

กระบวนการไฮโดรไลซิสซีลี้อยไม้ยางพาราด้วยกรดเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

Acid Hydrolysis of Para Rubber Tree Sawdust
(*Hevea brasiliensis*) for Reducing Sugar Production



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

กระบวนการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม้ยางพาราด้วยกรดเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

Acid Hydrolysis of Para Rubber Tree Sawdust
(*Hevea brasiliensis*) for Reducing Sugar Production



T149208



สตูดิโอ หอมยา
สรินดา หน่อเมืองคำ
สุนทร แสงสาร

ค.พ.
๑/๖๒๗
๒๕๕๘

๒๐๐๒๖๖๓๗๓

เลขหมู่.....149208
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....29 ส.ค. 2561

๑๒๘๘๒๑๘๕
b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชา ชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACID HYDROLYSIS OF PARA RUBBER TREE SAWDUST
(*Hevea brasiliensis*) FOR REDUCING SUGAR PRODUCTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN BIOTECHNOLOGY
DEPARTMENT OF BIOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ กระบวนการไฮโดรไลซิสซีเลียมัยยางพาราด้วยกรดเพื่อผลิตน้ำตาลรีตีวซ์
Acid Hydrolysis of Para Rubber Tree Sawdust
(*Hevea brasiliensis*) for Reducing Sugar Production

ชื่อนักศึกษา นางสาวสุดดี หมอยา รหัสนักศึกษา 55051182
นางสาวสรินดา หน่อเมืองคำ รหัสนักศึกษา 55051188
นายสุนทร แสงสาร รหัสนักศึกษา 55051202

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต เทคโนโลยีชีวภาพ

ภาควิชา ชีววิทยา

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ สุขใจ ชูจันทร์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีชีวภาพ ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.อารี ฤทธิบุรณ์ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.มารีสา จาตุพรพิพัฒน์ กรรมการ	
รศ.สุขใจ ชูจันทร์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	



(รศ.ดวงใจ โอชัยกุล)

ประธานสาขา

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	กระบวนการไฮโดรไลซิสซีเลื่อยไม้ยางพาราด้วยกรดเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์
ชื่อนักศึกษา	นางสาว สดุดี หมอยา รหัสนักศึกษา 55051182
	นางสาว สรินดา หน่อเมืองคำ รหัสนักศึกษา 55051188
	นาย สุนทร แสงสาร รหัสนักศึกษา 55051202
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต เทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชา	ชีววิทยา
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ สุขใจ ชูจันทร์

บทคัดย่อ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซิสซีเลื่อยไม้ยางพาราด้วยกรดซัลฟิวริกโดยนำวัตถุดิบมาบดและรอนให้ได้ขนาดของซีเลื่อยไม้ยางพารา 3 ขนาด คือ น้อยกว่า 500 ระหว่าง 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร ตามลำดับ หลังจากนั้นปรับสภาพซีเลื่อยไม้ยางพาราด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยใช้อัตราส่วนของตัวอย่างต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 1 ต่อ 10 กรัมต่อมิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าซีเลื่อยขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร ให้ปริมาณของน้ำตาลมากที่สุดและเป็นขนาดที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรไลซิส คือสามารถผลิตปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเท่ากับ 20.46 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 5.32 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร รองลงมาคือ ขนาดตัวอย่างระหว่าง 500-850 ไมโครเมตรและขนาดตัวอย่างมากกว่า 850 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกโดยเปรียบเทียบน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากตัวอย่างทั้ง 3 ขนาด ทำการกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการไฮโดรไลซิส 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.2 โมลาร์ เวลา 90 นาที และอัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรด 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าซีเลื่อยขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตรให้น้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด จึงได้นำซีเลื่อยขนาดนี้มาไฮโดรไลซิสอีกครั้งด้วยกรดซัลฟิวริก โดยศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการไฮโดรไลซิส 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เวลา และอัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรด โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกคือ 0.1 0.2 และ 0.4 โมลาร์ เวลา 60 90 และ 120 นาที อัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรดคือ 1:10 1:20 และ 1:30 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์เซียส จากการทดลองพบว่า การไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้อย่างพาราโดยใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.4 โมลาร์ เวลา 120 นาที และอัตราส่วนซีเลื้อยไม้อย่างพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก (กรัมต่อมิลลิลิตร) 1:10 เป็นสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด คือ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 37.16 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ 19.48 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

คำสำคัญ : การปรับสภาพ ซีเลื้อยไม้อย่างพารา น้ำตาลรีดิวิซ์ ไฮโดรไลซิส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title Acid Hydrolysis of Para Rubber Tree Sawdust (*Hevea brasiliensis*)
for Reducing Sugar Production

Student Miss Sadudee Morya Student ID 55051182
Miss Sarinda Normaungkum Student ID 55051188
Mr. Suntorn Sangsarn Student ID 55051202

Degree Bachelor of Science

Programme Biotechnology

Year 2015

Special project Advisor Associate Professor Sukjai Choojun

ABSTRACT

The study of reducing sugar production from Para Rubber Tree Sawdust (*Hevea brasiliensis*) were blended and separated size by sieve (less than 500, 500-850 and more than 850 μm). After that, adjust the samples to pretreatment with 4% NaOH. Ratio of sample per acid volume (1:10 g/ml) at 70°C for 2 hours. The result showed that the optimal size of samples (Para Rubber Tree Sawdust) were less than 500 μm that can spend a maximum of total sugar, 20.462 mg/ml and produces a maximum of reducing sugar, 5.320 mg/ml. Next below is size of samples were 500-850 μm and more than 850 μm in sequence. This sawdust was hydrolyzed by sulfuric acid (H_2SO_4). The sample (sawdust) was compared amount of reducing sugar there were three size. Set factors that affect to hydrolyzed are concentration of H_2SO_4 (0.2 M), time (90 min) and ratio of sample per acid volume (1:10 g/ml) at 121 °C, at the first hydrolyzed. The result showed that the optimal size of samples (sawdust) were less than 500 μm that can spend a maximum of reducing sugar. Then, sawdust at this size is the best appropriate for hydrolyzed again with H_2SO_4 . Study this three factors that affect to hydrolyzed are concentration of H_2SO_4 (0.1, 0.2 and 0.4 M), time (60, 90 and 120 min) and ratio of sample per acid volume (1:10, 1:20 and 1:30 g/ml) at 121 °C, at second hydrolyzed. The result acid hydrolysis of para rubber tree sawdust (*Hevea brasiliensis*) showed that the optimal condition for hydrolyzed of samples (sawdust size less than 500 μm) were 0.4 M of H_2SO_4 at 120 min and ratio of sample per acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

volume is 1:10 g/ml that can spend a maximum of total sugar, 37.16 mg/ml and production a maximum reducing sugar, 19.48 mg/ml.

Keyword: Hydrolysis, Reducing sugars, Para Rubber Tree Sawdust, Pretreatment



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ได้จัดทำขึ้นตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ สุขใจ ชูจันทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการทำโครงการพิเศษ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ให้ความสนับสนุน ความช่วยเหลือ คำแนะนำ รวมทั้งกรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์และครบถ้วนยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อารี ฤทธิบุรณ ประธานกรรมการ และ รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์ มาริสา จาตุพรพิพัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาชีววิทยาทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอดและขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการชีววิทยา ภาควิชาชีววิทยา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ขอขอบคุณพี่ปริญญ์โท พี่จ๋า พี่ลูกแก้ว รวมถึงเพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุน ดูแล และมีส่วนช่วยให้โครงการพิเศษชิ้นนี้เสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนผู้ที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้

หากโครงการพิเศษฉบับนี้มีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ทางคณะผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ทั้งหมด ส่วนคุณความดีและประโยชน์ที่ปรากฏในโครงการพิเศษฉบับนี้ ขอยกให้เป็นคุณความดีของผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวสุดดี	หมอยา
นางสาวสรินดา	หน่อเมืองคำ
นายสุนทร	แสงสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	XII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไม้ยางพารา	3
2.1.1 ลักษณะโครงสร้าง	3
2.1.2 คุณสมบัติของไม้ยางพารา	5
2.1.3 การใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 ซึ่ล้อยไม้ยางพารา	6
2.3 วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส	7
2.3.1 เซลลูโลส	11
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส	12
2.3.3 ลิกนิน	15
2.4 กระบวนการเตรียมตัวอย่าง (pretreatment process)	18
2.4.1 การเตรียมตัวอย่างทางกายภาพ	20
2.4.2 การเตรียมตัวอย่างทางเคมี-ฟิสิกส์	21
2.4.3 การเตรียมตัวอย่างทางชีวภาพ	23
2.5 การไฮโดรไลซิส	25
2.5.1 การไฮโดรไลซิสด้วยกรด	25
2.5.2 การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์	27
2.5.3 การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ (enzyme hydrolysis)	27
2.6 น้ำตาลรีดิวซ์	30
2.6.1 การนำมาผลิตเอทานอล	30
2.7 ปฏิกิริยาฟีนอล-ซัลฟิวริก (phenol-sulfuric acid reaction)	30
2.8 ปฏิกิริยาของกรด-3, 5 ไดไนโตรซาลิไซลิก	31
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์	36
3.2 เครื่องมือ	36
3.3 สารเคมี	37
3.4 วัสดุดิบ	37
3.5 กระบวนการปรับสภาพวัสดุดิบด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	38
3.6 กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อหาขนาดของตัวอย่างที่ดีที่สุด	38
3.7 กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	39
3.8 วิธีวิเคราะห์ผล	40
3.8.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล	40
3.8.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ	41

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษากระบวนการปรับสภาพขี้เลี้ยงไม่ยางพาราด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์	42
4.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการไฮโดรไลซ์ขี้เลี้ยงยางพารา	43
4.3 ผลการศึกษาการไฮโดรไลซ์กระดาษเหลือใช้ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	43

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง	52
--------------------	----

