำงานของด่างในการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ การทำให้เกิดการพองตัวของโมเลกุลและพันธะภายในของไซแลนในเฮมิเซลลูโลส ซึ่งความพรุนของวัสดุจะเพิ่มขึ้นได้เพราะสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันภายในของโมเลกุลถูกทำลาย การใช้ด่างเจือจางในการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสมีผลทำให้เกิดการบวมภายใน ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการไฮโดรไลซิส เพิ่มความพรุนในวัสดุลิกโนเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังสามารถทำลายพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของลิกนิน และทำลายพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของลิกนินกับเฮมิเซลลูโลส ต่างที่นิยมใช้ในการแยกลิกนิน ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (Kim และคณะ, 2008)

### 2.2.9 การย่อยเปียก

วิธีการนี้ใช้ออกซิเจนและอากาศเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำภายใต้แรงดันและระยะเวลาสั้น โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิ 170-200 องศาเซลเซียส ความดันระหว่าง 1.0-1.2 เมกะปาสคาล และเวลา 10-15 นาที (Ogbonna และคณะ, 2001) จากงานวิจัยของ Mishima และคณะ (2006) พบว่าการย่อยเปียกมีประสิทธิภาพต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และทำให้ผลได้ของเซลลูโลสในกากของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น วิธีการนี้นิยมใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอลแบบการย่อยให้เป็นน้ำตาลพร้อมการหมัก (Simultaneous saccharification and fermentation: SSF)

## 2.3 น้ำตาลรีดิวิซ์

น้ำตาลรีดิวิซ์ คือ น้ำตาลที่มีหมู่อัลดีไฮด์หรือคีโตนอิสระ ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวิซ์ได้ น้ำตาลที่ถูกจัดอยู่ในรูปน้ำตาลรีดิวิซ์ ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทุกชนิด ได้แก่ อะราบิโนส โซโลส กลูโคส กาแล็กโทส และแมนโนส เป็นต้น และน้ำตาลโมเลกุลคู่ หรือน้ำตาลหลายโมเลกุลบางชนิดที่อยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายโซ่เปิดซึ่งเผยหมู่อัลดีไฮด์หรือคีโตนอิสระออกมา เช่น เซลโลโบไอส แล็กโทส และมอลโทส เป็นต้น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โมเลกุลคู่ และหลายโมเลกุลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลสล้วนเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ดังนั้นปริมาณน้ำตาลจากลิกโนเซลลูโลสในไฮโดรไลเซท (Hydrolysates) จึงสามารถรายงานในรูปน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมด (Total reducing sugars, TRS) (Campbell และ Farrell, 2012; Nelson, 1994; Miler, 1959)

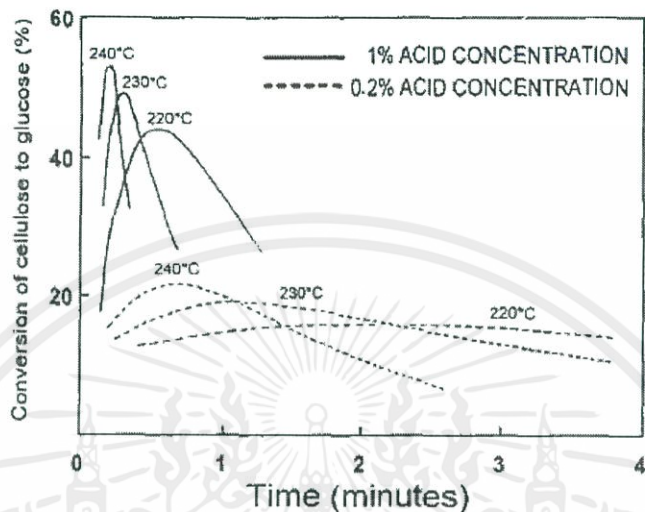
## 2.4 การไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลส

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ ปฏิกิริยาที่น้ำเข้าไปสลายพันธะ ทำให้สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ย่อยสลายเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง สามารถเกิดขึ้นได้โดยมีน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ตั้งแต่ 170 องศาเซลเซียส และ 5 เมกะปาสคาล หรืออาจใช้กรดหรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เช่นกัน การไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลสมีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายโครงสร้างและตัดสายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้สั้นลง ไฮโดรไลเซทที่จะได้ประกอบด้วยน้ำตาลรีดิวซ์หลายชนิด โดยชนิดและอัตราส่วนของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและภาวะในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Bosch และคณะ, 2010) น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้สามารถนำไปหมักเป็นเอทานอลในขั้นตอนถัดไป การไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลส และอะราบิโนส น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ประกอบด้วยคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส กาแล็กโทส และแมนโนส และน้ำตาลหลายโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่ในรูปพอลิเมอร์ของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านี้ ส่วนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว คือ กลูโคส และน้ำตาลหลายโมเลกุลอื่นๆ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส เช่น เซลโลโบไอส (Cellulobiose) เซลโลไตรไอส (Cellotriose) เซลโลเตตระไอส (Cellotetraose) เป็นต้น

### 2.4.1 การไฮโดรไลซิสด้วยกรด

กรดอินทรีย์ (กรดแก่) ที่สามารถนำมาใช้ในการไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดฟอสฟอริก นอกจากนี้อาจใช้กรดอินทรีย์ (กรดอ่อน) ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลิก เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ในการไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลสได้เช่นเดียวกัน ความเข้มข้นและชนิดของกรดสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส โดยส่วนใหญ่นิยมใช้กรดซัลฟิวริกเนื่องจากมีราคาถูก และให้ผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์สูง จากตัวอย่างการไฮโดรไลซิสกระดาษด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล พบว่าสามารถผลิตกลูโคสได้ร้อยละ 50 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 10 วินาที ซึ่งสูงกว่าการไฮโดรไลซิสกระดาษด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยมวล ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (Fagan และคณะ, 1971) หากเพิ่มความเข้มข้นของกรดก็จะสามารถลดอุณหภูมิในการไฮโดรไลซิสลงได้ นอกจากนี้การไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดจะทำให้เกิดผลพลอยได้หลายชนิด เช่น เฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซี

เมทิลเฟอร์ฟูรัล ซึ่งเกิดจากการกำจัดน้ำออกจากโมเลกุลของน้ำตาล และมีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในขั้นตอนการหมัก (Kumar และคณะ, 2015)



รูปที่ 2.4 ผลได้ของกลูโคสจากการไฮโดรไลซิสกระดาษด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 0.2 โดยมวล ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (Fagan และคณะ, 1971)

#### 2.4.2 การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์

การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ปริมาณมาก และไม่เกิดผลพลอยได้ เช่น เฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล ที่มีฤทธิ์ยับยั้งการหมักน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อผลิตเอทานอล เอนไซม์สำคัญที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส ได้แก่ เซลลูเลส (Cellulase) เนื่องจากเอนไซม์มีความจำเพาะในการทำปฏิกิริยา ในกระบวนการการไฮโดรไลซิสจึงใช้เอนไซม์หลายชนิด ได้แก่ เอนไซม์เอนโดเซลลูเลส (Endocellulase) จะทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่กลูแคนในเซลลูโลส ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสถูกทำลาย เกิดเป็นสายโซ่กลูแคนอิสระ เอนไซม์เอกโซเซลลูเลส (Exocellulase) จะไฮโดรไลซิสสายโซ่กลูแคนให้สั้นลง เกิดเป็นเซลโลไบโอส และเอนไซม์เบต้าไกลโคซิเดส ( $\beta$ -glycosidase) จะไฮโดรไลซิสเซลโลไบโอสเกิดเป็นกลูโคส (Yu และคณะ, 2008)

#### 2.5 การเกิดกรดคาร์บอนิกในน้ำ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำและเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 กรดคาร์บอนิกสามารถแตกตัวครั้งที่ 1 เป็นไอออนไบคาร์บอเนตและไอออนไฮโดรเนียม และไอออนไบคาร์บอเนตสามารถแตกตัวครั้งที่ 2 เป็นไอออนคาร์บอเนตและไอออนไฮโดรเนียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.3 และ 2.4 แสดงการแตกตัวของกรดคาร์บอนิกครั้งที่ 1 และ 2 (Carbonic acid and Carbonate Salts, 2017)



การแตกตัวของกรดครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าคงที่การแตกตัว คือ  $K_{a1}$  และ  $K_{a2}$  ตามลำดับ โดย  $K_{a1}$  มีค่าเท่ากับ  $4.5 \times 10^{-7}$  สูงกว่า  $K_{a2}$  ที่มีค่าเท่ากับ  $4.7 \times 10^{-11}$  ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2004) เมื่อเพิ่มความดันในระบบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดกรดคาร์บอนิกเพิ่มขึ้น และสารละลายมีค่าพีเอชต่ำลง แต่ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกได้ลดลง เนื่องมาจากค่าคงที่สมดุลการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ (Science HSC, 2013)

## 2.6 สมดุลการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ

เมื่อพิจารณาระบบปิดที่ประกอบด้วย 2 ภูมิภาค ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่อุณหภูมิห้องและความดันรวมของระบบเท่ากับ  $P_{\text{Total}}$  โดยสมมติว่าน้ำระเหยได้น้อยมาก ดังนั้น ความดันรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $P_{\text{CO}_2}$ ) ความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นกับอุณหภูมิและความดันรวมของระบบ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำและความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อธิบายได้ด้วยกฎของเฮนรี (Henry's Law) ดังแสดงในสมการที่ 2.5 โดยนิยามตัวแปร  $H$  คือ ค่าคงที่เฮนรี  $P_{\text{CO}_2}$  คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ  $x_{\text{CO}_2}$  คือ สัดส่วนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภูมิภาคของเหลว (น้ำ) (Smith และคณะ, 2005)

จากสมมติฐานว่าน้ำระเหยได้น้อยมากที่อุณหภูมิห้องและความดันรวมของระบบเท่ากับ  $P_{\text{Total}}$  ในกรณีนี้ความดันรวมในระบบจะเท่ากับความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปถึงค่าๆ หนึ่งซึ่งทำให้น้ำระเหยไปสู่ภูมิภาคก๊าซได้ ความดันรวมของระบบจะเท่ากับความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมกับความดันย่อยของน้ำในภูมิภาคก๊าซ ดังแสดงในสมการที่ 2.6 โดยนิยามตัวแปร  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  คือ ความดันย่อยของน้ำ  $P_{\text{Total}}$  คือ ความดันรวมของระบบ  $y_{\text{CO}_2}$  คือ

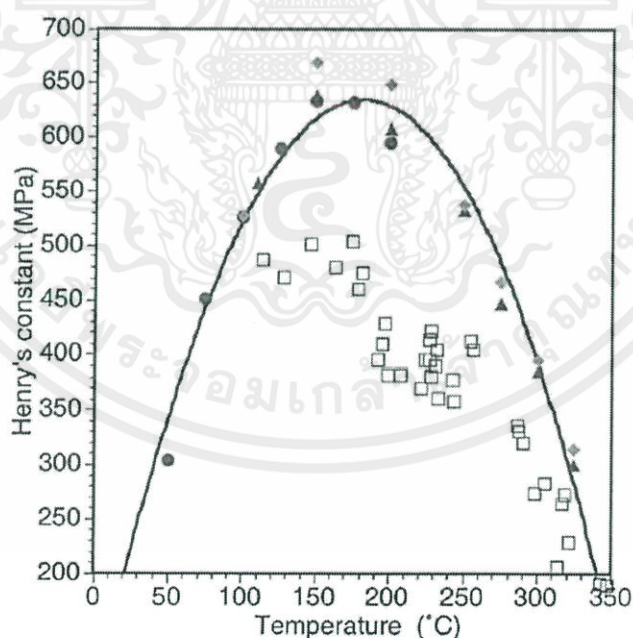
สัดส่วนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซ และ  $y_{\text{H}_2\text{O}}$  คือ สัดส่วนโมลของน้ำในวัฏภาคก๊าซ

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5 ค่าคงที่เฮนรีบ่งบอกความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคก๊าซต่อ 1 หน่วยสัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏภาคของเหลว ดังนั้นในเชิงทฤษฎี หากต้องการให้วัฏภาคของเหลวประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 100 จะต้องทำให้ระบบมีความดันเท่ากับค่าคงที่เฮนรี ณ อุณหภูมินั้น

$$P_{\text{CO}_2} = x_{\text{CO}_2}H \quad (2.5)$$

$$P_{\text{CO}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{total}}(y_{\text{CO}_2} + y_{\text{H}_2\text{O}}) = P_{\text{total}} \quad (2.6)$$

จากรายงานวิจัยของ Walsum (2001) ที่ศึกษาพฤติกรรมสมดุลการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำโดยพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิ พบว่าค่าคงที่เฮนรีซึ่งแสดงความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่เฮนรีที่ได้จากการทดลอง (จุดข้อมูล) สัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันแบบพาราโบลา แสดงดังเส้นทึบ



รูปที่ 2.5 ค่าคงที่เฮนรีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ (Van Walsum, 2001)

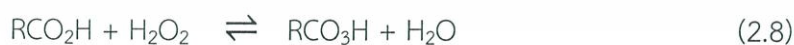
สมการที่ 2.7 แสดงฟังก์ชันพาราโบลาระหว่างค่าคงที่เฮนรีกับอุณหภูมิดังกล่าว โดย T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และ H คือ ค่าคงที่เฮนรี (เมกะปาสคาล) ซึ่งสามารถใช้ประมาณค่าคงที่เฮนรีที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 20-350 องศาเซลเซียส

$$H = -0.017037T^2 + 6.1553T + 78.227 \quad (2.7)$$

จากรูปที่ 2.5 และสมการที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส ค่าคงที่เฮนรีมีค่าสูง คือ ประมาณ 630 เมกะปาสคาล ดังนั้นหากต้องการเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ จึงต้องเพิ่มความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะสามารถเพิ่มความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวได้โดยอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูงสุดเท่ากับความดันในถังก๊าซ คือ 5 เมกะปาสคาล ณ อุณหภูมิห้อง ในขั้นตอนการบรรจุขานอ้อยและน้ำหรือสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์

## 2.7 การเกิดกรดเพอร์ออกซี

กรดเพอร์ออกซี คือ กรดที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน  $-OOH$  โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ กรดเพอร์ออกซีอนินทรีย์ (Inorganic peroxy acid) และกรดเพอร์ออกซีอินทรีย์ (Organic peroxy acid) กรดเหล่านี้สามารถทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรงได้ กรดเพอร์ออกซีอนินทรีย์ เช่น กรดเพอร์ออกซีมอโนซัลฟิวริกใช้ในการฟอกขาวกระดาษ และการกำจัดไซยาไนด์ออกจากกระบวนการในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ (Jakob และคณะ, 2012) ส่วนกรดเพอร์ออกซีอินทรีย์สามารถเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์กับกรดอินทรีย์ เช่น กรดเพอร์ออกซีคาร์บอกซิลิก ซึ่งเตรียมจากกรดคาร์บอกซิลิก ดังแสดงในสมการที่ 2.8 ความเสถียรของกรดเพอร์ออกซีอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล (Brandsch และ Piringer, 2000) แต่กรดเพอร์ออกซีคาร์บอกซิลิกจะมีค่าคงที่การแตกตัวของกรดต่ำกว่ากรดคาร์บอนิกที่ใช้เป็นสารตั้งต้นประมาณ 1,000 เท่า เนื่องจากอิเล็คตรอนของโมเลกุลที่มีประจุลบขาดความเสถียรในการเคลื่อนที่ (Resonance instabilization of anion) (Klenk และคณะ, 2012)



การอัดสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดัน 5-12 เมกะปาสคาล สามารถทำให้เกิดกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกได้ดังแสดงในสมการที่ 2.9 กรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกเป็นสารออกซิไดส์ที่มีความรุนแรงกว่าไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Brandsch และ Piringer, 2000) แต่ด้วยคุณสมบัติที่ไม่เสถียร จึงไม่สามารถแยกกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกให้อยู่ในรูป