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	8
2.2 แสดงส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลสในพืชที่มีระบบท่อลำเลียง	9
2.3 แสดงองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง	14
2.4 กระบวนการต่างๆที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างของมวลชีวภาพจำพวกลิกโนเซลลูโลส	23
3.1 แสดงการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส โดยวางแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟกทอเรียล	40
4.1 แสดงปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากกระบวนการปรับสภาพขี้เลื่อยไม้ยางพารา	42
4.2 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยยางพารา แต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	43
4.3 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟกทอเรียล	44
4.4 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่สภาวะต่างๆ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟกทอเรียล	45
4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยยางพารา โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟกทอเรียล	47
4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่สภาวะต่างๆ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟกทอเรียล	48
ก.1 การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร	61

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.2 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำตาล (ไม่โครกรัมต่อมิลลิลิตร) ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร	62
ก.3 การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0-0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	64
ก.4 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำตาล (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร	64
ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรและปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 3 ซ้ำการทดลอง จากการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม้อย่างพาราด้วยกรด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	66
ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 3 ซ้ำการทดลอง จากการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม้อย่างพาราด้วยกรด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	68
ค.1 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของกระบวนการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม้อย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	70
ค.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม้อย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	71
ค.3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเวลาในกระบวนการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม้อย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	71
ค.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราส่วนในกระบวนการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม้อย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของกระบวนการไฮโดรไลซ์ซีเลื่อยไม้ยางพารา เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ $3 \times 3 \times 3$ แฟคทอเรียล	73
ค.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ซีเลื่อยไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ $3 \times 3 \times 3$ แฟคทอเรียล	74
ค.7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเวลาในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ซีเลื่อยไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ $3 \times 3 \times 3$ แฟคทอเรียล	74
ค.8 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราส่วนในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ซีเลื่อยไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ $3 \times 3 \times 3$ แฟคทอเรียล	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไม้ยางพารา	3
2.2 คุณสมบัติทางเคมีของไม้ยางพารา	4
2.3 ภาพขยายเนื้อไม้ยางพารา (<i>Hevea brasiliensis</i>) ในด้าน cross section, tangential section และ radial section จากกล้องจุลทรรศน์	4
2.4 เฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา	5
2.5 วัสดุไม้จากไม้ยางพารา	6
2.6 ซีลี้อยไม้ยางพารา	7
2.7 โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลส	7
2.8 แสดงโครงสร้างภายในผนังเซลล์พืช	10
2.9 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส	11
2.10 แสดงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	13
2.11 แสดงโครงสร้างของลิกนิน	16
2.12 โครงสร้างสารโมเลกุลเดี่ยวสามชนิดที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ลิกนิน	17
2.13 แสดงบทบาทของการเตรียมตัวอย่าง (pretreatment)	18
2.14 สรุปรูปวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างของวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส	20
2.15 โครงสร้างของน้ำตาลรีดิวิซ์	29
2.16 ปฏิกริยาของวิธีฟินอล-ซิลฟิวริก	31
2.17 ปฏิกริยาของวิธี DNS	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก	62
ก.4 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีดีเอ็นเอส	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ส่วนใหญ่ทำการเพาะปลูกพืชผลทางการเกษตร ทำให้มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (agriculture waste หรือ agro waste) เป็นจำนวนมาก ปัจจุบันจึงมีการศึกษาวิธีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น เพราะนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้เหล่านี้แล้ว ยังเป็นการลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย โดยการทำการทดลองในครั้งนี้ได้เลือกใช้วัสดุเหลือใช้คือ ชี้เลี้ยง

หากพูดถึงชี้เลี้ยง อาจจะรู้จักในลักษณะเศษไม้ หรือผงฝุ่นเล็กๆ ของไม้ที่เกิดจากการแปรรูปในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้เป็นเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือที่ไร้ค่า อาจจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุเพาะเห็ด วัสดุในการก่อสร้าง เช่น ไม้อัด อิฐ ผสมในเครื่องปั้นดินเหนียวเพื่อช่วยในการขึ้นรูป ส่วนประกอบในการทำรูป หรืออัดแท่งเป็นถ่านเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวมวล แต่ใครจะคิดว่าชี้เลี้ยงสามารถนำมาเพิ่มมูลค่าได้มากกว่านั้น ชี้เลี้ยงจากไม้มีหลายชนิดโดยในการทดลองครั้งนี้จะใช้ ชี้เลี้ยงไม้อย่างพารา ซึ่งมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในต่างประเทศมีการนำไม้เบิร์ชมาผลิตเป็นไซแลน และไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่มีมูลค่าสูง สำหรับประเทศไทย ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากการย่อยไซแลนจากชี้เลี้ยง ในด้านการวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือที่เกิดจากอุตสาหกรรมยางพารา ยังมีอยู่น้อย โดยเฉพาะวัสดุเศษเหลือจากการแปรรูปไม้อย่างพารา ได้แก่ ชี้เลี้ยง ปัจจุบันการใช้ประโยชน์ชี้เลี้ยงไม้อย่างพารามักนำมาใช้เป็นวัสดุชีวมวลหรือเชื้อเพลิง การผลิตผงถ่านกัมมันต์ การแปรรูปไม้อัด ใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ด เป็นต้น จะเห็นได้ว่าชี้เลี้ยงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอีกทั้งยังคงเหลือในรูปของเศษวัสดุเหลือทิ้ง โรงงานบางแห่งอาจนำชี้เลี้ยงไปเผาทำลาย ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน นักวิจัยจึงได้เริ่มศึกษาหาข้อมูลของชี้เลี้ยงในเชิงลึกเพื่อให้สามารถนำวัสดุด้วยค่านี้นี้กลับมาให้มีคุณค่าและมูลค่าเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการใช้ประโยชน์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อนำมาผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

1.2.2 ศึกษากระบวนการและสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ (pretreatment) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง เพื่อใช้ในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

1.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ยางพาราด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อสามารถผลิตน้ำตาลให้ได้ปริมาณสูงที่สุด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และศึกษาปริมาณลิกโนเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในขี้เลื่อยยางพารา ทำการศึกษากระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการปรับสภาพ และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขี้เลื่อยไม้ยางพาราหลังจากทำการปรับสภาพ เช่น ปริมาณลิกนินและเซลลูโลส เป็นต้น และทำการศึกษากิจกรรมการ และสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรไลซ์ (hydrolysis) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้ปริมาณสูงที่สุด โดยนำขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เป็นวัสดุเหลือใช้มาเพิ่มมูลค่า และทำให้เกิดประโยชน์ ศึกษาปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์รวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกระบวนการไฮโดรไลซ์ (hydrolysis) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ในปริมาณสูงสุด

1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

1.4.3 เป็นแนวทางในการนำขั้นตอนการผลิตน้ำตาลกลูโคส ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมต่อไป

1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มปริมาณผลผลิตน้ำตาลกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไม้ยางพารา

ไม้ยางพาราเป็นไม้ยืนต้นทรงพุ่มขนาดใหญ่ ที่มีอายุยืนนานมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ ในป่าลุ่มแม่น้ำอะเมซอนของประเทศบราซิล เป็นไม้อยู่ในสกุล (genus) *Hevea* และวงศ์ (family) Euphorbiaceae ซึ่งวงศ์นี้มีอยู่ไม่น้อยกว่า 10 ชนิด ซึ่งลักษณะลำต้นมีขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ชนิดที่ให้น้ำยางมาก และดีที่สุดคือ *Hevea Brasiliensis* ซึ่งเป็นที่นิยมปลูกในประเทศไทย และประเทศใกล้เคียง



รูปที่ 2.1 ไม้ยางพารา

ที่มา : บริษัท สยามชัย พาราวัตุ จำกัด (มปป.)

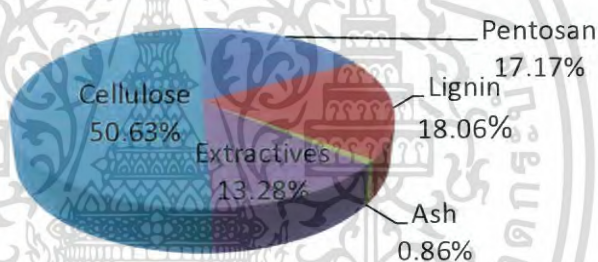
2.1.1 ลักษณะโครงสร้าง

ไม้ยางพาราไม่มีวงเจริญเติบโตให้เห็นเด่นชัดทางด้านหน้าตัด แต่จะเห็นเป็นลายไม้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความแน่นของไฟเบอร์ และปริมาณความหนาแน่นของหมู่เยื่อ parenchyma ทางด้านข้าง pore เตี้ยและแผด 2-3 คละกัน กระจายห่างๆ อย่างสม่ำเสมอ มี metatracheal parenchyma (concertric) ตัดกับ ray เห็นเป็นลักษณะตาข่ายทางด้านหน้าตัด

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นกลม สูงปานกลาง เปลือกสีเทาดำ มองทางด้านหน้าตัด จะเห็นท่อน้ำยาง (latex vessel) ต่อกันเป็นวงตามแนวด้านสัมผัส (tangential) เนื้อไม้มีสีขาวอมเหลืองเมื่อสด และจะมีสีขาวจางเมื่อแห้ง เนื้อหยาบปานกลาง เส้นตรง วงรอบปีไม่เห็นชัด ไม่มีแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรย์ (ray) มีขนาดเล็กมากและมีสีอ่อนกว่าเนื้อไม้ พอร์ (pore) เป็นแบบ radial multiple ซึ่งการเรียงตัวจะตัดกันระหว่างเรย์กับ metatracheal parenchyma ทำให้มองดูเนื้อไม้คล้ายตาข่าย มีความหนาแน่นพื้นฐาน (basic density) 0.56-0.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับที่ความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นประมาณ 0.67-0.74 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีค่าใกล้เคียงกับไม้ soft maple ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของยางพารานั้นๆ สำหรับขนาดของเส้นใยไม้อยางพาราประมาณ 1.26 มิลลิเมตร โดยมีความกว้างประมาณ 0.021 มิลลิเมตร คุณสมบัติทางเคมีของไม้อยางพาราสดโดยคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักอบแห้งประกอบด้วย สารแทรก (extractives) 13.28 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสารแทรกแบ่งเป็นสารที่สามารถละลายในน้ำรวม 10.36 เปอร์เซ็นต์ และละลายได้ในสารละลายรวม 23.24 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลส (cellulose) 50.63 เปอร์เซ็นต์ (holocellulose 78.72 เปอร์เซ็นต์ และ alpha cellulose 49.41 เปอร์เซ็นต์) เพนโตซาน (pentosan) 17.17 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน (lignin) 18.06 เปอร์เซ็นต์ และเถ้า (ash) 0.86 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของไม้อยางพารา