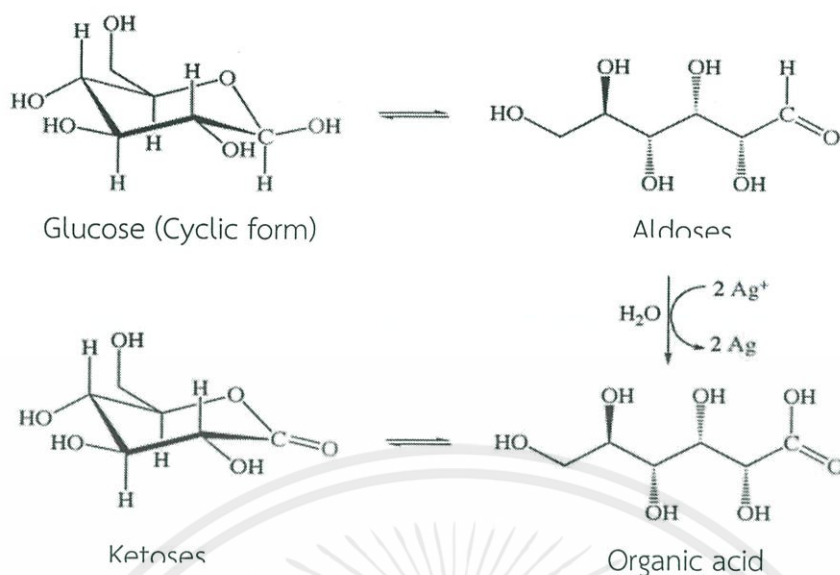
สารบริสุทธิ์ได้ โดยต้องเตรียมกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกจากการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงใน สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และใช้ในทันที (Nolen และคณะ, 2002)



จากงานวิจัยของ Thidarat และคณะ (2015) ที่ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติดัดแปลงที่มีหมู่ปลายไฮดรอกซิลโดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดัน 12 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่ากรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดส์ยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติดัดแปลงที่มีหมู่ปลายไฮดรอกซิล ซึ่งมีมวลโมเลกุลลดลงจาก  $1.9 \times 10^4$  กรัมต่อโมล เป็น  $4.2 \times 10^3$  กรัมต่อโมล จากคุณสมบัติในการย่อยสลายโมเลกุลพอลิเมอร์ของกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก งานวิจัยนี้จึงนำวิธีการอัดสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้ในการไฮโดรไลซิสขานอ้อยเพื่อศึกษาผลของกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

## 2.8 ปฏิกริยาออกซิเดชันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

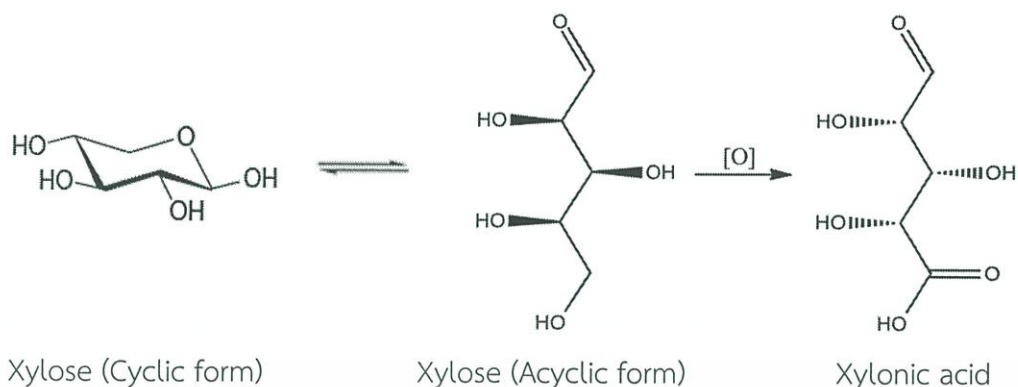
โมเลกุลของกลูโคสสามารถเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเปลี่ยนจากโครงสร้างในรูปวงปิดซึ่งมีสมบัติเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ไปเป็นโครงสร้างในรูปโซ่ตรงได้ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซีที่ปลายรีดิวซ์ (Reducing end) จะเปลี่ยนเป็นอัลดีไฮด์เกิดเป็นน้ำตาลอัลโดส น้ำตาลที่มีหมู่อัลดีไฮด์นี้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เงิน เปลี่ยนหมู่อัลดีไฮด์เป็นหมู่คาร์บอกซิลิก เกิดอนุพันธ์กรดอินทรีย์ของน้ำตาลกลูโคสได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



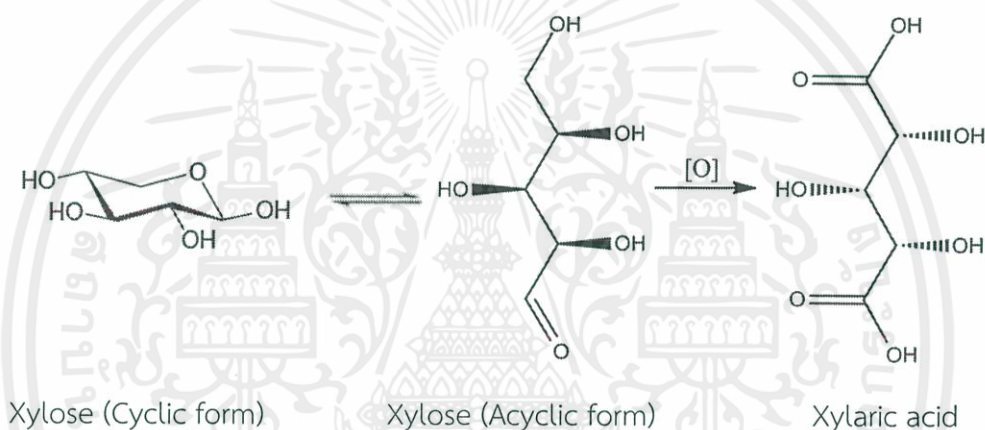
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของน้ำตาลกลูโคส (Shapley, 2012)

โครงสร้างโมเลกุลของไซโลสสามารถเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้เช่นเดียวกัน โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างในรูปวงปิดซึ่งมีสมบัติเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ ไปเป็นโครงสร้างในรูปโซ่ตรงซึ่งมีหมู่อัลดีไฮด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นอนุพันธ์กรดอินทรีย์ของไซโลสได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ จากการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองคำ แพลเลเดียม หรือทองแดง ที่อุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส ไซโลสจะเปลี่ยนเป็นกรดไซโลนิก (Xylonic acid) นอกจากนี้ยังพบผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไซโลส ได้แก่ ซิลิทอล (Xylitol) กรดไซลาริก (Xylaric acid) ไตรไฮดรอกซีไดแอซิด (Trihydroxydiacid) กรดไทรโรนิก (Threonic acid) กรดอะซิติก (Acetic acid) และกรดฟอร์มิก (Formic acid)

รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของไซโลสเป็นกรดไซโลนิก และรูปที่ 2.8 แสดงปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของไซโลสเป็นกรดไซลาริก การไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลสมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส และไซโลส เป็นผลิตภัณฑ์ หากเติมสารออกซิไดส์ในกระบวนการไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลสดังกล่าว นอกจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวถูกออกซิไดส์กลายเป็นอนุพันธ์กรดอินทรีย์ได้



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของไซโลสเป็นกรดไซโลนิก (Hernandez, 2013)



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและออกซิเดชันของไซโลสเป็นกรดไซลาริก (Hernandez, 2013)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาเกี่ยวกับการไฮโดรไลซิส ลิกโนเซลลูโลสภายใต้ภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ น้ำที่ภาวะเหนือหรือใต้วิกฤต น้ำร้อนอัด ความดัน การระเบิดด้วยไอน้ำ และภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งประเภทกรดและด่าง โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอรอกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเปรียบเทียบผลได้น้ำตาลรีดิวซ์กับการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน สำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสรุปได้ดังนี้

Sluiter และคณะ (2010) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชีวมวล ด้วยหลักการย่อยสลายด้วยน้ำ โดยใช้กรดซัลฟิวริกในการแยกลิกนิน วิธีการดังกล่าวใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 72 โดยมวล เพื่อไฮโดรไลซ์ชีวมวลในขั้นตอนแรกซึ่งทำให้อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ จากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือจางสารละลายกรดโดยการเติมน้ำลงในระบบและให้ความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 100-125 องศาเซลเซียส เพื่อทำปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำตาลหลายโมเลกุลที่ถูกไฮโดรไลซ์ในขั้นต้นให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทั้งหมด ไฮโดรไลเซทที่ได้จะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสของชีวมวลที่ศึกษา สำหรับกากของแข็งที่เหลือหลังการย่อยสลายด้วยน้ำ จะถูกแยกออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ น้ำหนักกากของแข็งหลังอบแห้งสามารถนำมาคำนวณร้อยละของลิกนินได้ วิธีการนี้เป็นที่ยอมรับและถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุลิกโนเซลลูโลสและมีความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีอื่น

Phaiboonsilpa และคณะ (2009; 2011; 2013) ศึกษาการแปลงทางเคมีของลิกโนเซลลูโลสด้วยน้ำร้อนอัดความดันแบบ 2 ขั้นตอน ตัวอย่างที่ศึกษา ได้แก่ ปิซญูปุ่น สนญูปุ่น ทางจาก ฟางข้าว และแกลบ ซึ่งครอบคลุมประเภทของพืชที่มีท่อลำเลียง (Vascular plants) ทั้งหมด ในการทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน (Flowthrough reactor) ที่ความดัน 10 เมกะปาสคาล ระยะเวลาในการไฮโดรไลซิส 60 นาที และอัตราการไหลของน้ำร้อนอัดความดัน 10 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในขั้นตอนที่ 1 และ 2 มีค่าแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซิสของเฮมิเซลลูโลส คือ 230 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลส คือ 270-280 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าเฮมิเซลลูโลสเกือบทั้งหมดถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลรีดิวิซ์ และเซลลูโลสร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลรีดิวิซ์

Rahman และคณะ (2007) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซิสทะลายปาล์มด้วยกรดเพื่อผลิตไซโลส ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการไฮโดรไลซิส และความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก โดยใช้อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียส เวลา 30-90 นาที และความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 2-6 โดยมวล พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับไซโลส คือ อุณหภูมิ 119 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกร้อยละ 2 โดยมวล ได้ปริมาณไซโลสมากถึงร้อยละ 91.27 โดยมวล

Zhang และ Wu (2013) ศึกษาการปรับสภาพขานอ้อยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ใต้อากาศอัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ โดยใช้ความดัน 1-5 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 140-180 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 60-100 นาที พบว่าเมื่อปรับสภาพขานอ้อยด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ใต้อากาศอัด ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และความดัน 5 เมกะปาสคาล ระยะเวลา 100 นาที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์โดยใช้ขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ร้อยละผลได้สูงสุดของไซโลแซ็กคาไรด์เท่ากับ 15.78 โดยมวล ซึ่งประกอบด้วยไซโลสร้อยละ 3.16 โดยมวล และไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ร้อยละ 12.62 โดยมวล และร้อยละผลได้สูงสุดของกลูโคสเท่ากับ 37.99 โดยมวล ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 91.87 โดยมวล ของปริมาณกลูโคสทั้งหมดในองค์ประกอบของขานอ้อย งานวิจัยนี้แสดงความเป็นไปได้และภาวะที่เหมาะสมของการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ความดันสูงสำหรับการไฮโดรไลซิสขานอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Walsum และคณะ (2001) ศึกษาการไฮโดรไลซิสไซแลนจากไม้ปี้ชด้วยกรดคาร์บอนิก การทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 15 มิลลิลิตร บรรจุไซแลนน้ำหนัก 1 กรัมต่อลิตร และอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดัน 0-5.5 เมกะปาสคาล โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 170-230 องศาเซลเซียส และเวลา 2-30 นาที พบว่ากรดคาร์บอนิกสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อเปลี่ยนไซแลนเป็นไซโลสได้ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดซัลฟิวริกเจือจาง พบว่าการใช้กรดคาร์บอนิกมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่ำกว่าการใช้กรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 14.5 นาที ถึงแม้ว่าความดันภายในของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดคาร์บอนิกจะมีค่าสูงถึง 14 เมกะปาสคาลก็ตาม

Walsum และคณะ (2004) ศึกษาการใช้กรดคาร์บอนิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสซังข้าวโพด ขนาดอนุภาคของซังข้าวโพด 0.5-1 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตร 15 มิลลิลิตร อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดัน 5.5 เมกะปาสคาล อุณหภูมิในการไฮโดรไลซิส 180-220 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 2-32 นาที พบว่าการใช้กรดคาร์บอนิกสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสได้ ผลได้ของไซโลสในไฮโดรไลเซชันมีค่าสูงขึ้นประมาณ 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรไฮโดรไลซิสโดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียว

จากทฤษฎีและการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น โครงการนี้จึงศึกษาการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งคาดว่ากรดคาร์บอนิกและกรดเพอร์ออกซิคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสขานอ้อยเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับกรไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดัน นอกจากนี้คาดว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะมีความแตกต่างกัน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้ศึกษาการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อผลิตน้ำตาลรีตีวซ์ โดยมีวิธีการดำเนินงานดังต่อไปนี้

#### 3.1 การเตรียมชานอ้อย

##### 3.1.1 การลดขนาดชานอ้อย

ชานอ้อยที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นอ้อยพันธุ์สิงคโปร์ เพาะปลูกในจังหวัดสุพรรณบุรี ก่อนนำไปใช้ในการทดลองต้องผ่านการสกัดด้วยอะซิโตนและน้ำร้อนเพื่อกำจัดสารสกัดต่างๆ ในชานอ้อยออก ให้เหลือเพียงองค์ประกอบหลักของลิกโนเซลลูโลส โดยมีวิธีการเตรียมตัวอย่างชานอ้อยดังนี้ (Rabemanolontsoa และคณะ, 2013)

##### วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องปั่นอาหาร
2. ชุดตะแกรงร่อนขนาด

##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ล้างชานอ้อยด้วยน้ำสะอาด และนำไปผึ่งแดดจนแห้งสนิท
2. ตัดชานอ้อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร และนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นอาหาร
3. นำชานอ้อยในข้อ 2 มาคัดแยกขนาดด้วยชุดตะแกรงร่อนขนาด (Mesh sieving) โดยขนาดชานอ้อยที่ต้องการคือ 425-850 ไมโครเมตร

##### 3.1.2 การสกัดด้วยอะซิโตน

การสกัดด้วยอะซิโตนเป็นการกำจัดสารสกัดประเภทที่ไม่มีขั้ว (Non-polar extractives) เช่น คลอโรฟิลล์ สารสกัดไขมัน และน้ำมันออกจากชานอ้อย โดยใช้เครื่องสกัดแบบซ็อกเลต (Soxhlet extractor) โดยมีวิธีการดังนี้

##### วัสดุและอุปกรณ์

1. ชานอ้อยที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว
2. อะซิโตน
3. เครื่องสกัดแบบซ็อกเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ถาดอะลูมิเนียม
5. จานให้ความร้อน (Hotplate)

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งเครื่องสกัดแบบซ็อกเลตโดยเติมอะซิโตนปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ในขวดก้นกลม และใส่ขานอ้อยที่ผ่านการคัดขนาดแล้วลงในหลอดกระดาษกรอง
2. ให้ความร้อนอะซิโตนด้วยเตาให้ความร้อน รอจนอะซิโตนเดือดและควบแน่นหยดลงในหลอดกระดาษกรอง จับเวลา 8 ชั่วโมง
3. นำขานอ้อยที่สกัดด้วยอะซิโตนแล้วเกลี่ยใส่ถาดอะลูมิเนียม จากนั้นตั้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
4. นำขานอ้อยจากข้อ 3 ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง เพื่อระเหยอะซิโตนออกจนหมด

#### 3.1.3 การสกัดด้วยน้ำร้อน

การกำจัดสารประเภทที่มีขั้ว (Polar extractive) เช่น น้ำตาลอิสระ ไอออนอิสระ และสารประกอบเกลือออกจากขานอ้อยด้วยน้ำร้อน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ต้มน้ำกลั่นด้วยเตาให้ความร้อน จนได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. เทขานอ้อยลงในบีกเกอร์ที่ใส่น้ำกลั่นและควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส คนด้วยแท่งแก้วคนสารให้ขานอ้อยกระจายตัวในน้ำกลั่นอย่างทั่วถึง จากนั้นต้มขานอ้อยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พร้อมปั่นกวนด้วยตัวกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
4. ปิดเตาให้ความร้อนแล้วปล่อยให้ของผสมเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองแยกขานอ้อยออกด้วยชุดกรองสุญญากาศ (Vacuum filter)
5. อบขานอ้อยที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อขานอ้อยเย็นตัวลงแล้ว เก็บในถุงซิปล็อคเพื่อป้องกันความชื้น
6. อบขานอ้อยปราศจากสารสกัดก่อนการทดลองที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนการทดลอง และใช้น้ำหนักหลังจากการอบแห้งนี้เป็นมาตรฐานในการคำนวณ

#### 3.2 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อย

ขานอ้อยเป็นวัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส ซึ่งมีองค์ประกอบได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน นอกจากนี้ยังอาจพบสารอื่นๆ เช่น คลอโรฟิลล์ ไขมัน น้ำมัน น้ำตาลอิสระ ไอออนอิสระ และเถ้าในลิกโนเซลลูโลส โดยทั่วไปสารเหล่านี้มีปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากขานอ้อยที่นำมาวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบผ่านการสกัดด้วยอะซิโตนและน้ำร้อนแล้ว ทำให้สารเหล่านี้ไม่หลงเหลือในขานอ้อย ยกเว้นเถ้าซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของผนังเซลล์พืชและสกัดออกไม่ได้ ด้วยตัวทำละลายที่กล่าวไปข้างต้น ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อยที่วิเคราะห์ คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า

### 3.2.1 การวิเคราะห์เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธีเคลซอนลิกนิน

#### วัสดุและสารเคมี

1. ขานอ้อยปราศจากสารสกัด
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 72 โดยน้ำหนัก
3. น้ำกลั่น

#### อุปกรณ์

1. ขวดตัวอย่างขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร
4. หม้อนึ่งอัดไอน้ำ (Autoclave)
5. โถดูดความชื้น (Desiccator)
6. กรวยแก้ว
7. แ่งแก้ว
8. ชุดกรองสุญญากาศ
9. กระดาษกรองขนาดรูพรุน 8 ไมโครเมตร (Whatman เบอร์ 4)

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. อบขานอ้อยที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำออกจากเตาอบ และทิ้งให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักขานอ้อยประมาณ 0.2 กรัม แล้วเทลงในปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. ปิเปตกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 72 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในปีกเกอร์ข้อที่ 2 คนขานอ้อยและกรดซัลฟิวริกด้วยแ่งแก้วให้เข้ากัน ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
4. ตวงน้ำกลั่นปริมาตร 75 มิลลิลิตร ใส่ในปีกเกอร์ที่เตรียมรอไว้ เมื่อครบ 2 ชั่วโมง เทน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในปีกเกอร์ที่บรรจุขานอ้อยเพื่อลดความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกและหยุดปฏิกิริยา
5. ถ่ายขานอ้อยและกรดซัลฟิวริกใส่ขวดตัวอย่างขนาด 100 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นปริมาตร 60 มิลลิลิตร ล้างปีกเกอร์หลายๆ ครั้ง และเทใส่ขวดตัวอย่างด้วยความระมัดระวังเพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่ใจว่าไม่มีการสูญเสียมวลของขานอ้อยและกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ได้มีปริมาตรรวม 77 มิลลิลิตร และมีความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

6. ปิดฝาขวดตัวอย่างที่ได้ในข้อที่ 5 ให้สนิท ห่อด้วยฟอยด์อะลูมิเนียม และนำไปให้ความร้อนในหม้อนึ่งอัดไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30-60 นาที
7. นำขวดตัวอย่างออกจากหม้อนึ่งอัดไอน้ำ และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
8. กรองของผสมที่ได้จากข้อที่ 7 ด้วยชุดกรองสุญญากาศเพื่อแยกส่วนที่เป็นกากของแข็งและผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือไฮโดรไลเซต (Hydrolysate)
9. วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเซตด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงในหัวข้อ 3.6.1 โดยน้ำหนักของไซโลสที่คำนวณได้ คือ ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและน้ำหนักของกลูโคส คือ ปริมาณของเซลลูโลส
10. อบกากของแข็งที่กรองได้ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงในโถดูดความชื้นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาปริมาณเคลซอนลิกนิน

### 3.3 การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน

#### 3.3.1 ภาวะที่ศึกษา

โครงการนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิระหว่าง 150–250 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 0–30 นาที ในการเตรียมเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ก่อนทำการทดลองอัดก๊าซไนโตรเจน 2.5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยข้อจำกัดด้านอุปกรณ์การทดลอง ได้แก่ วาล์วควบคุมความดันของก๊าซไนโตรเจน ทำให้สามารถอัดความดันของก๊าซไนโตรเจนเริ่มต้นได้เพียง 2.5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพิ่มขึ้น ความดันของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และมีค่ามากกว่าความดันอิมิต์วของอุณหภูมิในช่วงที่ศึกษา ทำให้น้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะอยู่ในวัฏภาคของเหลว

#### 3.3.2 วัสดุและสารเคมี

1. ขานอ้อยปราศจากสารสกัด
2. ก๊าซไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99

#### 3.3.3 อุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 10 มิลลิลิตร
2. ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)
3. ชุดกรองสุญญากาศ
4. กระดาษกรองขนาดรูปวง 8 ไมโครเมตร (Whatman เบอร์ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปีเปตขนาด 10 มิลลิลิตร

### 3.3.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. อบซานอ้อยที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำซานอ้อยออกจากเตาอบ และทิ้งให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น
3. ชั่งน้ำหนักซานอ้อยประมาณ 0.1 กรัม เทลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
4. ปีเปตน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
5. อัดก๊าซไนโตรเจนใส่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ความดัน 2.5 เมกะปาสคาล
6. นำเครื่องปฏิกรณ์แบบกะประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน ปรับตั้งอุณหภูมิตามต้องการ
7. กดสวิตช์ให้ความร้อน และเริ่มทำการทดลอง
8. เมื่อถึงอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ ปิดสวิตช์ให้ความร้อน ถอดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะออก และจุ่มเครื่องปฏิกรณ์ลงในน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยาเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง
9. เปิดวาล์วที่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อปล่อยความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นเปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แล้วกรองแยกไฮโดรไลเซทออกจากกากของแข็งด้วยชุดกรองสูญญากาศ
10. วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเซท และองค์ประกอบทางเคมีของกากของแข็งของซานอ้อย

## 3.4 การไฮโดรไลซิสซานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

### 3.4.1 ภาวะที่ศึกษา

โครงการนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิระหว่าง 150–250 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 0–30 นาที ในการเตรียมเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ก่อนทำการทดลองอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง ระหว่างการทดลองบันทึกความดันและอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

### 3.4.2 วัสดุและสารเคมี

1. ซานอ้อยปราศจากสารสกัด
2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยมวล

### 3.4.3 อุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 10 มิลลิลิตร
2. ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชุดกรองสูญญากาศ
4. กระดาษกรองขนาดรูดรูป 8 ไมโครเมตร (Whatman เบอร์ 4)
5. ปีเปตขนาด 10 มิลลิลิตร

#### 3.4.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. ออบซานอ้อยที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำซานอ้อยออกจากเตาอบ และปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น
3. ชั่งน้ำหนักซานอ้อยประมาณ 0.1 กรัม เติลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
4. ปีเปตน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
5. อัดก๊าซไนโตรเจนลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ความดัน 2.5 เมกะปาสคาล
6. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเข้ากับชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน ปรับตั้งอุณหภูมิตามต้องการ
7. กดสวิตช์ให้ความร้อน และเริ่มทำการทดลอง
8. เมื่อถึงอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ ปิดสวิตช์ให้ความร้อน ถอดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะออก และจุ่มเครื่องปฏิกรณ์ลงในน้ำเย็นเพื่อหยุดปฏิกิริยาเป็นเวลาครึ่งชั่วโมง
9. เปิดวาล์วที่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อปล่อยความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นเปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แล้วกรองแยกไฮโดรไลเซทออกจากกากของแข็งด้วยชุดกรองสูญญากาศ
10. วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเซท และองค์ประกอบทางเคมีของกากของแข็งของซานอ้อย

#### 3.5 การไฮโดรไลซิสซานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

รายละเอียดภาวะที่ศึกษาและขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับวิธีการทดลองในหัวข้อ 3.4.1 แต่เปลี่ยนจากการใช้น้ำปราศจากไอออน เป็นเติมสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะแทน

#### 3.6 การวิเคราะห์ผล

##### 3.6.1 การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเซท

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือไฮโดรไลเซทที่ผ่านการกรองแยกหลังจากการไฮโดรไลซิสซานอ้อยด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography: HPLC) เนื่องจากเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลว

สมรรถนะสูงและภาวะที่ใช้สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเท่านั้น ดังนั้นถ้าต้องการทราบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมด สามารถทำได้โดยเติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 17.25 ไมโครลิตร ลงในไฮโดรไลเซต 1 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอีกครั้งในหม้อนึ่งอัดไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เพื่อให้น้ำตาลโมเลกุลคู่และหลายโมเลกุลถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจนหมด วิธีการนี้เรียกว่าการทำโพสท์ไฮโดรไลซิส (Post hydrolysis) ผลได้ของน้ำตาลที่วิเคราะห์ได้หลังการทำโพสท์ไฮโดรไลซิสนี้จะมีค่าเท่ากับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมด (Total reducing sugar) หากต้องการทราบปริมาณน้ำตาลโมเลกุลคู่และน้ำตาลหลายโมเลกุล คำนวณได้โดยนำปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดหักออกด้วยปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่วิเคราะห์ได้ในไฮโดรไลเซตก่อนทำโพสท์ไฮโดรไลซิส

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในไฮโดรไลเซตที่ได้จากการทดลองไฮโดรไลซิส ขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และวิธีเคลซอนลิกนิน ใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง รายละเอียดภาวะที่ใช้การวิเคราะห์มีดังนี้

- คอลัมน์วิเคราะห์ (Aminex HPX-87H, Bio-rad)
- สารพา คือ กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์
- อัตราการไหลของสารพา 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที
- อุณหภูมิคอลัมน์ 65 องศาเซลเซียส
- ตัววัดสัญญาณดัชนีหักเห (Refractive index detector : RID)

สร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ด้วยสารละลายน้ำตาลมาตรฐาน ได้แก่ น้ำตาลไซโลสและกลูโคสที่ทราบความเข้มข้นอย่างน้อย 2 ค่า เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของสารละลายน้ำตาลมาตรฐานแต่ละชนิด จากนั้นใช้กราฟมาตรฐานที่ได้ในการคำนวณปริมาณน้ำตาลในไฮโดรไลเซตจากพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของน้ำตาลในไฮโดรไลเซตที่ตรวจวัดได้จากเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง และรายงานค่าเป็นร้อยละผลได้เทียบกับน้ำหนักขานอ้อยปราศจากสารสกัดอบแห้งเริ่มต้น (Oven-dried extractive-free basis)

### 3.6.2 การวิเคราะห์เฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลในไฮโดรไลเซต

การวิเคราะห์เฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลในไฮโดรไลเซตใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง รายละเอียดภาวะในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีของน้ำตาลรีดิวซ์ ยกเว้นตัววัดสัญญาณซึ่งใช้ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet index detector) ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร แทน

### 3.6.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากของแข็ง

การวิเคราะห์เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในกากของแข็งที่เหลือหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเช่นเดียวกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขานอ้อยด้วยวิธีเคสซอนลิกนิน ขั้นตอนการวิเคราะห์อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่ 3.2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

บทนี้แสดงผลการทดลองและอภิปรายผลที่ได้จากตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบในชานอ้อยในตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้มากที่สุด โดยแสดงผลการทดลองที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 0 นาที เท่านั้น

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อยด้วยวิธีเคสซอนลิกนิน พบว่ากากของแข็งที่ได้มีปริมาณร้อยละ 21.36 โดยมวล ซึ่งกากของแข็งที่ได้นี้ คือ ปริมาณลิกนินในชานอ้อยทั้งหมด ส่วนไฮโดรไลเซทถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสและไซโลสในชานอ้อย ผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ Rabemanolontsoa และ Saka (2013) ซึ่งใช้ตัวอย่างชานอ้อยจากประเทศไทยเช่นเดียวกัน แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสและไซโลสที่ได้จากการวิเคราะห์และงานวิจัยดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสและไซโลสในชานอ้อยที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าร้อยละ 47.28 และ 29.98 โดยมวล ตามลำดับ และค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในองค์ประกอบทางเคมีชานอ้อย

	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (ร้อยละโดยมวล)					
	กลูโคส	ไซโลส	อะราบินอส	กาแล็กโทส	ฟรุคโตส	แมนโนส
Rabemanolontsoa และ Saka (2013)	45.47	27.78	1.60	0.00	0.00	0.00
โครงการนี้	47.28	29.98	2.22	-	-	-

เนื่องจากน้ำตาลกลูโคสเป็นมอโนเมอร์ของเซลลูโลส เมื่อน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายโซ่กลูแคน (Glucan) ของเซลลูโลสจะเกิดการสูญเสีย น้ำ ดังนั้นถ้าต้องการแปลงปริมาณน้ำตาลกลูโคสทั้งหมดในชานอ้อยเป็นเซลลูโลสจะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ 0.9 ส่วนไซโลสเป็นมอโนเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส ถ้าต้องการแปลงปริมาณน้ำตาลไซโลสในชานอ้อยเป็นเฮมิเซลลูโลสจะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ 0.88 (Canettieri และคณะ, 2007) ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการคำนวณและองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ของชานอ้อย

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย

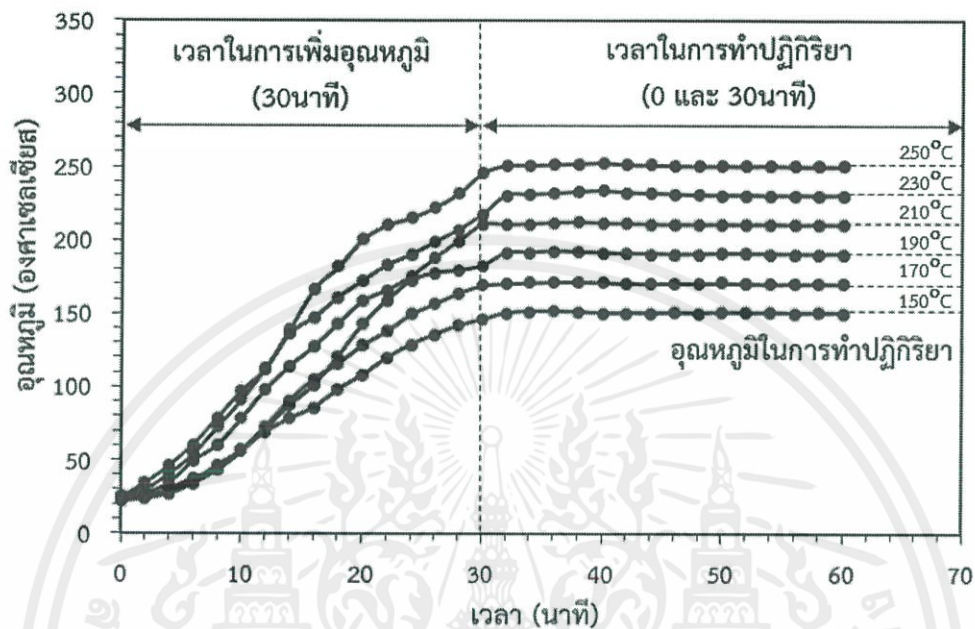
	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยมวล)			
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
Rabemanolontsoa และ Saka (2013)	40.92	33.01	22.33	1.61
โครงการนี้	42.55	28.34	21.36	-

พบว่าปริมาณเซลลูโลสและลิกนินที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Rabemanolontsoa และ Saka (2013) แต่เฮมิเซลลูโลสมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่แสดงในตารางนั้น คำนวณจากผลได้ของน้ำตาลไซโลสเท่านั้น องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสไม่ได้มีเพียงน้ำตาลไซโลส และมีน้ำตาลชนิดอื่นด้วย ได้แก่ อะราบิโนส กาแล็กโทส ฟรุกโตส และแมนโนส รวมทั้งกรดน้ำตาลหรือกรดยูโรนิก และกรดอะซิติก ซึ่งไม่ได้ทำการวิเคราะห์ เนื่องจากคอลัมน์วิเคราะห์ที่ใช้ในโครงการนี้สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะน้ำตาลไซโลส อะราบิโนส และกลูโคส เท่านั้น จึงทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่างานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบ แต่อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสชนิดอื่นๆ มีปริมาณไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับไซโลสในชานอ้อย อีกทั้งข้อจำกัดในเรื่องเครื่องมือการวิเคราะห์ ในโครงการนี้จึงละเว้นการวัดปริมาณน้ำตาลและกรดอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเหล่านี้ และใช้ปริมาณไซโลสซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 29.98 โดยมวล เป็นตัวแทนของปริมาณเฮมิเซลลูโลสในตัวอย่างชานอ้อย เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและคำนวณปริมาณผลได้คั้นมาของไซโลแซ็กคาไรด์สำหรับประเมินหาภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสต่อไป ในกรณีการคำนวณปริมาณผลได้คั้นมาของอะราบิโนสทั้งหมด ใช้ปริมาณอะราบิโนสเท่ากับร้อยละ 2.22 โดยมวล เป็นตัวแทนของปริมาณอะราบิโนสทั้งหมดในชานอ้อย และการคำนวณปริมาณผลได้คั้นมาของเซลโลแซ็กคาไรด์ ใช้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสเท่ากับร้อยละ 47.28 โดยมวล เป็นตัวแทนของปริมาณเซลลูโลสในชานอ้อย