ที่มา : สุรชัย ศรีชินราช (2556)

รูปที่ 2.3 ภาพขยายเนื้อไม้อยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ในด้าน cross section, tangential section และ radial section จากกล้องจุลทรรศน์

ที่มา : สุรชัย ศรีชินราช (2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติด้านกายสมบัติ (physical property) ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ และด้านกลสมบัติ (strength property) ได้แก่ ความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยน ความเค้นอัดขนานเสี้ยน ความเค้นเฉือนขนานเสี้ยนและความแข็งแรง ไม้สักจะมีการดูดหรือคายความชื้นจากอากาศได้ต่ำกว่าไม้ยางพารา ส่งผลให้ไม้สักมีการคงรูปที่ดีกว่าเมื่อนำไปใช้งาน

2.1.3 การใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่หาได้ง่าย แต่ไม่จัดเป็นไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานของกรมป่าไม้และสำนักงานมาตรฐาน กระทรวงอุตสาหกรรม เป็นไม้ที่ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นไม้ในการก่อสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากขนาดไม้ยางพาราที่จะนำมาเป็นไม้แปรรูปเป็นขนาดไม้ก่อสร้างหายาก การบิดงอและไม้คงทนเป็นสาเหตุสำคัญ ทั้งนี้ไม้ยางพาราแปรรูปส่วนใหญ่นำไปใช้ผลิตเป็นของเด็กเล่น ของใช้ในครัวเรือน กรอบรูป ของชำร่วย วัสดุรองสินค้า (pallet) ลังใส่ผลไม้ วัสดุก่อสร้าง เพอร์นิเจอร์ ชิ้นส่วนเพอร์นิเจอร์ และเครื่องเรือน โดยเฉพาะ โต๊ะ เก้าอี้ เพราะใช้ไม้แปรรูปที่มีขนาดเล็ก และไม้ยาวนักสามารถเลือกไม้ส่วนที่ตัดมาทำโต๊ะและเครื่องเรือนได้



โต๊ะ เก้าอี้

พาลเลท

ลังไม้

รูปที่ 2.4 เพอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา

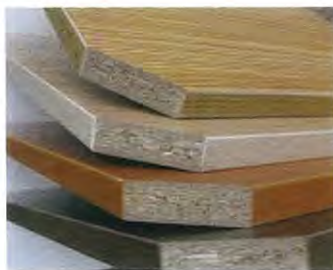
ที่มา : สุรัชชัย ศรีชินราช (2556)

ประเภทวัสดุไม้ประกอบ และวัสดุทดแทนไม้ เช่น นำไปใช้ผลิตไม้อัด (plywood) ไม้แผ่นปาร์ติเคิล (particle board) และไม้แผ่น เอ็ม ดี เอฟ (MDF) หรือแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (medium density fibre board) ไม้ต่อ (wood joint) และ ไม้ประกบ (laminated wood) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ไม้อัด



ปาร์ติเคิลบอร์ด



MDF

รูปที่ 2.5 วัสดุไม้จากไม้ยางพารา

ที่มา : สุชัย ศรีชินราช (2556)

2.2 ขี้เลื่อยไม้ยางพารา

ขี้เลื่อย (sawdust or wood dust) เป็นผลพลอยได้จากการเลื่อยไม้ มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด ขี้เลื่อยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ที่มีหมู่โพลีฟีนอล ซึ่งสามารถจับกับโลหะหนักได้ด้วยกลไกต่างกัน ขี้เลื่อยไม้ยางพารามาจากต้นยางพาราต้นแก่อายุ 22-50 ปี ซึ่งเป็นไม้เนื้ออ่อน สามารถย่อยสลายเร็ว มีสารอาหารหลายชนิด คือ คาร์บอน ไนโตรเจน ลิกนิน และเซลลูโลส

ขี้เลื่อยใช้ทำประโยชน์ได้ดังนี้

- ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรูปอัดเม็ด
- ใช้เพาะเห็ดหลายชนิด
- เป็นส่วนประกอบในการทำรูป
- ใช้เป็นวัสดุโดยผ่านส่วนผสมและการบีบอัดขึ้นรูป เช่น ถาด จานรอง
- ใช้ผสมดินโดยตรง เพื่อให้ดินอมน้ำ
- ใช้รองพื้นคอกสัตว์ หรือสัตว์เลี้ยงในบ้าน เช่น กระจ่ายหนูตะเภา
- ใช้เป็นวัสดุประกอบในการก่อสร้าง เช่น ไม้อัด อิฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



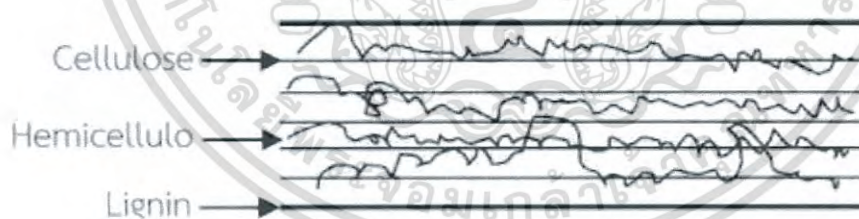
รูปที่ 2.6 ชี้เลื่อยไม้ยางพารา

ที่มา : จริยาภรณ์ อุ๋นวงศ์ (2556)

2.3 วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส

วัสดุลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลส หมายถึง ซิวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบมากในผนังเซลล์ของพืช ได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ทั้งไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้ออ่อน เศษวัสดุจากการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และพวงฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหาร และจากบ้านเรือนรวมถึงมูลสัตว์ต่างๆ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลส

ที่มา : สุภาวดี (2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	ร้อยละของ	ร้อยละของเฮมิ	ร้อยละของลิกนิน
	เซลลูโลส	เซลลูโลส	
ลำต้นไม้เนื้อแข็ง	40-50	24-40	18-25
ลำต้นไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-30	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	35	30-40
ซังข้าวโพด	45	35-50	15
หญ้า	25-40	0	10-30
กระดาศ	85-99	50	0-15
ฟางข้าวสาลี	30	20	15
ขยะ หรือเศษของที่ใช้แล้วแยก	60	80-85	20
ประเภท			
ไปไม้	15-20	5-20	0
ใยเมล็ดฝ้าย	80-95	25-40	0
กระดาศหนังสือพิมพ์	40-55	10-20	18-30
เศษกระดาศจากหนังสือ	60-70	NA	5-10
ของแข็งจากน้ำเสียขั้นแรก	8-15	28	24-29
มูลวัว ควาย ปศุสัตว์	1.6-4.7	1.4-3.3	NA
หญ้าพันธุ์ Coastal Bermuda	25	35.7	2.7-5.7
หญ้าพันธุ์ Switch	45	31.4	12.0

ที่มา : สุขใจ ชูจันทร์ (2554)

องค์ประกอบที่สำคัญของมวลชีวภาพ

พืชที่มีเนื้อเยื่อระบบท่อลำเลียง ในผนังเซลล์ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นส่วนประกอบหลัก พอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด ในแต่ละชนิดจะยึดติดกันด้วยแรงของพันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der walls) เป็นต้น ทำให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรงรวมกันเป็น ลิกโนเซลลูโลสซึ่งมีมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งของเซลล์พืช ปริมาณของพอลิเมอร์แต่ละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิด อายุ และส่วนต่างๆของพืช โดยทั่วไปในพืชไม้เนื้ออ่อน (softwood) มีลิกนินเป็นส่วนประกอบมากกว่าไม้เนื้อแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ในพืชตระกูลหญ้า พบเฮมิเซลลูโลสในปริมาณสูงที่สุด ในไม้ยืนต้นลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลสประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และลิกนินประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลสในพืชที่มีระบบท่อลำเลียง

แหล่งลิกโนเซลลูโลส	ลิกนิน (เปอร์เซ็นต์)	เซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)	เฮมิเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)
หญ้า (Grasses)	10-30	25-40	25-50
ไม้เนื้ออ่อน (softwood)	25-35	45-50	25-35
ไม้เนื้อแข็ง (Hard wood)	18-25	45-55	24-40

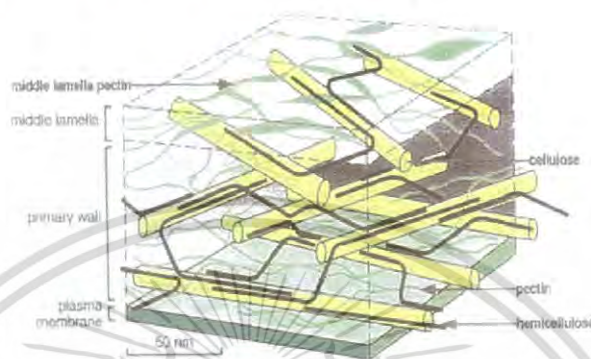
ที่มา : สุขใจ ชูจันทร์ (2554)