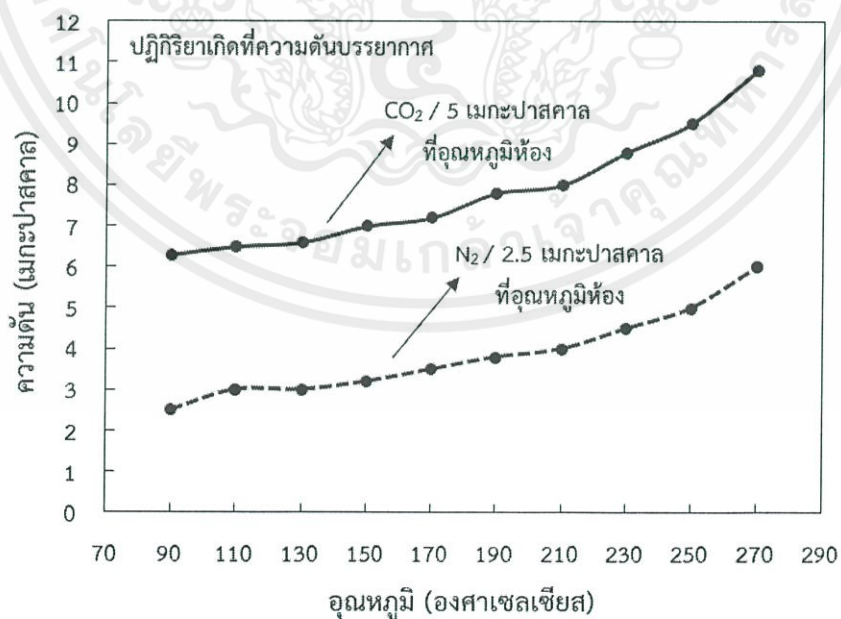
#### 4.2 การไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

รูปแบบของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Temperature and pressure profiles of hydrolysis) แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิที่ชุดอุปกรณ์ กดสวิตช์ให้ความร้อนเพื่อเริ่มการทดลอง และนับเวลาจนกระทั่งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะมีค่าตามที่ต้องการ จะเห็นได้ว่าเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิมิค่า 30 นาที สำหรับทุกค่าอุณหภูมิ เวลาในการ

ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเริ่มนับภายหลังจาก 30 นาทีแรก เมื่อเครื่องปฏิกรณ์แบบกะมีอุณหภูมิเท่ากับค่าที่ต้องการแล้ว ปิดสวิตซ์ทันทีและนับเวลาที่ทำปฏิกิริยาเป็นนาทีที่ 0



รูปที่ 4.1 รูปแบบของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



รูปที่ 4.2 รูปแบบของความดันในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์แบบกะและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนมีค่าตามที่ต้องการ โดยช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา ได้แก่ 150-250 องศาเซลเซียส พบว่าความดันของระบบก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่จากผลการละลายของก๊าซในของเหลว ความสามารถในการละลายของก๊าซจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อผลิตกรดคาร์บอนิกในการทดลองที่ใช้น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลิตกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกในการทดลองที่ใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไฮโดรไลซิสขานอ้อยที่อุณหภูมิสูง จึงอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันเริ่มต้นที่ 5 เมกะปาสคาลที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ระบบมีความดันรวมสูงๆ ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำเกิดเป็นกรดและเร่งปฏิกิริยาในการไฮโดรไลซิสขานอ้อยที่อุณหภูมิสูงได้มากขึ้น

เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของไฮโดรไลซิสขานอ้อยกับภาวะที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โครงการนี้จึงทดลองไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นบรรยากาศซึ่งไม่ก่อให้เกิดกรดใดๆ ระหว่างการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แต่ด้วยข้อจำกัดด้านอุปกรณ์การทดลอง ได้แก่ วาล์วควบคุมความดันของก๊าซไนโตรเจน ทำให้สามารถอัดความดันของก๊าซไนโตรเจนเริ่มต้นได้เพียง 2.5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพิ่มขึ้น ความดันของระบบที่อัดก๊าซไนโตรเจนเริ่มต้นที่ 2.5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และมีค่ามากเพียงพอที่ทำให้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะอยู่ในวัฏภาคของเหลว แต่ความดันมีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าของกรณีการทดลองที่อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

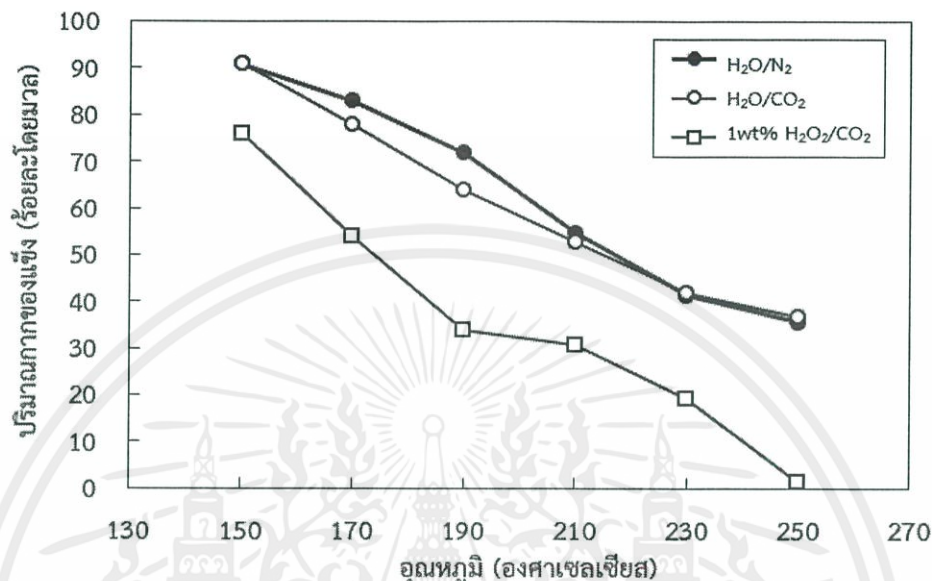
#### 4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการไฮโดรไลซิสขานอ้อยเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว

ปริมาณกากของแข็งหลังการไฮโดรไลซิสขานอ้อยที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 เปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เหลือปริมาณกากของแข็งน้อยกว่า และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ปริมาณกากของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน หรือน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกซึ่งมีสมบัติในการกำจัดลิกนิน (Delignification) (Jakob และคณะ, 2012) จึงสามารถทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐาน ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ถูกกำจัดออกไปจากโครงสร้างผนังพืชของขานอ้อยกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดีกว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดันและน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าช่วงอุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียส ปริมาณกากของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังการไฮโดรไลซิสขานอ้อยแตกต่างกัน การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณกากของแข็งน้อยกว่า เนื่องจากกรดคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไฮโดรไลซิสขานอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คือ ตั้งแต่ 210-250 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณกากของแข็งมีค่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสอาจถูกไฮโดรไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยน้ำร้อนอัดความดันและน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจนหมดในช่วงอุณหภูมิ 210-250 องศาเซลเซียส เหลือเพียงเซลล์ูโลสและลิกนินอยู่ในโครงสร้างผนังพืชของขานอ้อย ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการไฮโดรไลซิส



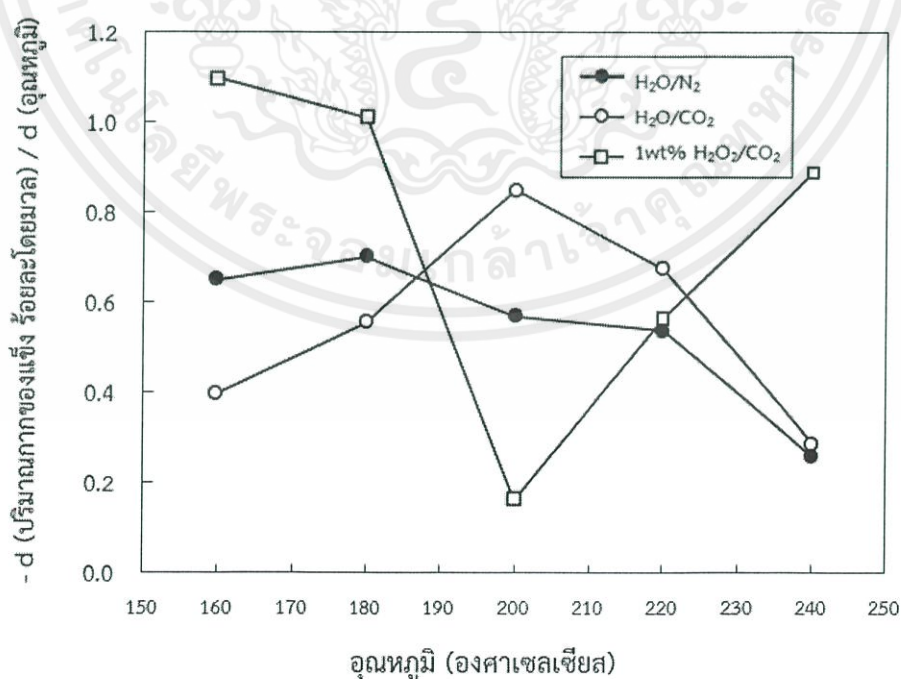
รูปที่ 4.3 ปริมาณกากของแข็งหลังการไฮโดรไลซิสขานอ้อยที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งของขานอ้อยจากการไฮโดรไลซิสในรูปอนุพันธ์เทียบกับอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส พบว่ากากของแข็งของขานอ้อยจากการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าวิธีอื่น เนื่องจากมีกรดเพอร์ออกซิคาร์บอนิกเป็นสารออกซิไดส์ทำให้เกิดการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากโครงสร้างของผนังเซลล์พืชของขานอ้อย การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งของขานอ้อยเป็นลำดับถัดมา เพราะมีกรดคาร์บอนิกซึ่งเป็นกรดอ่อนซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ ส่วนน้ำร้อนอัดความดันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกากของแข็งน้อยที่สุด

แต่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส รูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งมีลักษณะแตกต่างกันไป โดยพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งได้มากที่สุด เมื่อไฮโดรไลซิสด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามมาด้วยการใช้น้ำร้อนอัดความดัน แต่การไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมีการเปลี่ยนแปลงต่ำที่สุด ที่อุณหภูมิดังกล่าว สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้ว่า เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสเกือบทั้งหมดถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของขานอ้อยพร้อมกับลิกนินด้วยสารละลาย

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ 160-180 องศาเซลเซียส เหลือเพียงเซลล์ูโลสและลิกนินบางส่วนที่ยังไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แม้ว่าในระบบจะมีกรดเปอร์ออกซีคาร์บอนิก แต่อุณหภูมิดังกล่าวสูงไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและทำลายความเป็นผลึกของเซลล์ูโลสที่มีความแข็งแรงกว่าโครงสร้างอัญรูปของเฮมิเซลล์ูโลสได้ จึงพบการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งเพียงเล็กน้อย (ความแตกต่างของกากของแข็งไม่เกินร้อยละ 3 โดยมวล) ที่อุณหภูมิดังกล่าว แต่ในกรณีที่ใช้น้ำร้อนอัดความดันและน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส กากของแข็งของชานอ้อยยังคงมีปริมาณเฮมิเซลล์ูโลสหลงเหลืออยู่มาก จึงสามารถไฮโดรไลซิสและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งได้ โดยกรดคาร์บอนิกส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่อุณหภูมินี้

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งที่อุณหภูมิ 220 และ 240 องศาเซลเซียส พบว่ามวลของกากของแข็งลดลงอย่างรวดเร็วด้วยวิธีการไฮโดรไลซิสที่ใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลล์ูโลสสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวโดยมีกรดเปอร์ออกซีคาร์บอนิกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่สำหรับการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดันและน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งที่ใกล้เคียงกัน สาเหตุยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อาจไม่สามารถละลายในน้ำได้ที่อุณหภูมิสูงภายใต้ภาวะความดันที่ใช้ในการทดลอง จึงทำให้การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่แสดงผลที่แตกต่างจากการใช้น้ำร้อนอัดความดัน



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกากของแข็งของชานอ้อยจากการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ

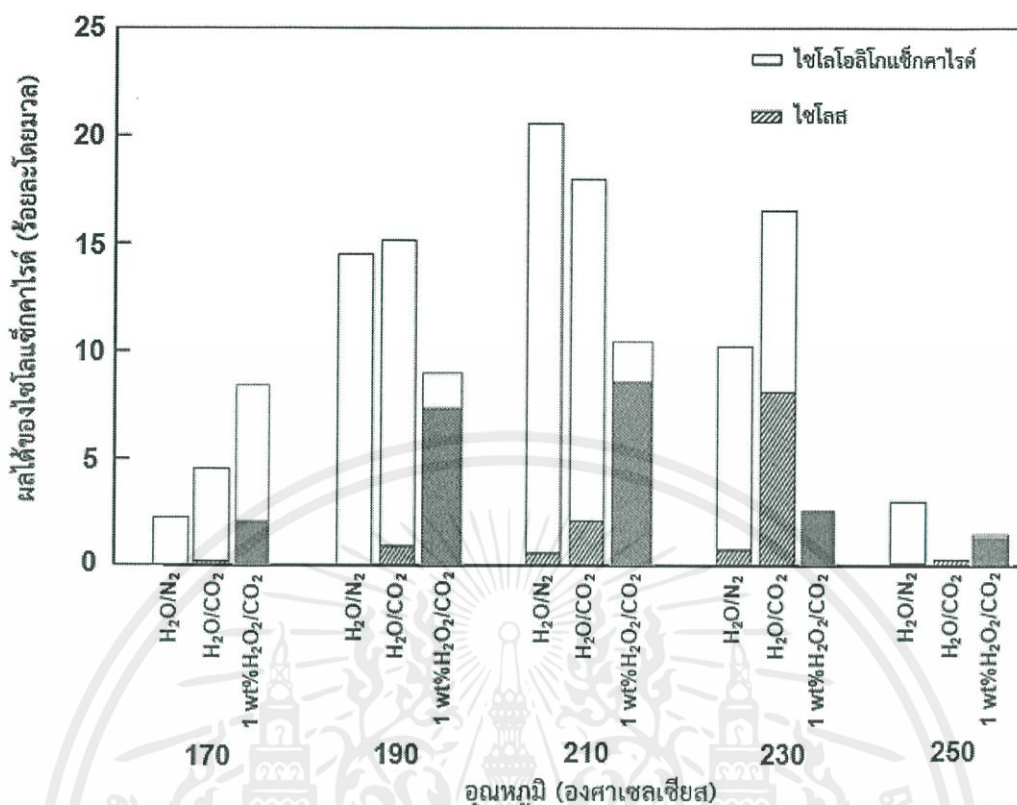
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์

รูปที่ 4.5 แสดงร้อยละผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์ จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วย น้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์กับการไฮโดรไลซิสขานอ้อยโดยใช้น้ำร้อนอัดความดัน พบว่าวิธีการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ให้ผลที่แตกต่าง แต่วิธีการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เพิ่มผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์อย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นไซโลแซ็กคาไรด์ปริมาณรวมมากถึงร้อยละ 8.1 โดยมวล คิดเป็นผลได้คั้นมาของ เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 27 โดยมวล ในขณะที่หากใช้น้ำร้อนอัดความดัน หรือน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์เพียงร้อยละ 2.4 หรือ 4.5 โดยมวล คิดเป็นผลได้คั้นมาของเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 8 หรือ 15 โดยมวล ตามลำดับ