โครงสร้างของผนังเซลล์พืช

ผนังเซลล์พืชมีหลายขนาดและแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น โดยผนังเซลล์ชั้นนอกจะมีเซลล์ที่แบ่งตัวอย่างรวดเร็ว (meristematic cell) และเซลล์ที่ทำให้เกิดการยืดขยายขนาด (elongation cell) เป็นองค์ประกอบ ในช่วงที่พืชมีการเจริญเติบโตผนังเซลล์พืชมักมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยผนังเซลล์ชั้นที่ 2 ที่อยู่ภายใน ส่งผลให้เซลล์มีความยืดหยุ่นลดลง ส่วนผนังเซลล์ในชั้นที่ 3 จะไม่มีรูปร่างแน่นอนเป็นชั้นที่เรียกว่า ลามেলাชั้นกลาง (middle lamella) ทำหน้าที่ในการเชื่อมเซลล์ที่อยู่ใกล้กันให้ติดกัน เนื่องจากประกอบด้วยเกลือแคลเซียมของกรดเพกติก (calcium salts of pectic acid) ซึ่งช่วยทำให้เกิดการติดกันภายในโครงสร้างที่ประกอบเป็นผนังเซลล์ การกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีภายในผนังเซลล์ พบว่าในลามেলাชั้นกลางจะมีลิกนินอยู่มาก และมีความหนาประมาณ 1-2 ไมโครเมตร โดยมีการเรียงตัวแบบไม่มีรูปร่างแน่นอน จึงเกิดเป็นรูพรุนภายในโครงสร้าง เมื่อพืชมีการเจริญเติบโต ผนังเซลล์ชั้นแรกจากด้านในมักจะบาง ขณะที่ผนังเซลล์ชั้นที่ 2 จะหนาขึ้นระหว่างที่เซลล์เจริญ และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส ในโครงสร้างที่เป็นช่องกลวงภายใน พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครไฟบริลของเซลลูโลสที่ขัดเป็นวง ทำให้เส้นใยเหนียว มีความยืดหยุ่น และกันน้ำได้ เนื่องจากมี ลิกนิน หรือองค์ประกอบที่คล้ายขี้ผึ้ง ส่วนเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดการไขว้กันอย่างใกล้ชิด และเชื่อมให้ ลิกนินติดกับเซลลูโลส โดยองค์ประกอบของเส้นใยที่สมบูรณ์จะเป็นเส้นตรงที่มีสมบัติยืดหยุ่นและ แข็งแรง ขณะที่ลิกนินนั้นทำให้โครงสร้างไม่ละลายน้ำ



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างภายในผนังเซลล์พืช
ที่มา : พิษณุ ศรีกระกุล (2547)

ลักษณะทางเคมีและสมบัติของผนังเซลล์พืช

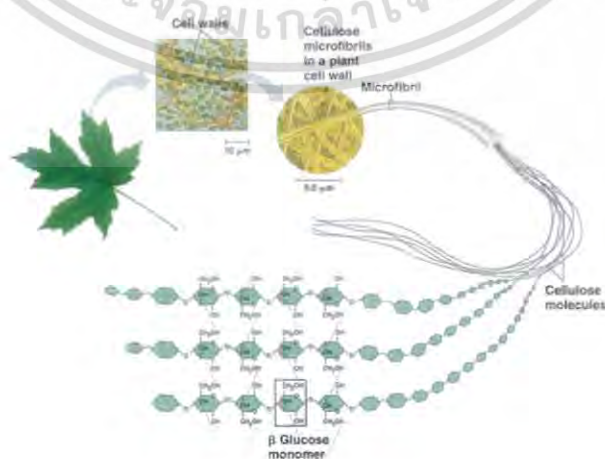
ผนังเซลล์พืช มีหน้าที่ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงและมีความคงรูป แต่ทั้งนี้แรงดันน้ำ ภายในเซลล์มีส่วนทำให้ผนังเซลล์เกิดการขยายตัว และพองตัวได้ในธรรมชาติ ผนังเซลล์ทำหน้าที่เป็น ทางผ่านของไอออนและน้ำ เมื่อผนังเซลล์ถูกล้อมรอบด้วยน้ำ จึงทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำและ สารละลายต่างๆ ผ่านเข้าออกเซลล์พืชได้ โดยเคลื่อนที่ผ่านผนังเซลล์ด้วยกระบวนการแพร่ ส่วนน้ำ สามารถระเหยผ่านผนังเซลล์โดยตรงเช่นกัน ดังนั้นผนังเซลล์พืชจึงทำหน้าที่เป็นช่องทางให้น้ำเกิดการ เคลื่อนที่ผ่านเข้าออกด้วยโครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชเป็นสายโซ่ตรงที่ประกอบด้วย เบตา-ดี-กลูโคไพราโนส (β -D-glucopyranose) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ (1,4) เมื่อสายโซ่นี้จัดเรียงตัว เป็นวงแหวนแล้ววางตัวในระนาบเดียวกัน จะมีลักษณะคล้ายริบบิ้นที่จัดเรียงตัวหลายแบบอยู่ใน โครงสร้างของผนังเซลล์การเรียงตัวของสายโซ่เซลลูโลสหลายๆ เส้นจะได้มาโครไฟบริล (macrofibril) ซึ่งช่องแคบระหว่างไมโครไฟบริลของเซลลูโลสจะมีสารภายในเซลล์ (matrix) ที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน ล้อมรอบช่องแคบๆ ระหว่างไมโครไฟบริล ทำให้ขนาดของผนังเซลล์พืชมีความหนาขึ้น และยังมีสาร อื่นๆ ได้แก่ น้ำ สารที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non cellulose polysaccharide) เช่น เพกติน (pectin) โปรตีนบางส่วน น้ำในรูปที่อยู่อิสระและเป็นองค์ประกอบกับ

สารอื่นหรือสารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียม และซิลิเกต เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) เป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุชีวภาพเซลลูโลส โดยพบในส่วนผนังเซลล์ของพืชอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ปริมาณที่พบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เซลลูโลสเป็นโฮโมโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-D-กลูโคไพราโนส (β -D-glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก (β -1,4-glycosidic bond) เกิดเป็นโพลิเมอร์กลูแคน (glucan) มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปในธรรมชาติพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ crystalline cellulose และ amorphous cellulose โดยส่วนของ crystalline cellulose จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ 2 แบบ คือ crystalline cellulase และ amorphous cellulase และส่วนของ crystalline cellulose จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์มากกว่า amorphous cellulose (เวสาร์ช และคณะ, 2556; Eriksson และคณะ, 1990) เป็นพอลิเมอร์สายยาว และมีมวลโมเลกุลสูงเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในธรรมชาติ ส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ในพืชชั้นสูงทุกชนิด ซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลสมากกว่า 97-99 เปอร์เซ็นต์ จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ประกอบด้วย polymer chain เรียงขนานกัน และยึดกันด้วย dispersion force และ hydrogen bond ภายในโมเลกุลเซลลูโลสจึงยึดติดกันแน่น และการเรียงตัวอยู่ในรูปผลึก ทำให้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้ช้า เซลลูโลสใน primary cell wall ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และไม่ต่ำกว่า 14,000 โมเลกุลใน secondary cell wall โดยโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาว และเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) เพื่อให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช (Fan และคณะ, 1987)



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส

โครงสร้างของเซลลูโลส

เซลลูโลสมีโครงสร้างเส้นใยเล็กๆ ที่เรียกว่าไฟบริล (fibril) ซึ่งมีลักษณะเป็นมัดยาวรวมกันอยู่อย่างแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซี การจัดเรียงตัวของโมเลกุลไฟบริลทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างหลายรูปแบบ โครงสร้างทางเคมี และกายภาพของเซลลูโลสเกิดจากไฟบริล หรือโปรโตไฟบริลที่มีการเรียงตัวขนาน และจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นแผ่นบางๆ และเมื่อตัดขวางแผ่นบางๆ เหล่านี้จะพบส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวขนานกันไป โดยบางส่วนอาจเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งบริเวณนี้ทำให้เซลลูโลสสลายตัวและแยกออกจากกันได้ โดยการเข้าทำปฏิกิริยาของของเหลว เช่น กรดแก่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดเป็นรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยแรงกล เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบ และขีดจำกัดของความยืดหยุ่นของไมโครไฟบริล

สมบัติของเซลลูโลส

สมบัติของเซลลูโลสก็มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับน้ำ โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบเปลี่ยนแปลงไป เซลลูโลสที่มีลักษณะแห้งจะดูดความชื้น ทำให้เซลลูโลสสามารถพองตัว หรือหดตัวได้แต่ในบางสภาวะ เช่น เมื่อเซลลูโลสอยู่ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เซลลูโลสจะไม่เกิดการพองตัวเหมือนอยู่ในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ ความสามารถในการพองตัวของเซลลูโลสอยู่ในช่วง 9-21.1 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยการดูดน้ำหรือความชื้นจะเกิดจากท่อขนาดเล็กจำนวนมากที่อยู่ตามพื้นที่ผิวสัมผัสของเซลลูโลส และพื้นที่ทั้งหมดของวัสดุ โดยทั่วไปเซลลูโลสสามารถพองตัวได้ประมาณ 100 เท่าของวัสดุขณะแห้ง ซึ่งการพองตัวได้จะทำให้ตัวทำละลายต่างๆ เข้าทำลายโครงสร้างได้ง่ายขึ้น

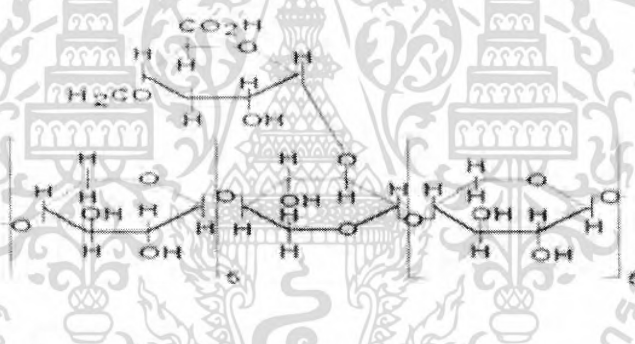
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส ($C_5(H_2O)_4$)_n หรือ ($C_6H_2O_5$)_n เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ และมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด กล่าวคือ มีไซโลสมากที่สุดถึง 85-90 เปอร์เซ็นต์และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม กรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรด เบสเจือจาง เอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

พืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลส และอะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนส และกาแลกโตส องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า (1,4) และพบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไป เฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมทิล-แอลฟา-D-กลูโคส (4-methyl- α -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้ง่ายด้วยสารละลายเบส แต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นอาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ร่วมด้วย



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา : สุรัชย์ ศรีชินราช (2556)

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง

ชนิดไม้	ชนิดเฮมิเซลลูโลส	จำนวน เปอร์เซ็นต์ ของไม้	ส่วนประกอบ			
			หน่วย	อัตราส่วน (โมลาร์)	พันธะ	ระดับการเกิด พอลิเมอร์
ไม้ เนื้ออ่อน	กาแล็กโทกลูโคโรแมนแนน (galactoglucomannan)	10-15	β -D-Manp	4	1,4	100
			β -D-Glcp	1	1,4	
			β -D-Galp	0.1	1,6	
	อะราบิโนกลูคูโรโนไซแลน (arabino glucuronoxylan)	7-10	Acetyl	1		100
			β -D-Xylp	10	1,4	
			4-o-Me- α -D- GlcA	2	1,2	
ไม้ เนื้อแข็ง	กลูคูโรโนไซแลน (glucuronoxylan)	15-30	β -D-Xylp	10		200
			4-o-Me- α -D- GlcA	1	1,4	
			β -L-Araf	1.3	1,3	
	กลูโคแมนแนน (glucomannan)	2-5	β -D-Manp	1-2	1,4	200
			β -D-Glcp	1	1,4	
			Acetyl	7	1,2	

ที่มา : สุขใจ ชูจันทร์ (2554)

เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้ออ่อน

มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 3 ชนิด คือ กลูโคแมนแนน กาแล็กโทกลูโคโรแมนแนน และ อะราบิโนกลูโคโรโนไซแลน พอลิเมอร์ที่มีไซโลสเป็นส่วนประกอบ 2 ชนิด (กลูโคแมนแนน และ กาแล็กโทกลูโคโรแมนแนน) แตกต่างกันมากที่ส่วนประกอบของกาแล็กโทส ซึ่งส่วนประกอบของน้ำตาล ในพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีสัดส่วนโดยประมาณดังนี้ กาแล็กโทส : กลูโคส : แมนโนส คือ 0.1 : 1 : 4 และ 1 : 1 : 3 ตามลำดับ สายโซ่หลักประกอบด้วยหน่วยของ 1,4- β -D-glucopyranose และหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ β -D-mannopyranose ส่วนหน่วยของ α -D-galactopyranose เชื่อมต่อกับสายโซ่หลักด้วยพันธะ 1,6 น้ำตาลสายโซ่หลักถูกเติมหมู่อะซิทธิลที่ C-2 หรือ C-3 โดยหมู่อะซิทธิล 1 หมู่ จะเข้าจับทุกๆ 3-4 หน่วย อะราบิโนกลูโคโรโนไซแลนมีหลายโซ่หลักของหน่วย 1,4- β -D-xylopyranose บางส่วนที่ตำแหน่ง C-2 จะจับกับ 4-O-methyl- α -D-glucuronic acid และที่ C-3 จับกับหน่วยของ α -L-arabinofuranose

เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็ง

มีส่วนประกอบหลัก คือ กลูคูโรโนไซแลนมีสายโซ่หลักต่อกันด้วยหน่วยของ 1,4- β -D-xylopyranose ซึ่งส่วนมากจะถูกเติมหมู่อะซิทธิลที่ C-2 หรือ C-3 โดย 4-O-methyl- α -D-glucuronic acid จับกับสายโซ่หลักที่ C-2 และพบที่น้ำตาลไซโลสทุกๆ 10 หน่วย

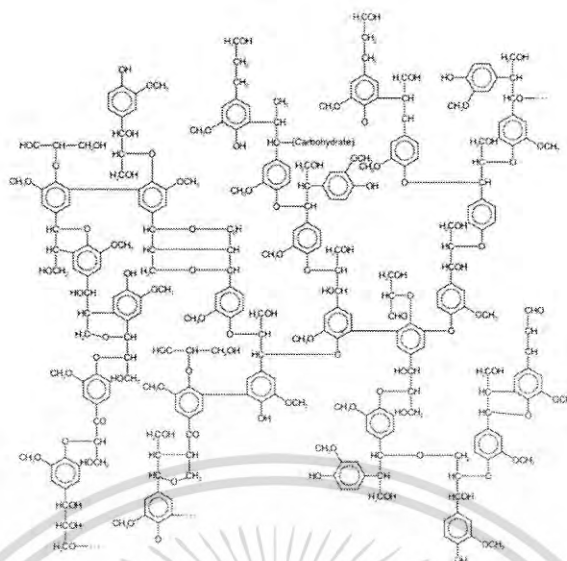
สมบัติของเฮมิเซลลูโลส

ส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุด และพบส่วนน้อยในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกย่อยสลาย และสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพกติน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะชอบน้ำ ทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลได้ ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำแต่สามารถละลายได้ในเบส

2.3.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช พบในปริมาณที่แตกต่างกันไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลล์ไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ลิกนินเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเทอร์ หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ ชนิดอื่นๆ ลิกนินไม่ตกผลึก (Cheng และคณะ, 2008) ประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ประกอบด้วย tran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohol และ trans-p-sinapyl alcohol (Eriksson และคณะ, 1990) นอกจากนี้โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่นอีกมากมาย เช่น vanillin และ syringaldehyde (Yudkin และ Offord, 1993) สูตรโครงสร้างของ tran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohol และ trans-p-sinapyl alcohol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของลิกนิน
ที่มา : บุญรอด วงษ์สวาท (2558)

โครงสร้างของลิกนิน

ลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากหน่วยที่เหมือนกันซ้ำๆ ประกอบเป็นโมเลกุลที่ใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมธิลอยู่บนโมเลกุลลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้า และไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน

สมบัติของลิกนิน

ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือ การละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง ขณะที่บางส่วนในกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไดออกเซน (dioxane) ไพริดีน (pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้ นอกจากนี้เมื่อมีการเติมหมู่เมธิล (methylation) และหมู่อะซีทิล (acetylation) แทนที่ตำแหน่งต่างๆบนวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 280 นาโนเมตร ทั้งนี้การเติมไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ก็เป็นกรเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่โครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้ด้วยกรที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้ลูนิทรีและเอนไซม์ไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่รวมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้การใช้ประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องใช้ในการปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อน และป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนินรวมทั้งให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป

สารตั้งต้นโดยตรงของลิกนินคือแอลกอฮอล์ 3 ชนิด เรียกว่า mono-lignol ได้จากกรด p-hydroxycinnamic ประกอบด้วย coniferyl alcohol (guaiacyl propanol), p-coumaryl alcohol (p-hydroxyphenyl propanol) และ sinapyl alcohol (syringyl alcohol) โดยทั่วไปในพืชสมุนไพรหรือพืชลำต้นไม้อ่อน เช่น กล้วยไม้ลิกนินเป็นส่วนประกอบน้อยที่สุด ขณะที่ไม้เนื้ออ่อนมีลิกนินเป็นส่วนประกอบมากที่สุด

ไม้เนื้ออ่อน ลิกนินประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างหลักที่มาจาก coniferyl alcohol บางชนิดมาจาก p-coumaryl alcohol แต่ไม่มีมาจาก sinapyl alcohol

ไม้เนื้อแข็ง (พืชใบเลี้ยงคู่) ลิกนินประกอบด้วยหน่วยของ coniferyl และ sinapyl alcohol แต่ละส่วนเท่าๆ กัน ประมาณ 46 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนย่อย คือ p-hydroxyphenyl propanol ซึ่งได้จาก p-coumaryl alcohol มีประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

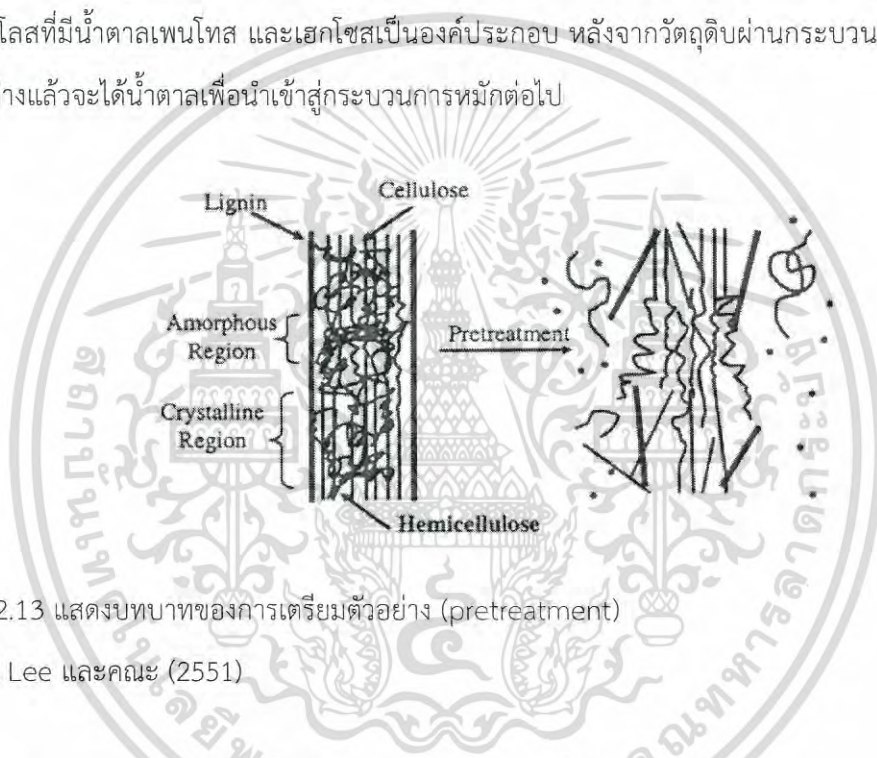
ลิกนินในพืชตระกูลหญ้า ประกอบด้วยหน่วยของ coniferyl alcohol , sinapyl alcohol และ hydroxyphenyl propanol กับ p-coumaric acid (ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ของลิกนิน) ส่วนใหญ่จะถูกเอสเทอร์ไฟต์ (esterified) ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่สลายไปของ p-coumaryl alcohol ที่สายด้านข้าง