นอกจากนี้การไฮโดรไลซิสขานอ้อยในภาวะที่มีกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์เกิดเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ ไซโลส ได้มากถึงร้อยละ 6.8 โดยมวล ซึ่งมากกว่าผลได้ของไซโลสจากวิธีการที่ใช้น้ำร้อนอัดความดันหรือใช้น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยมวล ภายใต้ภาวะการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไฮโดรไลซิสเป็น 210 องศาเซลเซียส ในภาวะการไฮโดรไลซิสที่มีกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก ผลได้ของไซโลสเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8.2 โดยมวล และกรดคาร์บอนิกที่เกิดจากการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงในน้ำแสดงแนวโน้มการเพิ่มผลได้ของไซโลสเช่นเดียวกัน เป็นร้อยละ 2.0 โดยมวล แต่น้อยกว่ากรณีของกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการไฮโดรไลซิส 230 องศาเซลเซียส พบว่าการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถผลิตไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ปริมาณมากกว่าวิธีน้ำร้อนอัดความดันและสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์มีค่าต่ำลงในการไฮโดรไลซิสทั้ง 3 วิธี

ตารางที่ ข.9 ถึง ข.11 ในภาคผนวก ข แสดงผลได้ของไซโลส ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ และไซโลแซ็กคาไรด์ และอัตราส่วนของไซโลสและไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ต่อไซโลแซ็กคาไรด์ ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยวิธีต่างๆ โดยละเอียด

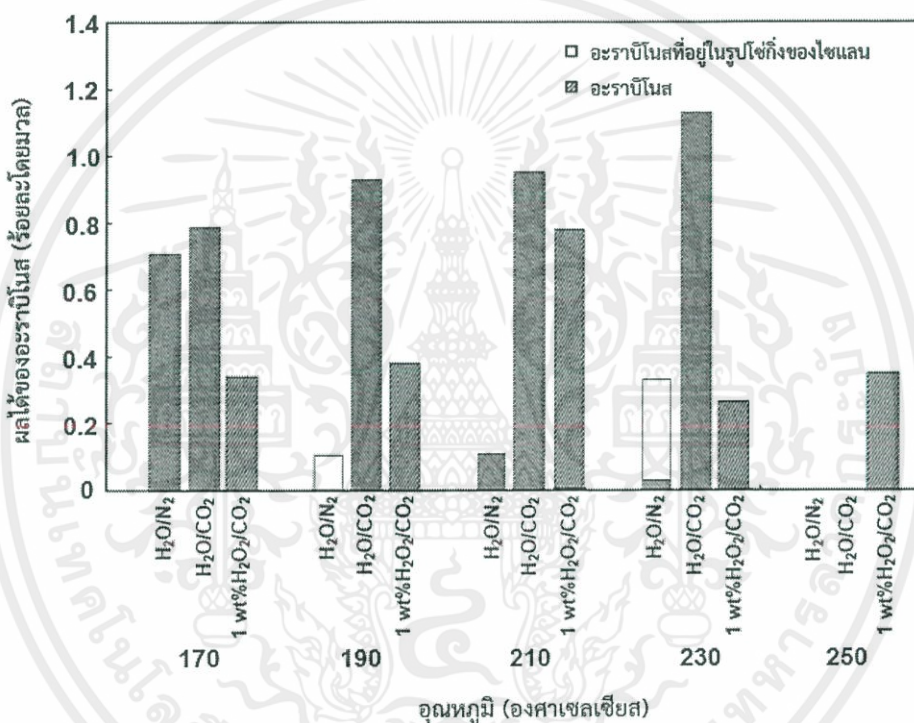


รูปที่ 4.5 ผลได้ของไซโลส ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ และไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากนี้พบว่า การไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยวิธีการต่างๆ ทั้ง 3 วิธี ได้แก่ น้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีภาวะที่เหมาะสมเหมือนกัน ได้แก่ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์จากเฮมิเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 22.02, 17.89 และ 10.03 โดยมวล ตามลำดับ โดยน้ำร้อนอัดความดันก่อให้เกิดผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์สูงสุด ส่วนสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์ต่ำสุด

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสในพืชที่เป็นแหล่งของวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น อ้อย ปาล์ม มะพร้าว และข้าว จากอนุกรมวิธานพืชเหล่านี้จัดอยู่ในประเภทพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ซึ่งโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส คือ อะราบินอกลูโคโรโนไซแลน ประกอบด้วยไซแลนเป็นสายโซ่หลัก และมีอะราบินอสเป็นโซ่กิ่ง เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อะราบินอสที่อยู่รูปโซ่กิ่งนี้จะหลุดออกมาเป็นอะราบินอสซึ่งเป็นน้ำตาลรีดิวซ์อิสระในรูปมอโนเมอร์ ส่วนไซแลนจะถูกย่อยสลายเป็นไซโลส และไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ แต่การไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสภายใต้ภาวะของน้ำร้อนอัดความดัน หากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้อย่างไม่สูงและนานเพียงพอที่จะทำให้อะราบินอสหลุดออกมาอยู่ใน

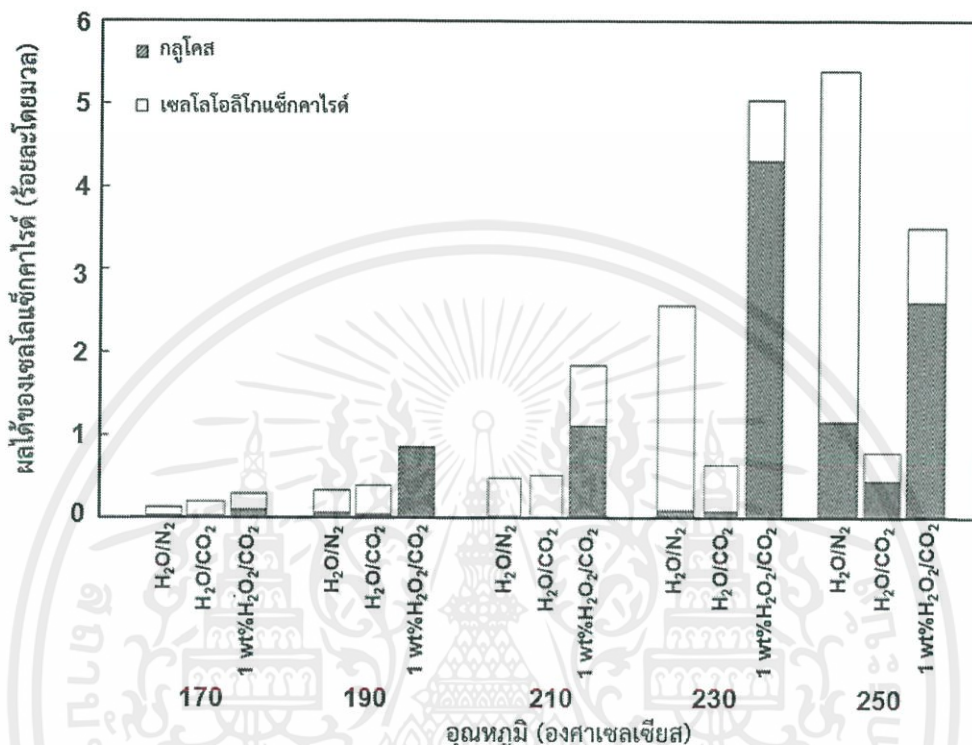
รูปมอโนเมอร์ได้ทั้งหมด ทำให้ยังมีอะราบินอสติดอยู่ในสายโซ่หลักของไซแลน (Phaiboonsilpa และคณะ, 2011) อย่างไรก็ตามเมื่อนำไฮโดรไลเซทของชานอ้อยมาทำปฏิกิริยาโพสโตไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจาง สามารถทำให้อะราบินอสที่ติดอยู่ในสายโซ่หลักเหล่านั้นหลุดออกมาเป็นน้ำตาลรีดิวซ์อิสระในรูปมอโนเมอร์ได้ทั้งหมด ในภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยากรดคาร์บอนิก ผลได้ของอะราบินอสมีค่าสูงกว่าวิธีการที่ใช้น้ำร้อนอัดความดัน แต่กรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกส่งผลต่อการเลือกเกิดเป็นอะราบินอสได้ไม่ดีเท่ากับกรดคาร์บอนิก ผลได้ของอะราบินอสจากการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลได้ของอะราบินอสที่ได้จากการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากเฮมิเซลลูโลสในชานอ้อย เซลลูโลสก็สามารถถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ภายใต้ภาวะที่ศึกษา แต่เนื่องจากโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสมีความแข็งแรงกว่าโครงสร้างอัญรูปของเฮมิเซลลูโลส จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการทำลายโครงสร้างความเป็นผลึก จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิ 170-210 องศาเซลเซียส มีปริมาณเซลโลแซ็กคาไรด์เกิดขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับผลได้ของเซลโลแซ็กคาไรด์ในช่วงอุณหภูมิ 230-250 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมินี้ แม้ว่าปริมาณเซลโลแซ็กคาไรด์จะเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังมีปริมาณต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในองค์ประกอบของชานอ้อย (ร้อยละ 42.55 โดยมวล) กล่าวคือ เพียงร้อยละ 5.36, 0.87 และ 3.76 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

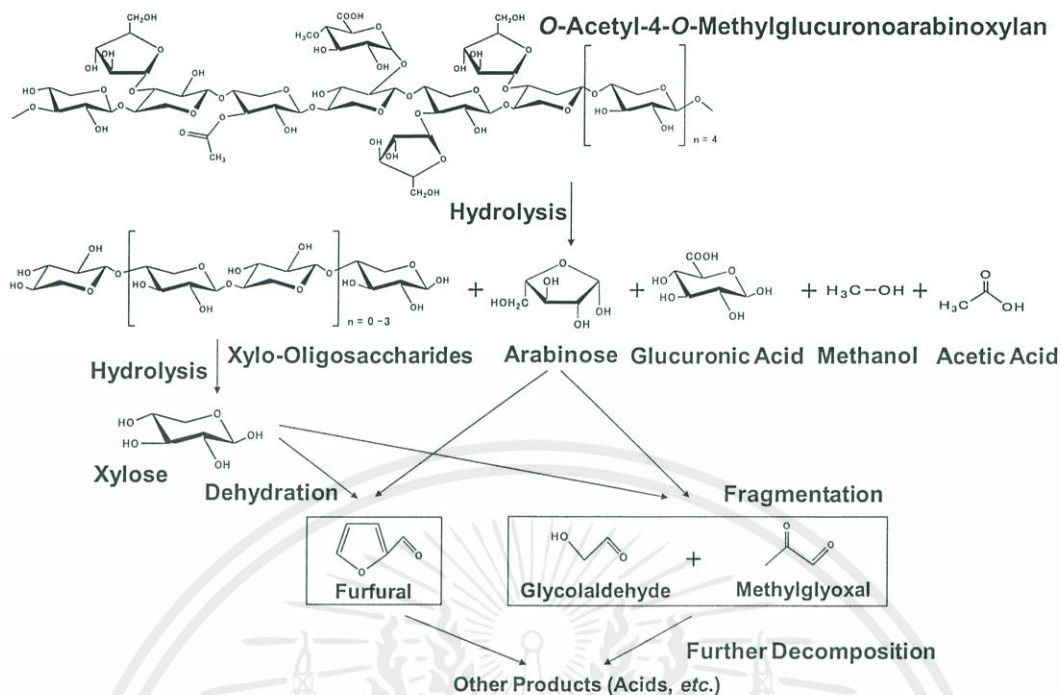
โดยมวล ซึ่งได้จากการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ผลได้ของกลูโคส เซลโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ และเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

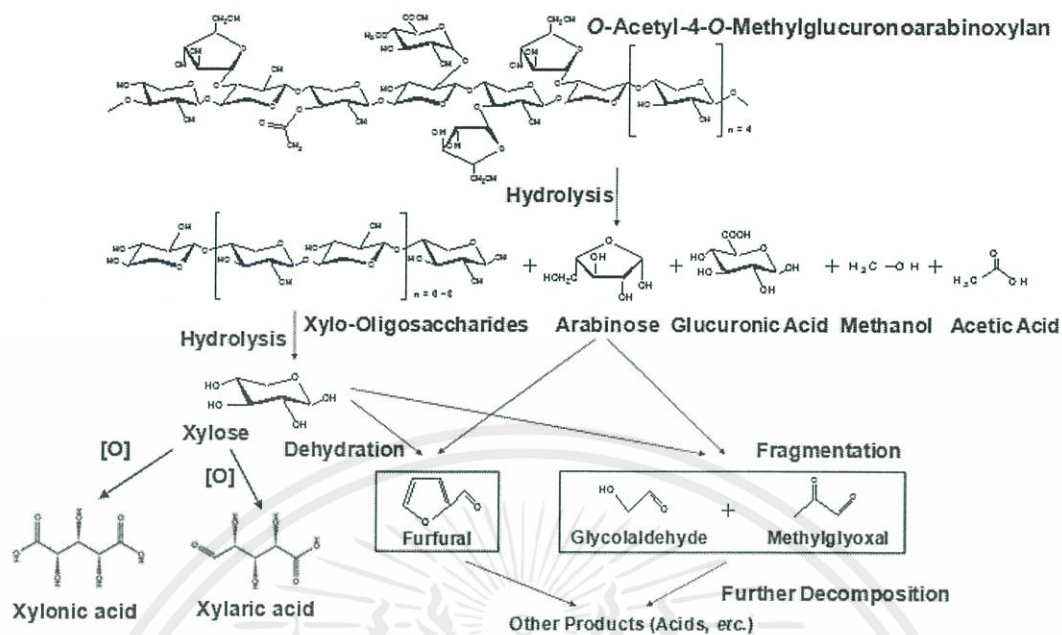
#### 4.2.3 กลไกการสลายโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสจากชานอ้อย

Phaiboonsilpa และคณะ (2011) รายงานกลไกการสลายโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจากทางจาก (Nipa frond) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำร้อนอัดความดัน ไฮแลนซึ่งเป็นสายโซ่หลักของอะราบินอกลูโคโรโนไซแลน (เฮมิเซลลูโลส) จะถูกไฮโดรไลซ์เป็นไซโลแซ็กคาไรด์ที่สามารถละลายในของเหลว เมื่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไซโลแซ็กคาไรด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ และไซโลส ตามลำดับ ส่วนอะราบินอส และกรดกลูโคโรนิก ที่อยู่ในรูปโซ่กิ่งจะหลุดออกมาเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอิสระ หากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านี้ถูกทำปฏิกิริยาภายใต้ภาวะน้ำร้อนอัดความดันต่อไปอีก จะเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุล และการแตกโมเลกุล เป็นผลพลอยได้อื่นๆ เช่น เฟอร์ฟูรัล ไกลโคอัลดีไฮด์ เมทิลไกลออกซอล กรดอินทรีย์ และก๊าซ



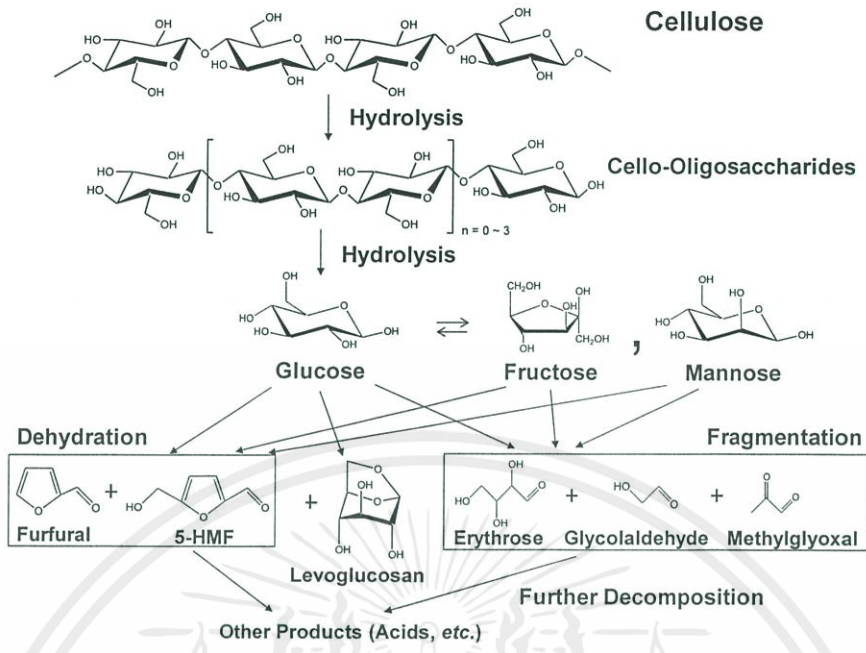
รูปที่ 4.8 กลไกการสลายตัวที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน และน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Phaiboonsilpa และคณะ, 2011)

การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีกลไกการสลายโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่คล้ายคลึงกันแต่กรดคาร์บอนิกจะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไซลแซ็กคาไรด์ทำให้เกิดไซลโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและได้ไซลอสมากขึ้น แต่การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีกลไกการสลายโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่แตกต่างออกไป รูปที่ 4.9 แสดงกลไกที่เป็นไปได้ โดยกรดเปอร์ออกซีคาร์บอนิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีปริมาณมากเกินพอ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นอนุพันธ์กรดอินทรีย์ ไซลอสจึงถูกออกซิไดส์จะเกิดเป็นกรดไซลินิกหรือกรดไซลาริก (Hernandez, 2013) ในขณะเดียวกันอนุพันธ์กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ ทำให้เกิดไซลโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและไซลอสมากขึ้น โดยการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยอนุพันธ์กรดอินทรีย์มีผลต่อการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในขานอ้อยมากกว่ากรดคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นจากน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ 170-210 องศาเซลเซียส

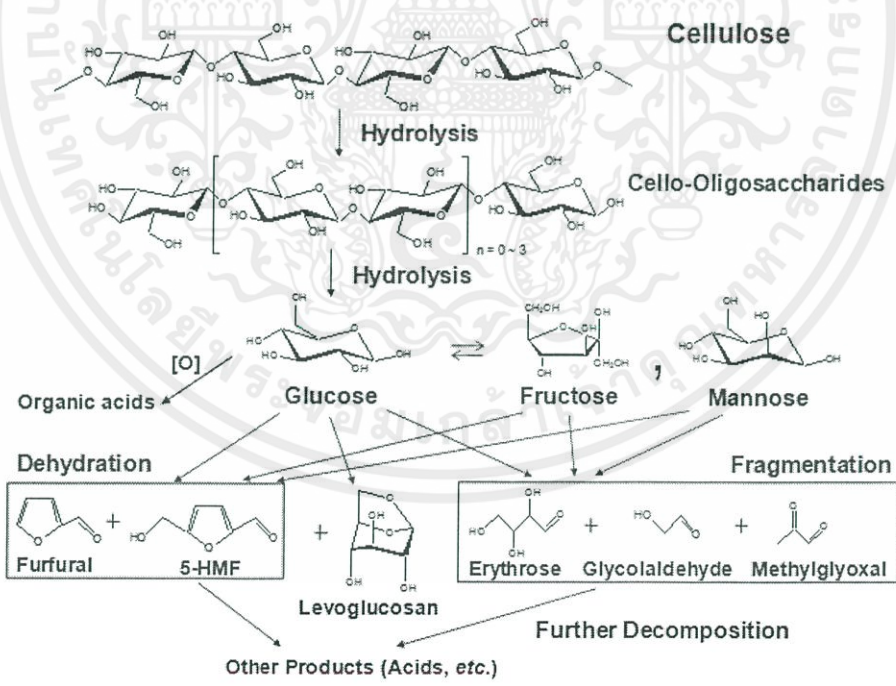


รูปที่ 4.9 กลไกการสลายตัวที่เป็นไปได้ในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Phaiboonsilpa และคณะ, 2011; Hernandez, 2013; Modified)

กรณีกลไกการสลายโมเลกุลของเซลลูโลส เซลลูโลสจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นเซลโลแซ็กคาไรด์ที่สามารถละลายในของเหลว เมื่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เซลโลแซ็กคาไรด์ จะถูกเปลี่ยนเป็นเซลโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ และกลูโคส ตามลำดับ หากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านี้ถูกทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อไปอีก จะเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุล และการแตกโมเลกุล เป็นผลพลอยได้ เช่น เฟอร์ฟูรัล ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล โกลโคอัลดีไฮด์ เมทิลไกลออกซอล กรดอินทรีย์ และก๊าซ แสดงดังรูปที่ 4.10 แต่กรณีที่ใช้สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลไกการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสจะแตกต่างออกไป รูปที่ 4.11 แสดงกลไกที่เป็นไปได้ กรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกและไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่มีปริมาณมากเกินพอ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเป็นอนุพันธ์กรดอินทรีย์เช่นเดียวกับกลไกการสลายตัวที่เป็นไปได้ในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในขานอ้อย การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวคือกลูโคสเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ดังนั้นกลูโคสจะถูกออกซิไดส์จะเกิดเป็นอนุพันธ์กรดอินทรีย์ (Lu และคณะ, 2009; Shapley, 2012; Modified)



รูปที่ 4.10 กลไกการสลายตัวจากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในขาน้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดันและน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Lu และคณะ, 2009)

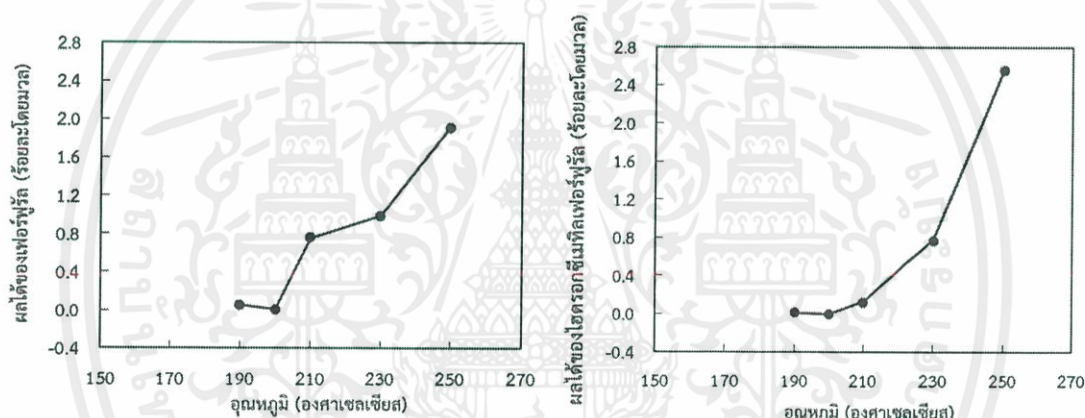


รูปที่ 4.11 กลไกการสลายตัวที่เป็นไปได้จากการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสในขาน้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Lu และคณะ, 2009; Shapley, 2012; Modified)

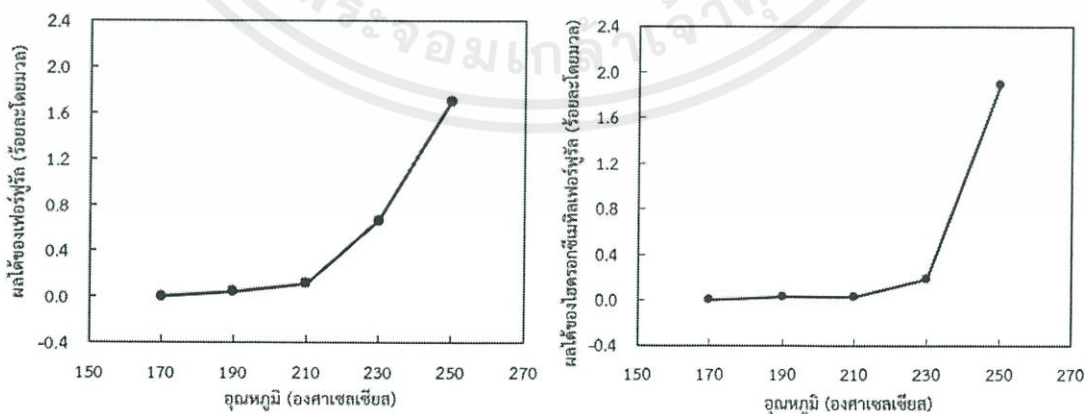
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลพลอยได้จากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในการไฮโดรไลซิสขานอ้อย

นอกจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยยังมีผลพลอยได้ที่สำคัญ ได้แก่ เฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการสูญเสีย น้ำของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หากผลิตภัณฑ์ของเหลวยังถูกทำปฏิกิริยาภายใต้ภาวะเดิมในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะต่อไป เฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลจะสลายโมเลกุลกลายเป็นกรดอินทรีย์หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ รูปที่ 4.12 ถึง 4.14 แสดงผลได้ของเฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ผลพลอยได้เหล่านี้มีแนวโน้มเกิดได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น Antal และคณะ (1990; 1991) และ Lu และคณะ (2009) รายงานการเลือกเกิดของเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวภายใต้ภาวะอุณหภูมิมากกว่า 230 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลที่พบในงานวิจัยนี้

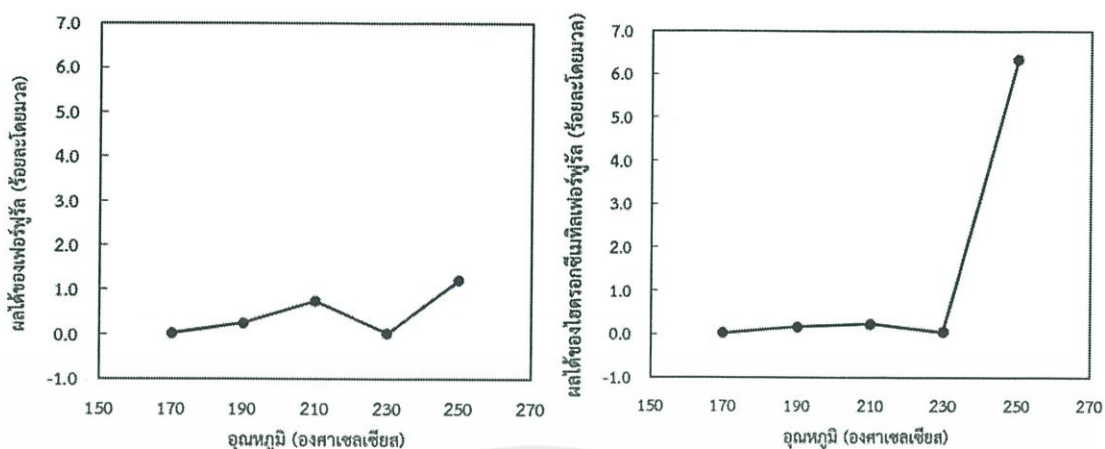


รูปที่ 4.12 ผลได้ของเฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน



รูปที่ 4.13 ผลได้ของเฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ผลได้ของเฟอร์ฟูรัล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสซหานอ้อยด้วย สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัตราการคาร์บอน ไดออกไซด์

#### 4.2.5 ผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์และผลพลอยได้จากการไฮโดรไลซิสซหานอ้อยด้วยวิธีต่างๆ ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองเปรียบเทียบการไฮโดรไลซิสซหานอ้อยด้วยวิธีต่างๆ พบว่ามีภาวะที่เหมาะสมเหมือนกัน ได้แก่ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์จากเฮมิเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 22.02, 17.89 และ 10.03 โดยมวล คิดเป็นร้อยละผลได้คืนมาเท่ากับ 73.45, 59.67 และ 33.46 โดยมวล ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยน้ำร้อนอัดความดันก่อให้เกิดผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์สูงสุด ส่วนสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัตราการคาร์บอนไดออกไซด์มีผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์ต่ำสุด แต่อย่างไรก็ตามการไฮโดรไลซิสซหานอ้อยในภาวะที่มีกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิก ส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสถูกไฮโดรไลซ์เกิดเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ ไซโลส ได้มากกว่าวิธีน้ำร้อนอัดความดัน และน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไซโลสที่เกิดขึ้นในปริมาณมากนี้สามารถนำไปแยกให้บริสุทธิ์ หรือใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อเปลี่ยนทางเคมีเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าอื่นๆ ได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยปฏิบัติการเพิ่มเติมสำหรับทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซหานอ้อยเพื่อเปลี่ยนน้ำตาลหลายโมเลกุล ได้แก่ ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ให้เป็นไซโลสอีก ผลการทดลองที่ได้นี้ชี้ให้เห็นข้อดีของกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกซึ่งเกิดขึ้นได้ในขณะที่ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซหานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัตราคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.3 ผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และกากของแข็ง จากการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้ภาวะที่ทำให้เกิดผลได้ของไซโลแซ็กคาไรด์สูงที่สุด

ภาวะที่ทำปฏิกิริยา	ผลได้ (ร้อยละโดยมวล)					ผลได้คือนรวมของไซโลแซ็กคาไรด์ (ร้อยละโดยมวล)
	ไซโลแซ็กคาไรด์	อะราบิโนส	เซลโลแซ็กคาไรด์	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล	
H <sub>2</sub> O/N <sub>2</sub> 210 องศาเซลเซียส / 0 นาที	22.02	0.12	0.57	0.07	15.11	73.45
H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub> 210 องศาเซลเซียส / 0 นาที	17.89	0.96	0.52	0.04	0.23	59.67
1wt% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 210 องศาเซลเซียส / 0 นาที	10.03	0.79	1.91	0.20	0.64	33.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเอมิเซลลูโลสถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ได้แก่ ไฮโลแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยไฮโลส และไฮโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 3 วิธี มีภาวะที่เหมาะสมเหมือนกัน ได้แก่ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 0 นาที ซึ่งทำให้ผลได้ของไฮโลแซ็กคาไรด์จากเอมิเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 22.02, 17.89 และ 10.03 โดยมวล คิดเป็นร้อยละผลได้คืนมาเท่ากับ 73.45, 59.67 และ 33.46 โดยมวล ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลได้ของไฮโลแซ็กคาไรด์ของการไฮโดรไลซิสขานอ้อย พบว่าการใช้น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ให้ผลที่แตกต่างกับการใช้น้ำร้อนอัดความดัน แต่การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้การไฮโดรไลซิสเอมิเซลลูโลสสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำลง กล่าวคือ ตั้งแต่ 170 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลา 0 นาที ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโลแซ็กคาไรด์ปริมาณรวมมากถึงร้อยละ 8.1 โดยมวล ในขณะที่หากใช้น้ำร้อนอัดความดัน หรือน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีผลได้ของไฮโลแซ็กคาไรด์เพียงร้อยละ 2.4 และ 4.5 โดยมวล ที่อุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 0 นาที กรดเปอร์ออกซีคาร์บอนิกสามารถผลิตไฮโลสได้ร้อยละ 6.83 โดยมวล ซึ่งมากกว่าวิธีอื่น

การไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีกลไกการย่อยสลายโมเลกุลของเอมิเซลลูโลสเช่นเดียวกับน้ำร้อนอัดความดัน แต่กรดคาร์บอนิกจะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไฮโลแซ็กคาไรด์ทำให้เกิดไฮโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและไฮโลสได้มากขึ้น ส่วนการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีกลไกการย่อยสลายโมเลกุลของเอมิเซลลูโลสที่แตกต่างออกไป โดยกรดเปอร์ออกซีคาร์บอนิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีปริมาณมากเกินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนไฮโลสเป็นกรดไฮโลนิคและ/หรือกรดไฮลาริกได้ กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้สามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ ทำให้เกิดไฮโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและไฮโลสมากขึ้น โดยการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดอินทรีย์มีผลต่อการไฮโดรไลซิสเอมิเซลลูโลสในขานอ้อยมากกว่ากรดคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นจากน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ 170-210 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลรวมของไฮโลแซ็กคาไรด์ การไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดันทำให้เกิดผลได้สูงสุด

ผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นข้อดีของการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความดันเริ่มต้นมากกว่า 5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง ในน้ำหรือในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และใช้ในการไฮโดรเอกซาร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลซีซานอ้อยในช่วงอุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส เป็นน้ำตาลรีดิวิซ์ กรดคาร์บอนิกและกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นมีผลทำให้เกิดปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ที่แตกต่างกัน กรดคาร์บอนิกและกรดเพอร์ออกซีคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นไม่มีความเสถียร และจะสลายตัวไป เมื่อลดอุณหภูมิและความดันของระบบลงจนเข้าสู่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จึงไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยปฏิบัติการเพิ่มเติมเพื่อแยกกรด และลดปัญหาการกัดกร่อนในกระบวนการได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ผู้วิจัยเสนอการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม เพราะหากไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มากเกินไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงและสูญเสียโซลสเป็นกรดอินทรีย์ ทำให้มีผลได้ของโซลแซ็กคาไรด์ต่ำ
- 5.2.2 ผู้วิจัยเสนอให้ทำการทดลองน้ำร้อนอัดความดัน โดยอัดก๊าซไนโตรเจนให้มีความดันเริ่มต้น 5 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิห้อง เท่ากับกรรมวิธีน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อกำจัดอิทธิพลจากความแตกต่างของความดันในขณะทำปฏิกิริยา
- 5.2.3 ผู้วิจัยเสนอการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากของแข็งจากซานอ้อยหลังทำปฏิกิริยาไฮโดรโลซิส ผลการศึกษาดังกล่าวจะช่วยให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของไฮโดรโลซิสภายใต้ภาวะที่ศึกษาดังกล่าวได้ชัดเจนขึ้น

## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2557. รายงานดุลยภาพพลังงานทดแทนของประเทศไทย (ออนไลน์). แหล่งที่มา: [http://www.dede.go.th/download/stat58/Energy%20Balance%20of%20Thailand%202014\\_1.pdf](http://www.dede.go.th/download/stat58/Energy%20Balance%20of%20Thailand%202014_1.pdf)
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2558. ข้อมูลทั่วไปของชีวมวล. แหล่งที่มา: [http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html)
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2558. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. แหล่งที่มา: [http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com\\_content&view=article&id=130%3A2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68&lang=th](http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130%3A2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68&lang=th)
- อรุณี ศุภสินสาธิต. 2555. พลังงานจากชีวมวลที่มีพลังงานสูง. วารสารสิ่งแวดล้อม. เล่มที่ 16, ปีที่ 2, 36-43
- Amnuaysin T., Buahom P., Areerat Surat. 2015. Preparation of natural rubber-based polyol by oxidative degradation under supercritical carbon dioxide for flexible bio-based polyurethane foams. *Journal of Cellular Plastics*, 1-10
- Antal M.J., Mok W.S.L. 1990. Mechanism of formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde from D-fructose and sucrose. *Carbohydrate Research* 199, 91-110
- Antal M.J., Leesomboon T., Mok W.S., Richards G.N. 1991. Mechanism of formation of 2-furaldehyde from D-xylose. *Carbohydrate Research* 217, 71-85
- Basic of Kraft Pulp Lignin. 2557. [Online]. Available: [http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas\\_art/technical\\_reviews/Basics%20of%20Kraft%20Pulping.pdf](http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas_art/technical_reviews/Basics%20of%20Kraft%20Pulping.pdf)
- Bastawde K.B. 1992. Xylan structure, microbial xylanases and their mode of action. *World J. of Microbiol and Biotechnology*, 8, 355-368
- Bobleter O. 1994. Hydrothermal degradation of polymerization of polymers derived from plants. *Prog. Polym.Sci.*, 19, 797-841
- 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
- Brandsch J., Piringer O. 2000. Characteristics of plastic materials. In: Piringer O.G., Baner A.L. (Eds.), *Plastic Packaging Materials for Food*, InTech. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 9-46
- Campbell M.K., and Farrell S.O. 2012. *Biochemistry*, 459. USA: Mary Finch

- Canettieri E.V., Rocha G.J.M., Carvalho J.A.C., Silva J.B.A. 2007. Optimization of acid hydrolysis from the hemicellulosic fraction of *Eucalyptus grandis* residue using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 98, 422-428
- Carbonic Acid and Carbonate Salts. 2017. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/oxyacid/Carbonic-acid-and-carbonate-salts#ref1000415>
- Desvaux M. 2005. *Clostridium cellulolyticum*: model organism of mesophilic cellulolytic clostridia. *FEMS Microbiology Reviews*, 29, 741-764
- Hernandez A., Corcos P., Beauchet R., Lavoie J. 2013. Biofuels and Co-Products Out of Hemicelluloses. *Energy Engineering*
- Jakob H., Leininger S., Lehmann T., Jacobi S., Gutewort. 2012. Peroxo compounds, inorganic. *Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 26, 293-319
- Kim T.H., Taylor F., Hicks K.B. 2008. Bioethanol production from barley hull using SSA (Soaking in Aqueous Ammonia) pretreatment. *Bioresource Technology*, 99, 5694-5702
- Klenk H, Gotz P. H., Siegmeier R., Mayr W. 2012. Peroxy Compound, organic. *Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 26, 325-354
- Kumar P., Barrett D. M., Delwiche M. J., Stroeve P. 2015. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *I&EC research*
- Lignin. 2 5 5 8 . [Online]. Available: <http://www.icfar.ca/lignoworks/content/what-lignin.html>
- Lu X., Yamauchi K., Phaiboonsilpa N., Saka S. 2009. Two-step hydrolysis of Japanese beech as treated by semi-flow hot-compressed water. *The Japan Wood Research Society*, 55, 367-375
- Miler G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analysis Chemistry*, 31, 426-428
- Mishima D., Tateda M., Ike M., Fujita M. 2006. Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. *Bioresource Technology*, 97, 2166-2172

- Miyazawa T., Funazukuri T. 2005. Polysaccharide hydrolysis accelerated by adding carbon dioxide under hydrothermal conditions. *Biotechnology Progress*, 21, 1782-1785
- Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y. Y., Holtzaple M., Ladisch M. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96, 673-686
- Nelson, N. 1994. A photometric adaption of the somogyi method for the determination of glucose. *Journal of Biological Chemistry*, 153, 375-380
- Nolen S., Jie Lu., James S. Brown. 2002. Olefin epoxidations using supercritical carbon dioxide and hydrogen peroxide without added metallic catalysts or peroxy acids. *American Chemical Society*, 41, 316-323
- Ogbonna, J.C., Mashima, H. and Tanaka, H. 2001. Scale up of fuel ethanol production from sugar beet juice using loofa sponge immobilized bioreactor. *Bioresources Technology*, 76, 1-8
- Ogura M., Phaiboonsilpa, N., Yamauchi K., and Saka S. 2013. Two-step decomposition behavior of rice straw as treated by semi-flow hot-compressed water. *The Japan Institute of Energy*, 92, 319-326
- Palmqvist E., Hahn-Hagerdal B. 2002. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification. *Bioresource Technology*, 74, 17-24
- Phaiboonsilpa, N. Mai O., Yamauchi K., Rabemanolontsoa H. and Saka S. 2013. Two-step hydrolysis of rice (*Oryza sativa*) husk as treated by semi-flw hot-compressed water. *Industrial Crops and Products*, 49, 484-491
- Phaiboonsilpa, N., Tamunaida, P. and Saka S. 2011. Two step hydrolysis of nipa frond (*Nypa fruticans*) as treated by semi-flow hot-compressed water. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 65, 659-666
- Rabemanolontsoa H., Sumiko A., Shiro S. 2013. Comparative study on chemical composition of various biomass species. *The Royal Society of Chemistry* 2013, 3, 3946-3956
- Ragg P.L., Fields P.R. 1987. The Development of a process for the hydrolysis of lignocellulosic waste. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, A321, 537-547

- Rahman S.H.A., Choudhury J. P., Ahmad A. L., Kamaruddin A. H. 2007. Optimization studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose. *Bioresource Technology*, 98, 554-559
- Science HSC, 2013. Solubility of carbon dioxide, explained in terms of Le Chatelier's Principle. [Online]. Available: <https://sciencehsc.wordpress.com/tag/le-chateliers-principle/>
- Shapley P. 2012. Partial Oxidation Reactions of Sugars. [Online]. Available: <http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/GenChem2/B7/3.html>
- Silverstein, R.A., Chen, Y., Sharma-Shivappa, R.R., Boyette, M.D., Osborne, J. 2007. A comparison of chemical pre-treatment methods for improving saccharification of cotton stalks. *Bioresource Technology*, 98, 3000-3011
- Sluiter J.B., Ruiz R.O., Scarlata C.J., Sluiter A.D. and Templeton D.W. 2010. Composition analysis of lignocellulosic feedstocks. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 58, 9043-9053
- Smith J.M., Van Ness H. C., Abbott M.M. 2005. Introduction to chemical engineering thermodynamics. Chemical Engineering series, 7th
- Van Walsum G. P. 2001. Severity function describing the hydrolysis of xylan using carbonic acid. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 91-93, 317-329
- Van Walsum G. P., Shi H. 2004. Carbonic acid enhancement of hydrolysis in aqueous pretreatment of corn stover. *Biomass and Bioenergy*, 93, 217-266
- Yamauchi K., Phaiboonsilpa, N., Saka S. and Kawamoto H. 2011. Characterization of lignin-derived products from Japanese beech wood as treated by two-step semi-flow hot-compressed water. *Journal of Wood Science*, 59, 149-154
- Yu Y., Lou X., Wu H. 2008. Some recent advances in hydrolysis of biomass in hot-compressed water and its comparisons with other hydrolysis methods. *Energy & Fuels*, 22, 44-60
- Zhang H., Wu S. 2013. Subcritical CO<sub>2</sub> pretreatment of sugarcane bagasse and its enzymatic hydrolysis for sugar production. *Bioresource Technology*, 149, 546-550
- Zheng Y., Pan Z., Zhang R. 2009. Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2, 51-68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณ

#### 1. คำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบในไฮโดรไลเซท

ตัวอย่าง 1 คำนวณปริมาณไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ในไฮโดรไลเซทหลังการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เวลา 0 นาที ปริมาตร 6 มิลลิลิตร

พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ไฮโดรไลเซทเท่ากับ 478,740 และไฮโดรไลเซทหลังทำโพสตีไฮโดรไลซิส เท่ากับ 58,401 จากกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับความเข้มข้นของน้ำตาลไซโลสดังรูปที่ ข.2 คือ  $Y = 2.8596X$

เมื่อ  $Y$  คือ ความเข้มข้นของไซโลส (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

$X$  คือ พื้นที่ใต้กราฟ

$$\text{แทนค่า } Y = 2.8596 \times (478,740 \times 10^{-6})$$

$$Y = 1.3690 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ไฮโดรไลเซทมีปริมาตร 6 มิลลิลิตร จะมีปริมาณไซโลส} &= 1.3690 \times 6 \text{ มิลลิกรัม} \\ &= 8.2140 \text{ มิลลิกรัม} \\ &= 0.008214 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ในไฮโดรไลเซทมีไซโลสเท่ากับ 0.008214 กรัม

ปริมาณไซโลแซ็กคาไรด์หาได้จากปริมาณไซโลสที่ได้จากไฮโดรไลเซทหลังทำโพสตีไฮโดรไลซิส และเจือจางสารละลาย 10 เท่า

$$\text{แทนค่า } Y = 2.8596 \times (58,401 \times 10^{-6}) \times 10$$

$$Y = 1.6701 \text{ มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ในไฮโดรไลเซทปริมาตร 6 มิลลิลิตร มีปริมาณไซโลส} &= 1.6701 \times 6 = 10.0206 \text{ มิลลิกรัม} \\ &= 0.0100206 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ปริมาณไซโลแซ็กคาไรด์ทั้งหมดในไฮโดรไลเซท เท่ากับ 0.0100206 กรัม

## 2. คำนวณปริมาณผลได้และผลได้คืนมาของน้ำตาลรีตีวซ์

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์} = \frac{\text{ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์ที่วิเคราะห์ (กรัม)}}{\text{ปริมาณขานอ้อยแห้งเริ่มต้น (กรัม)}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลได้คืนมาของน้ำตาลรีตีวซ์} = \frac{\text{ผลได้ของน้ำตาลรีตีวซ์ (ร้อยละโดยมวล)}}{\text{น้ำตาลรีตีวซ์ในขานอ้อย (ร้อยละโดยมวล)}} \times 100$$

ตัวอย่าง 2 คำนวณปริมาณผลได้และผลได้คืนมาของน้ำตาลไซโลสหลังการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เวลา 0 นาที โดยใช้น้ำหนักขานอ้อยแห้งเริ่มต้น 0.0999 กรัม และจากตารางที่ 4.1 ในขานอ้อยมีน้ำตาลไซโลสร้อยละ 29.98 โดยมวล

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำตาลไซโลส} = \frac{0.0101}{0.0952} \times 100 = 10.03 \text{ โดยมวล}$$

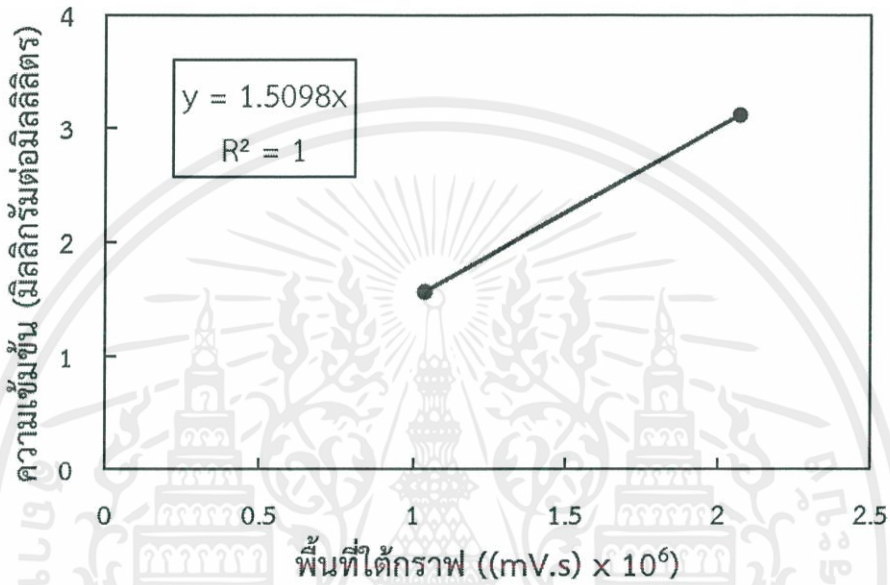
$$\text{ร้อยละผลได้คืนมาของน้ำตาลไซโลส} = \frac{10.03}{29.98} \times 100 = 33.46 \text{ โดยมวล}$$



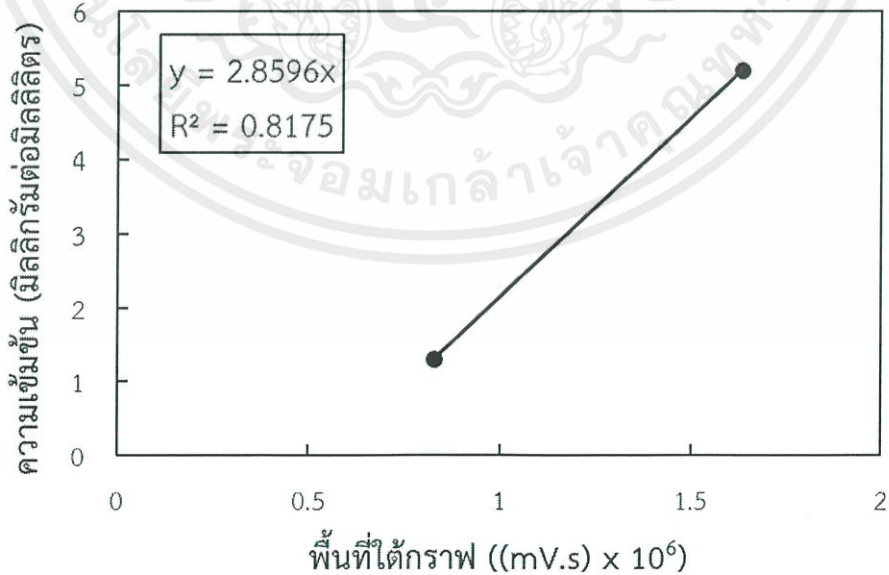
## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลดิบ

1. กราฟมาตรฐานสำหรับคำนวณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์และผลพลอยได้จากพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรม



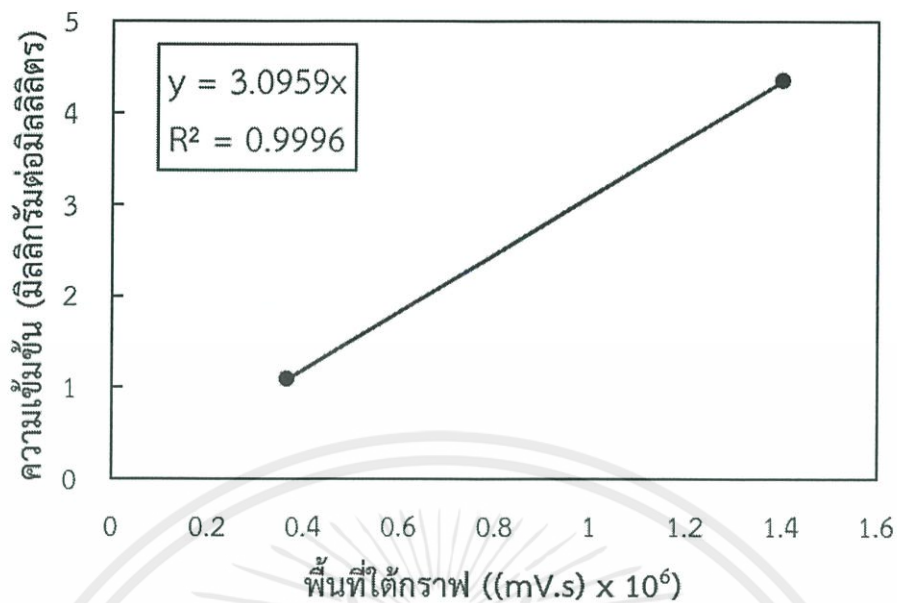
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของกลูโคส



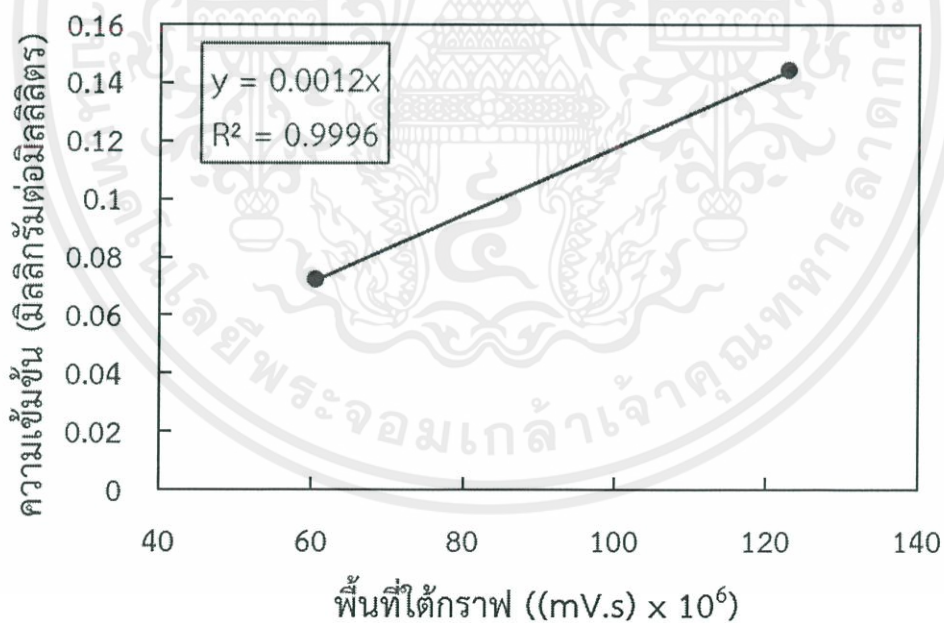
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของไซโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

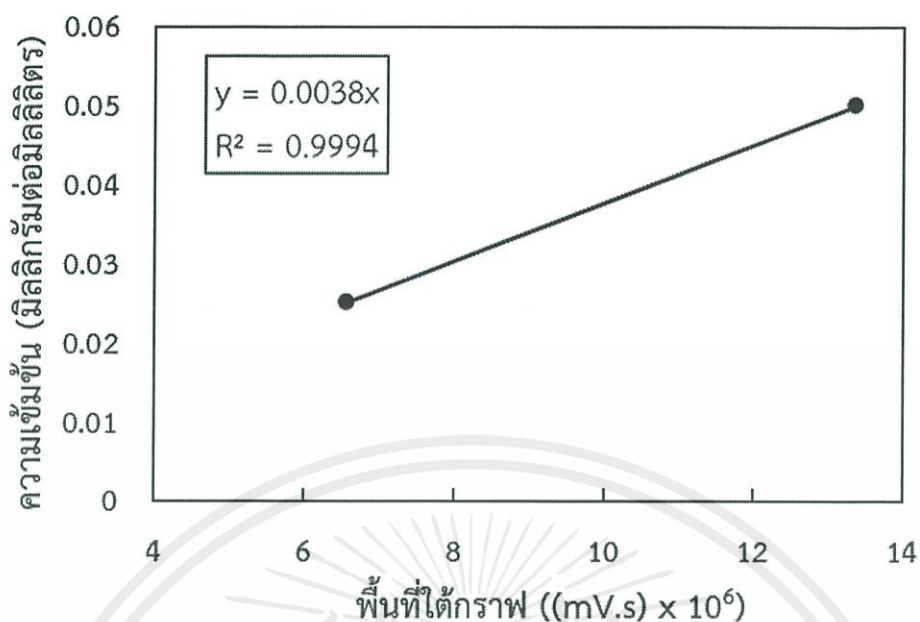
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 กราฟมาตรฐานพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของอะซาปรีนอส



รูปที่ ข.4 กราฟมาตรฐานพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของพาราเซตามอล



รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานพื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมและความเข้มข้นของไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล

## 2. พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรม

ตารางที่ ข.1 พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรม				
		กลูโคส	ไซโลส	อะราบีโนส	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอกซีเมทิล เฟอร์ฟูรัล
กลูโคส	3.1250	2,069,745	-	-	-	-
	1.5625	1,035,153	-	-	-	-
ไซโลส	5.2000	-	1,633,110	-	-	-
	1.3000	-	822,575	-	-	-
อะราบีโนส	4.3500	-	-	1,401,210	-	-
	1.0875	-	-	366,111	-	-
เฟอร์ฟูรัล	0.1440	-	-	-	122,838,079	-
	0.0720	-	-	-	60,509,962	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน (ต่อ)

สารละลายมาตรฐาน	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรม				
		กลูโคส	ไซโลส	อะราบิโนส	เพอร์ฟูรัล	ไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟูรัล
ไฮดรอกซีเมทิล	0.0500	-	-	-	-	13,359,143
เพอร์ฟูรัล	0.0250	-	-	-	-	6,547,603

ตารางที่ ข.2 พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส  
 ขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลาย  
 ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำร้อนอัดความดัน		น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	
	กลูโคส	เซลโลแซ็กคาไรด์	กลูโคส	เซลโลแซ็กคาไรด์	กลูโคส	เซลโลแซ็กคาไรด์
170	1,337	3,915	984	6,252	13,371	4,436
190	1,178	955	1,898	47,797	110,885	7,404
210	1,675	5,963	953	111,520	126,197	21,031
230	44,771	14,557	10,781	7,662	535,611	62,753
250	165,135	15,511	54,485	12,608	311,147	41,935

ตารางที่ ข.3 พื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมของไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส  
 านอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลาย  
 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำร้อนอัดความดัน		น้ำอัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		สารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	
	ไซโลส	ไซโล แซ็กคาไรด์	ไซโลส	ไซโล แซ็กคาไรด์	ไซโลส	ไซโล แซ็กคาไรด์
170	1,901	13,567	6,252	26,629	123,772	51,863
190	21,755	43,063	47,797	90,000	440,398	53,963
210	148,696	114,340	111,520	99,280	478,740	58,401
230	468,584	63,953	483,085	99,334	155,879	14,971
250	147,334	8,558	12,608	990	78,632	8,863

ตารางที่ ข.4 พื้นที่ได้กราฟโครมาโทแกรมของอะราบินอสและอะราบินอสทั้งหมดที่ได้จากการ  
 ไฮโดรไลซิสานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ  
 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซ  
 คาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำร้อนอัดความดัน		น้ำอัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		สารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	
	อะราบินอส	อะราบินอส ทั้งหมด	อะราบินอส	อะราบินอส ทั้งหมด	อะราบินอส	อะราบินอส ทั้งหมด
170	37,515	6,054	43,257	6,287	19,951	2,566
190	37,938	5,551	52,319	6,753	23,975	3,533
210	60,102	6,474	49,307	5,992	42,427	2,374

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของอะราบิโนสและอะราบิโนสทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซิสซันอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำร้อนอัดความดัน		น้ำอัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		สารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	
	อะราบิโนส	อะราบิโนส ทั้งหมด	อะราบิโนส	อะราบิโนส ทั้งหมด	อะราบิโนส	อะราบิโนส ทั้งหมด
230	15,314	4,424	63,891	5,151	15,139	1,405
250	4,890	-	-	-	20,468	3,923

ตารางที่ ข.5 พื้นที่ใต้กราฟโครมาโทแกรมของเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสซันอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำร้อนอัดความดัน		น้ำอัด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์		สารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	
	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอก ซีเมทิล เฟอร์ฟูรัล	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอก ซีเมทิล เฟอร์ฟูรัล	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอก ซีเมทิล เฟอร์ฟูรัล
170	257,243	1,013,368	525,878	22,496	2,499,458	924,891
190	1,611,368	114,280	6,235,154	1,236,269	36,680,185	7,919,916
210	26,545,513	1,987,646	15,289,399	993,288	102,093,652	10,155,333
230	134,659,258	11,988,836	94,846,513	8,459,120	2,416,044	1,806,362
250	147,605,418	35,324,816	241,187,151	84,422,830	170,136,829	280,303,686

3. ปริมาณน้ำตาลรีตีวซ์และผลพลอยได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ข.6 ร้อยละโดยมวลของปริมาณกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	กลูโคส (ร้อยละผลได้คั้นมา)	เซลโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คั้นมา)	เซลโลแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คั้นมา)
170	0.01 (10.00%)	0.09 (90.00%)	0.10 (100%)
190	0.04 (12.50%)	0.28 (87.50%)	0.32 (100%)
210	0.01 (1.75%)	0.56 (98.25%)	0.57 (100%)
230	0.07 (2.79%)	2.44 (97.21%)	2.51 (100%)
250	1.13 (21.08%)	4.23 (78.92%)	5.36 (100%)

ตารางที่ ข.7 ร้อยละโดยมวลของปริมาณกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	กลูโคส (ร้อยละผลได้คั้นมา)	เซลโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คั้นมา)	เซลโลแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คั้นมา)
170	0.01 (5.56%)	0.17 (94.44%)	0.18 (100%)
190	0.02 (5.88%)	0.32 (94.12%)	0.34 (100%)
210	0.01 (1.92%)	0.51 (98.08%)	0.52 (100%)
230	0.09 (13.43%)	0.58 (86.57%)	0.67 (100%)
250	0.48 (55.17%)	0.39 (44.83%)	0.87 (100%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ร้อยละโดยมวลของปริมาณกลูโคสและเซลโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัตราการคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	กลูโคส (ร้อยละผลได้คืนมา)	เซลโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)	เซลโลแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)
170	0.11 (29.73%)	0.26 (70.27%)	0.37 (100%)
190	0.91 (100%)	0.00	0.91 (100%)
210	1.14 (59.69%)	0.77 (40.31%)	1.91 (100%)
230	4.38 (85.88%)	0.75 (14.62%)	5.13 (100%)
250	2.79 (74.20%)	0.97 (25.80%)	3.76 (100%)

ตารางที่ ข.9 ร้อยละโดยมวลของปริมาณไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสชานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไซโลส (ร้อยละผลได้คืนมา)	ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)	ไซโลแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)
170	0.03 (1.26%)	2.35 (98.74%)	2.38 (100%)
190	0.01 (0.06%)	15.53 (99.94%)	15.54 (100%)
210	0.61 (2.77%)	21.41 (97.23%)	22.02 (100%)
230	0.74 (6.80%)	10.15 (93.20%)	10.89 (100%)
250	0.06 (1.89%)	3.11 (98.11%)	3.17 (100%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ร้อยละโดยมวลของปริมาณไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อย  
ด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไซโลส (ร้อยละผลได้คืนมา)	ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)	ไซโลแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)
170	0.11 (2.45%)	4.38 (97.55%)	4.49 (100%)
190	0.80 (5.28%)	14.34 (94.72%)	15.14 (100%)
210	2.01 (11.24%)	15.88 (88.74%)	17.89 (100%)
230	8.02 (48.61%)	8.48 (51.39%)	16.50 (100%)
250	0.21 (100%)	0.00	0.21 (100%)

ตารางที่ ข.11 ร้อยละโดยมวลของปริมาณไซโลสและไซโลแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสขานอ้อย  
ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซ  
คาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไซโลส (ร้อยละผลได้คืนมา)	ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)	ไซโลแซ็กคาไรด์ (ร้อยละผลได้คืนมา)
170	1.93 (23.86%)	6.16 (76.14%)	8.09 (100%)
190	6.83 (81.70%)	1.53 (18.30%)	8.36 (100%)
210	8.22 (81.95%)	1.81 (18.05%)	10.03 (100%)
230	2.41 (100%)	0.00	2.41 (100%)
250	1.34 (88.74%)	0.17 (11.26%)	1.51 (100%)

ตารางที่ ข.12 ร้อยละโดยมวลของปริมาณอะราบิโนสและอะราบิโนสทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซิส  
 านอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อะราบิโนส (ร้อยละผลได้คืนมา)	อะราบิโนสที่อยู่ใน รูปโซ่กิ่งของไซแลน (ร้อยละผลได้คืนมา)	อะราบิโนสทั้งหมด (ร้อยละผลได้คืนมา)
170	0.71 (100%)	0.00	0.71 (100%)
190	0.00	0.12 (100%)	0.12 (100%)
210	0.12 (100%)	0.00	0.12 (100%)
230	0.03 (9.09%)	0.30 (90.91%)	0.33 (100%)
250	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ข.13 ร้อยละโดยมวลของปริมาณอะราบิโนสและอะราบิโนสทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซิส  
 านอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อะราบิโนส (ร้อยละผลได้คืนมา)	อะราบิโนสที่อยู่ใน รูปโซ่กิ่งของไซแลน (ร้อยละผลได้คืนมา)	อะราบิโนสทั้งหมด (ร้อยละผลได้คืนมา)
170	0.79 (100%)	0.00	0.79 (100%)
190	0.95 (100%)	0.00	0.95 (100%)
210	0.96 (100%)	0.00	0.96 (100%)
230	1.15 (100%)	0.00	1.15 (100%)
250	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ร้อยละโดยมวลของปริมาณอะราบินอสและอะราบินอสทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซิส  
 ขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซ  
 คาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อะราบินอส (ร้อยละผลได้คืนมา)	อะราบินอสที่อยู่ใน รูปโซ่กิ่งของไซแลน (ร้อยละผลได้คืนมา)	อะราบินอสทั้งหมด (ร้อยละผลได้คืนมา)
170	0.34 (100%)	0.00	0.34 (100%)
190	0.40 (100%)	0.00	0.40 (100%)
210	0.79 (100%)	0.00	0.79 (100%)
230	0.25 (100%)	0.00	0.25 (100%)
250	0.38 (100%)	0.00	0.38 (100%)

ตารางที่ ข.15 ร้อยละโดยมวลของปริมาณเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการ  
 ไฮโดรไลซิสขานอ้อยด้วยน้ำร้อนอัดความดัน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล
170	0.00	0.02
190	0.00	0.00
210	1.89	0.07
230	7.65	0.64
250	1.16	1.13

ตารางที่ ข.16 ร้อยละโดยมวลของปริมาณเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสซันอ้อยด้วยน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล
170	0.00	0.00
190	0.04	0.03
210	0.12	0.03
230	0.66	0.19
250	1.70	5.05

ตารางที่ ข.17 ร้อยละโดยมวลของปริมาณเฟอร์ฟูรัลและไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสซันอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เฟอร์ฟูรัล	ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล
170	0.02	0.02
190	0.24	0.16
210	0.74	0.23
230	0.02	0.04
250	1.21	6.34

4. ปริมาณกากของแข็งหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ข.18 ปริมาณกากของแข็งหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดันน้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณกากของแข็ง (ร้อยละโดยมวล)		
	น้ำร้อน อัดความดัน	น้ำอัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	สารละลาย ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
170	82.82	77.97	54.00
190	71.71	63.92	33.79
210	54.71	52.52	30.53
230	41.20	41.78	19.22
250	35.48	36.67	1.39

#### 5. ดัชนีความเป็นผลึก

ตารางที่ ข.19 ดัชนีความเป็นผลึกของกากของแข็งหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยน้ำร้อนอัดความดัน น้ำอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ดัชนีความเป็นผลึก		
	น้ำร้อนอัดความดัน	น้ำอัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	สารละลาย ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ อัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
170	39.70	38.27	45.34
190	40.67	47.47	48.52
210	49.30	46.05	61.27
230	60.85	51.92	64.51
250	71.98	57.05	66.56