รูปที่ 2.12 โครงสร้างสารโมเลกุลเดี่ยวสามชนิดที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ลิกนิน

ที่มา : Eriksson และ คณะ (1990)

การนำวัสดุเหลือใช้ หรือกากมวลชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบราคาถูกในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆโดยกระบวนการหมักทางชีวภาพ ขั้นตอนแรกต้องผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่าง (pretreatment) วัตถุดิบก่อน เพราะส่วนประกอบของวัตถุดิบเหล่านี้เป็นพอลิเมอร์เซลลูโลส ซึ่งจะสลายไปเป็นน้ำตาลที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการหมักได้ยาก ดังนั้นกระบวนการเตรียมตัวอย่าง หมายถึง การเปลี่ยนโครงสร้างของมวลชีวภาพโดยการละลายและแยกส่วนประกอบของมวลชีวภาพ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารสกัดอื่นๆ ดังรูปที่ 2.13 เพื่อให้มวลชีวภาพส่วนที่เป็นของแข็งที่เหลืออยู่ง่ายต่อการนำไปทำการไฮโดรไลซ์ โดยทำลายพันธะไฮโดรเจนในเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสที่มีน้ำตาลเพนโทส และเฮกโซสเป็นองค์ประกอบ หลังจากวัตถุดิบผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างแล้วจะได้น้ำตาลเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป



รูปที่ 2.13 แสดงบทบาทของการเตรียมตัวอย่าง (pretreatment)

ที่มา : Lee และคณะ (2551)

ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อผลิตในเชิงพาณิชย์ประสบความสำเร็จในการเปลี่ยนแปลง ลิกโนเซลลูโลสเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ การเปลี่ยนแปลงต่อไปหลังจากการเตรียมตัวอย่าง มี 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสเพื่อให้ได้น้ำตาลรีดิคซ์ และต่อจากนั้นเป็นกระบวนการหมัก น้ำตาลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ กระบวนการไฮโดรไลซิสโดยทั่วไปเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์เซลลูเลส ปัจจัย ที่มีผลต่อการย่อยสลายเซลลูโลส คือ ความพรุน (porosity) หรือ ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนของวัตถุดิบ หรือ ช่องว่างระหว่างพื้นที่ผิวผลึกของเส้นใยเซลลูโลสและปริมาณของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสมีผล ทำให้ประสิทธิภาพของเอนไซม์เซลลูเลสลดลงส่งผลให้ได้ปริมาณซบสเตรดต่ำ การศึกษา ของห้องปฏิบัติการพลังงานจากวัตถุดิบทดแทนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory ; NREL) ได้เสนอว่าลิกนินปริมาณต่ำอาจทำให้การย่อยสลายเซลลูโลสง่ายขึ้นจาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบนี้ทำให้มีการแยกเส้นใยเซลลูโลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส ดังนั้น การกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส การลดขนาดผลึกของเซลลูโลส และการเพิ่มช่องว่าง (ความพรุน) ระหว่างโมเลกุลของวัตถุดิบในกระบวนการเตรียมตัวอย่างเป็นการพัฒนากระบวนการย่อยสลายลิกนินเซลลูโลสอย่างมีนัยสำคัญทำให้เซลลูโลสตอบสนองต่อการย่อยของเอนไซม์ได้ดีขึ้น

วิธีการเตรียมตัวอย่าง (Pretreatment method)

วิธีการเตรียมตัวอย่างทำได้หลายวิธี ดังนี้

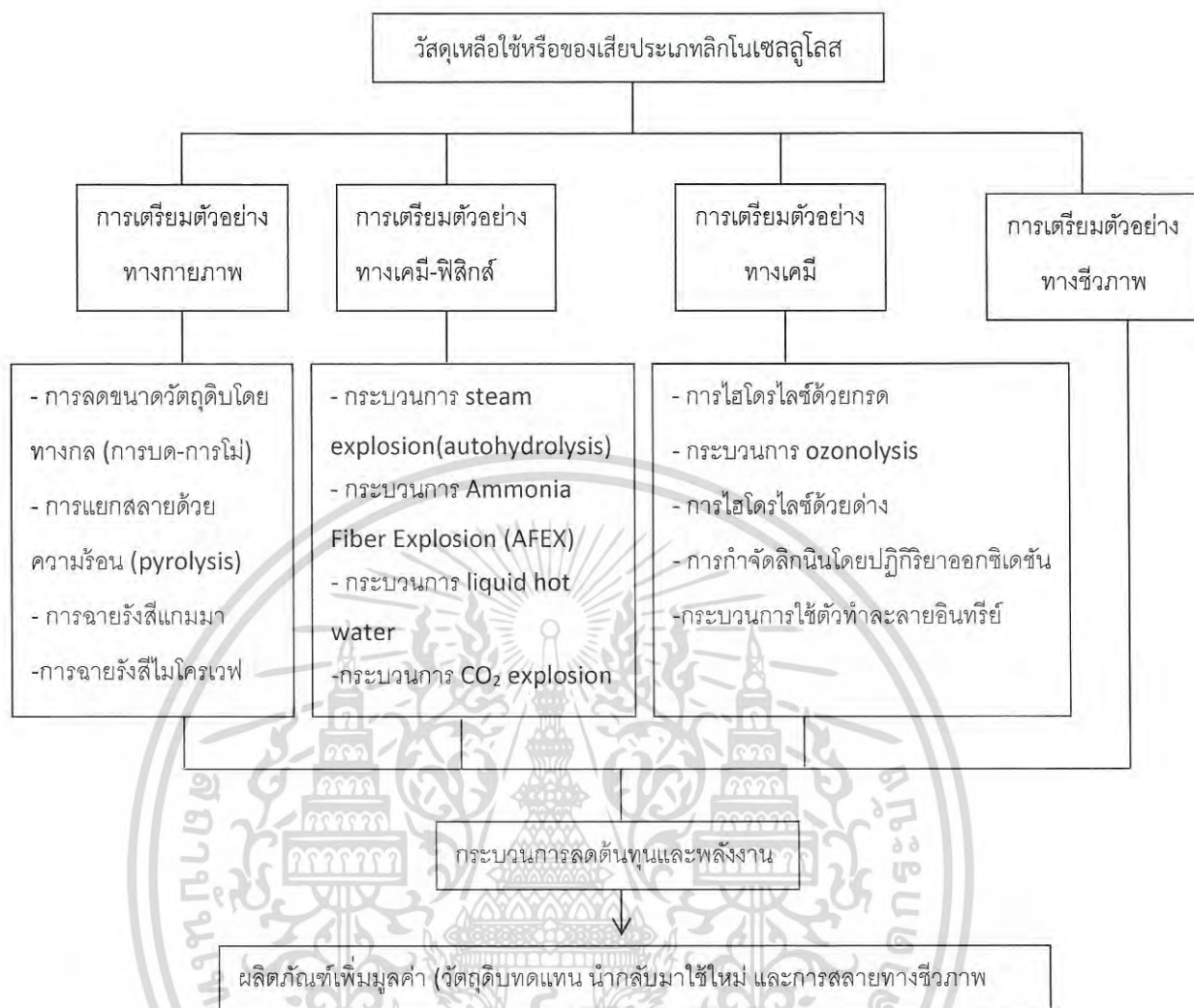
1. การเตรียมตัวอย่างทางกายภาพ (physical pretreatment) ได้แก่ การลดขนาดวัตถุดิบโดยทางกล (mechanical comminution) เช่น การบด (grinding) การโม่ (milling) การแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis)

2. การเตรียมตัวอย่างทางเคมี-ฟิสิกส์ (physico-chemical pretreatment) ได้แก่ กระบวนการ steam explosion (autohydrolysis) กระบวนการ ammonia fiber explosion (AFEX) กระบวนการ liquid hot water กระบวนการ CO₂ explosion

3. การเตรียมตัวอย่างทางเคมี (chemical pretreatment) ได้แก่ การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (acid hydrolysis) กระบวนการ ozonolysis การไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง (alkaline hydrolysis) การกำจัดลิกนินโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative delignification) กระบวนการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (organosolv process)

4. การเตรียมตัวอย่างทางชีวภาพ (biological pretreatment)

สรุปวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างของวัสดุจำพวกลิกนินเซลลูโลส ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สรุปลักษณะต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างของวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส
ที่มา : ดัดแปลงจาก Mtui (2009)

2.4.1 การเตรียมตัวอย่างทางกายภาพ

2.4.1.1 การลดขนาดวัตถุดิบโดยทางกล

วิธีการทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทุบ การบด การโม่ การเขย่าวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดผลึก (cellulose crystallinity) และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ความสามารถในการลดขนาดจะขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุนั้น ซึ่งปกติขนาดของเศษวัตถุดิบจะทำให้มีขนาดประมาณ 0.2-2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2 การแยกสลายด้วยความร้อน

การเตรียมตัวอย่างของวัตถุดิบจำพวกลิกโนเซลลูโลสโดยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน มีกระบวนการดังนี้ เมื่อวัตถุดิบได้รับความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส เซลลูโลส จะถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ผลผลิตโดยเปลี่ยนเป็นแก๊สและส่วนที่เหลือ คือถ่าน (char) การสลายตัวจะเกิดช้าลง และผลิตภัณฑ์มีการระเหยเล็กน้อยเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส การไฮโดรไลซ์วัสดุที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยกรดเจือจาง (กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ 80-85 เปอร์เซ็นต์ โดยได้กลูโคสมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนนี้สามารถเพิ่มผลผลิตได้ในที่มีออกซิเจน และเมื่อเติมซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาทำให้การย่อยสลายเซลลูโลสบริสุทธิ์สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ

2.4.2 การเตรียมตัวอย่างทางเคมี-ฟิสิกส์

2.4.2.1 กระบวนการ Steam explosion (autohydrolysis)

วิธี steam explosion เป็นวิธีทั่วไปที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างของวัสดุจำพวก ลิกโนเซลลูโลส วิธีนี้มีผลชีวภาพที่ผ่านการลดขนาดให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะถูกนำไปให้ความร้อนด้วยไอน้ำ อิ่มตัวที่ความดันสูง และต่อมาความดันจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้วัตถุดิบถูกย่อยสลายโดยเซลล์แตก ระเบิดออกมา (explosive decompression) เพื่อเป็นการเปิดโครงสร้างของเซลล์พืช การใช้ steam explosion จะเกิดที่อุณหภูมิ 160-260 องศาเซลเซียส (ความดัน 0.69-4.83 เมกะปาสกาล; MPa) โดยใช้เวลาประมาณ 3-8 นาที ก่อนที่วัตถุดิบจะดันพุ่งออกมาข้างนอก steam explosion เป็นกระบวนการที่เป็นสาเหตุให้เฮมิเซลลูโลสสลายตัว และลิกนินเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก อุณหภูมิสูงเป็นการเพิ่มศักยภาพของการไฮโดรไลซ์เซลลูโลส ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมตัวอย่างโดยวิธี steam explosion คือ เวลาที่ใช้ อุณหภูมิ ขนาดของวัตถุดิบ และปริมาณความชื้น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของการละลาย และการไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลส คือที่อุณหภูมิสูง และเวลาสั้น (อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เวลา 1 นาที) หรือที่อุณหภูมิต่ำแต่ใช้เวลานาน (อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที) และมีการศึกษาเพื่อชี้แนะว่าสภาวะอุณหภูมิต่ำ และเวลานานเป็นสภาวะที่ นิยมใช้กันมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 กระบวนการ Ammonia Fiber Explosion (AFEX)

วิธีการนี้ใช้แอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิระหว่าง 60-100 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันระยะเวลาหนึ่ง แล้วทำการลดความดันลง ซึ่งมีผลต่อวัตถุดิบโดยวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการนี้จะมีอัตราการเป็นน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณของเฮมิเซลลูโลสไม่เหมาะสมกับพืชที่มีลิกนินอยู่มาก ในกระบวนการนี้สามารถนำแอมโมเนียกลับมาใช้ได้ใหม่ และไม่ก่อให้เกิดตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น อาทิเช่น การระเบิดด้วยไอน้ำจะได้ลักษณะของตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) สามารถทำการแยกเป็นส่วนเป็นของแข็ง และของเหลวออกจากกันได้ ในขณะที่ AFEX จะให้ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพเป็นของแข็งเท่านั้น (Alvira และคณะ, 2010)

2.4.2.3 กระบวนการเตรียมตัวอย่างโดยใช้น้ำร้อน

การใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 200-230 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที เป็นผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาแบบอัตโนมัติ (autocatalyzed pretreatment) ทำให้เกิดการไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสแต่จะได้ลิกนินในปริมาณสูง ทำให้การไฮโดรไลซ์ของเอนไซม์เซลลูเลสลดลง ซึ่งขึ้นกับสภาวะที่ใช้ลิกนิน 30-46 เปอร์เซ็นต์ ในเปลือกข้าวโพดจะถูกกำจัดออก การผลิตสารที่เป็นตัวยับยั้ง เช่น ฟิวรัล (furfural) และไฮดรอกซีเมทิลฟิวรัล (hydroxymethyl furfural) มีรายงานว่าปริมาณน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ของไซแลน ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตเริ่มต้นที่มีการปลดปล่อยออกมาในรูปแบบโอลิโกเมอร์ (oligomer) การย่อยสลายเซลลูโลสโดยเอนไซม์ได้ผลผลิตกลูโคสประมาณ 25-95 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตที่ได้ การประยุกต์ใช้การเตรียมตัวอย่างโดยวิธีนี้กับไม้เนื้อแข็ง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงกลูโคสไปเป็นเอทานอลหลังจากกระบวนการแช่คาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการหมักที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน (simultaneous saccharification and fermentation ; SSF) ได้ผลผลิตประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

2.4.2.4 กระบวนการ Carbon Dioxide Explosion

วิธีการนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากกรดคาร์บอนิกในการเพิ่มปฏิกิริยาย่อยสลายขั้นต่อไป นิยมใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมด้วย อาทิเช่น เอทานอลช่วยในการกำจัดสารประเภทลิกนิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่วิธีการนี้ได้ผลผลิตต่ำกว่าการใช้ไอน้ำหรือแอมโมเนีย แต่ไม่เกิดตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์
ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเหมือนวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ

2.4.3 การเตรียมตัวอย่างทางชีวภาพ

จุลินทรีย์สามารถใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส และยังเป็น การเพิ่ม
ประสิทธิภาพในย่อยวัตถุดิบด้วยเอนไซม์ ในการใช้จุลินทรีย์ในการปรับสภาพมักยังย่อยลิกนินรวมทั้ง
ย่อยเฮมิเซลลูโลสด้วย ส่วนเซลลูโลสถูกย่อยน้อยมาก ซึ่งเซลลูโลสมีความต้านทานในการถูกจุลินทรีย์
ย่อยของจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนอื่นๆ ของลิกโนเซลลูโลสมีการใช้จุลินทรีย์ Brown-, White-, และ
soft-rot fungi ในการปรับสภาพวัตถุดิบ White-rot fungi อาทิเช่น *Phanerochaete*
chrysosporium, *Ceriporia lacerata*, *Cyathus stercolerus*, *Ceriporiopsis subvermisporea*,
Pycnoporus cinnabarinus และ *Pleurotus ostreatus* เป็นจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการ
ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Kumar และคณะ, 2011) ข้อดีของการเตรียมตัวอย่างทาง
ชีวภาพ คือ ต้องการพลังงานต่ำกว่าภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมที่ไม่รุนแรง อย่างไรก็ตามอัตราการไฮโดร
ไลซ์โดยกระบวนการเตรียมตัวอย่างทางชีวภาพใช้เวลานานมาก ตารางที่ 2.6 แสดงกระบวนการต่างๆ
ที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างของมวลชีวภาพพวกลิกโนเซลลูโลส

ตารางที่ 2.4 กระบวนการต่างๆที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างของมวลชีวภาพจำพวกลิกโนเซลลูโลส

กระบวนการเตรียมตัวอย่าง	ผลดี	ข้อจำกัดและผลเสีย
การลดขนาดทางกล (mechanical comminution)	ลดความสามารถของการเกิด ผลึกเซลลูโลส	ใช้พลังงานสูงกว่าพลังงาน ของมวลชีวภาพ
Steam explosion	เป็นการไฮโดรไลซ์เฮมิ เซลลูโลสและการเปลี่ยนแปลง ลิกนิน ลดต้นทุน	ทำลายไซแลนบางส่วน ทำลาย ส่วนประกอบของ คาร์โบไฮเดรต ลิกนินไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิด สารประกอบที่ยับยั้งจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 กระบวนการต่างๆที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างของมวลชีวภาพจำพวกลิกโนเซลลูโลส (ต่อ)

กระบวนการเตรียมตัวอย่าง	ผลดี	ข้อจำกัดและผลเสีย
AFEX	เพิ่มการตอบสนองต่อพื้นที่ผิว กำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ไม่ผลิตสารยับยั้งสำหรับ กระบวนการเก็บเกี่ยว	มวลชีวภาพไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีลิกนินอยู่มาก
CO ₂ explosion	เพิ่มการตอบสนองต่อพื้นที่ผิว ลดต้นทุน ไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้ ให้เกิดการสร้างสารยับยั้ง	ไม่มีการตัดแปลงลิกนิน หรือเฮมิเซลลูโลส
ozonolysis	ลดส่วนประกอบของลิกนิน และไม่ผลิตสารพิษตกค้าง	มีความต้องการโอโซนจำนวนมาก ทำให้มีราคาแพง
Acid hydrolysis	ไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสได้ ไซโลสและน้ำตาลชนิดอื่น ๆ มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ลิกนิน	ราคาสูง เครื่องมือถูกกัดกร่อน และสร้างสารพิษ
organosolve	ไฮโดรไลซ์ลิกนินและเฮมิ เซลลูโลส	มีความต้องการระบาย (drain) ตัวทำละลายจากถังปฏิกรณ์ การระเหย การควบแน่นและ การนำกลับมาใช้ซ้ำ ทำให้มี ราคาสูง
Pyrolysis	ผลิตแก๊สและผลิตภัณฑ์ ของเหลว	ใช้อุณหภูมิสูงและผลิตเถ้า
biological	สลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส มีความต้องการพลังงานต่ำ	อัตราการไฮโดรไลซ์ช้ามาก

ที่มา : ดัดแปลงจาก Kumar และคณะ (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การไฮโดรไลซิส คือ การย่อยสลายเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของน้ำตาลคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม จะได้น้ำตาลไซโลส แมนโนส อะราบิโนส และกลูโคส ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Bosch และคณะ, 2010) ซึ่งการไฮโดรไลซิสจะทำให้สายพอลิเมอร์ทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำให้สั้นลง กลายเป็นน้ำตาลอิสระ ซึ่งในการไฮโดรไลซิสมี 2 กระบวนการหลักๆ ได้แก่ การไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ และการไฮโดรไลซิสทางเคมี (ซันนันทและเฉลิม, 2555)

กระบวนการนี้เป็นการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) เซลลูโลสให้เป็นกลูโคส โดยใช้กรดต่าง หรือเอนไซม์เซลลูเลสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าวัตถุดิบผ่านการปรับสภาพแล้วจะได้น้ำตาลมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับการไม่ปรับสภาพจะให้น้ำตาลเพียงร้อยละ 20

2.5.1 การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis)

ในกรณีนี้จะเป็นกระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการย่อยด้วยกรดแบบสองขั้นตอน (two-stage acid process) โดยทำต่อจากการย่อยด้วยกรดในกระบวนการปรับสภาพ ซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถใช้ได้ทั้งกรดอ่อน และกรดแก่ กระบวนการที่ใช้กรดอ่อนเป็นกระบวนการที่เก่าแก่ที่สุดกว่าร้อยละ 90 ในขั้นตอนการปรับสภาพจะใช้กรดกำมะถันเจือจาง (ร้อยละ 0.7) ทำที่อุณหภูมิต่ำ (190 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการเกิดสารไม่พึงประสงค์ หลังจากแยกน้ำตาลเพนโทส (pentose) ออกไปแล้ว ในขั้นสองจะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 215 องศาเซลเซียส แต่ลดความเข้มข้นกรดลง เพื่อผลิตน้ำตาลเฮกโซส (hexose) ทั้งสองขั้นตอนใช้เวลาในแต่ละขั้นเพียง 3 นาที น้ำตาลที่ได้จากทั้งสองขั้นจะนำไปเข้ากระบวนการหมัก ถ้าใช้กรดแก่จะได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า คือได้น้ำตาลมากกว่าร้อยละ 90 และสามารถใช้กับวัตถุดิบที่หลากหลายกว่า ปัญหาสำหรับการใช้กรดแก่นอกจากราคาของอุปกรณ์ที่ใช้จะแพงกว่า แล้วการนำกรดกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณกรดที่ต้องใช้เป็นเรื่องที่สำคัญมากการใช้เยื่อแผ่นสามารถนำร้อยละ 80 ของกรดกลับมาใช้ได้ในขณะที่ไอออนแลกเปลี่ยนประจุสามารถนำกลับมาได้กว่าร้อยละ 97

จากการศึกษาพบว่า การใช้กรดไฮโดรไลซิสลิกโนเซลลูโลส ทำให้เกิดไซโลส, เซลลูโลส และลิกนินที่แตกออก การใช้กรดไฮโดรไลซิสขานอ้อยจะทำให้ไซโลสเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วไปเป็นเฟอร์ฟูรอล และผลิตภัณฑ์อื่นๆ การสลายตัวนี้ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวยับยั้งการเจริญของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุลินทรีย์ เช่น 5-ไฮดรอกซีเมทิล-เฟอร์ฟูรอล (HMF) และซีเทต การใช้กรดเป็นตัวเร่งการไฮโดรไลซิส เป็นปฏิกิริยาที่มีหลายแบบโดยกลไกของการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสคือ การไปตัดพันธะเบต้า 1,4 ไกลโคซิดิก (β -1,4 glycosidic) เกิดเป็นโมโนแซ็กคาไรด์ซึ่งมีทั้งการใช้กรดเจือจางและกรดเข้มข้น

2.5.1.1 การไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเจือจาง (Dilute acid hydrolysis)

ผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดเจือจางจะมีปริมาณน้อย แต่มีการเพิ่ม อุณหภูมิและความดัน สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายให้ได้ปริมาณกลูโคสที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ การเพิ่มความเข้มข้นของกรดสามารถเพิ่มผลผลิตของน้ำตาลให้สูงขึ้นได้ แต่ควรคำนึงถึงจุดที่เหมาะสมที่สุดของความเข้มข้นกรดที่ใช้ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย (อังคณา, 2552)

กระบวนการนี้ทำให้เฮมิเซลลูโลสแตกออกที่อุณหภูมิต่ำกว่าเซลลูโลส ซึ่งการทำงาน จะมี 2 ขั้น ที่แตกต่างกันระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ขั้นแรกใช้อุณหภูมิต่ำเพิ่มผลได้น้ำตาล 5 คาร์บอนจากเฮมิเซลลูโลส ขั้นที่ 2 ใช้อุณหภูมิสูงกว่าเพื่อไฮโดรไลซิสเซลลูโลสภายใต้สภาวะที่ รุนแรง เพื่อให้ได้น้ำตาล 6 คาร์บอน ข้อดีของกระบวนการนี้คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วมาก แต่มี ข้อเสียคือ ผลได้น้ำตาลต่ำ

2.5.1.2 การไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเข้มข้น (Concentrated acid hydrolysis)

โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในธรรมชาติจะถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ที่ อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 70 แต่วิธีการนี้ทำได้ยากในทางการค้า เพราะกรดซัลฟิวริกเข้มข้นมีราคาสูง และจำเป็นต้องมีขั้นตอนของการหมุนเวียนการใช้งาน (อังคณา, 2552) แต่การไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเข้มข้นมีข้อดีคือ มีศักยภาพในการผลิตน้ำตาลได้สูง โดยได้น้ำตาลจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 90 นอกจากนี้กรดที่ใช้สามารถนำกลับมา ใช้ใหม่ได้หลังจากการย่อยสลาย โดยการระเหยซ้ำหลายๆ ครั้ง

กระบวนการนี้ทำให้เซลลูโลสถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคสอย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว เฮมิเซลลูโลส เปลี่ยนเป็นน้ำตาล 5 คาร์บอน และสลายไปเล็กน้อย ตัวแปรสำคัญของวิธีนี้คือ ปริมาณน้ำตาล ที่เปลี่ยนแปลงในรูปสารละลาย และกรดที่นำกลับมาใช้ใหม่ วิธีนี้ใช้อุณหภูมิและความดันไม่สูง เวลา ทำปฏิกิริยานานกว่าการใช้กรดเจือจาง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น ร้อยละ 70 อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส เวลา 2-4 ชั่วโมง การใช้อุณหภูมิและความดันต่ำทำให้น้ำตาลสลายน้อย แล้วนำน้ำตาลหลังจากการไฮโดรไลซิสในขั้นตอนแรกออก เพื่อป้องกันการเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของน้ำตาล ขั้นตอนต่อไปคือการทำให้เซลลูโลสแตกออก โดยนำส่วนที่เหลือจากขั้นตอนแรก ดึงน้ำออก และเติมกรดซัลฟิวริกร้อยละ 30-40 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 50 นาที เพื่อเป็นการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส ข้อดีสำหรับวิธีนี้คือ ได้น้ำตาลสูง แต่มีข้อเสียคือ ยากในการทำงานและการนำกรดกลับมาใช้ใหม่

2.5.2 กระบวนการไฮโดรไลซิสโดยใช้ต่าง (สุขใจ ชูจันทร์, 2554)

การไฮโดรไลซิสด้วยต่าง สามารถไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสและลดระดับลิกนินได้เซลลูโลส ที่เอนไซม์สามารถไฮโดรไลซ์ได้ง่าย กลไกของการไฮโดรไลซิสด้วยต่างคือ การเกิดปฏิกิริยา แชนพอนิฟิเคชัน (saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของไขมัน เชนิเซลลูโลส และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ทำให้ช่องว่างของลิกนินในเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางเพื่อไฮโดรไลซ์ลิกนินเซลลูโลส ทำให้เกิดการบวมน้ำ นำไปสู่การเพิ่มพื้นที่ผิวภายใน ลดระดับการเกิดพอลิเมอร์ ลดความสามารถของการสร้างผลึก มีการแยกโครงสร้างที่เชื่อมกันระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต และทำลายโครงสร้างลิกนิน วิธีนี้ใช้ได้ดีในฟางข้าวและชานอ้อย โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กรด แต่ใช้เวลานานกว่า

2.5.3 การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ (enzyme hydrolysis) (ชัชชนันท์ และเฉลิม, 2555)

การใช้เอนไซม์เซลลูเลสในการย่อยเซลลูโลส มีข้อได้เปรียบกว่าการใช้กรดตรงสภาวะการทำงานที่ไม่รุนแรง ทำให้มีต้นทุนการบำรุงรักษาที่ต่ำมีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้กับกระบวนการปรับสภาพเกือบทุกชนิด ยกเว้นการปรับสภาพทางกายภาพเพียงอย่างเดียว การใช้เอนไซม์นี้น่าจะมีศักยภาพสูงที่สุดในระยะยาว เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำกว่าประสิทธิภาพของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนวัตถุดิบต่อเอนไซม์ ถ้าสัดส่วนสูงไปจะเกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในขณะที่สัดส่วนที่ต่ำไปจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา และประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ โดยการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยในการลดความชื้น (desorption) ของเอนไซม์หลังเกิดปฏิกิริยาการใช้น้ำย่อยรวม (enzyme cocktails) หรือใช้เอนไซม์หลายๆชนิดผสมกัน ไม่ว่าจะเป็ นเซลลูเลสจากหลายๆแหล่ง หรือผสมเอนไซม์ชนิดอื่น เช่น เพคตินเนสลงไปก็สามารถช่วยให้เปลี่ยนเศษไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำไปเป็นน้ำตาลได้เกือบทั้งหมด มีรายงานว่าจากการเติม *T.reesei cellobiohydrolase* ลงไปเอนไซม์เซลลูโลสที่สกัดได้จาก *Thermomonospora fusca* จะทำให้อัตราการแยกสลายด้วยน้ำเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการนี้มีด้วยกัน 3 กลุ่ม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิกเนส เฮมิเซลลูเลส และเซลลูเลส เอนไซม์กลุ่มลิกเนสเป็นเอนไซม์ของราผลิตออกมาย่อยลิกนิน
 ในสภาวะที่มีออกซิเจน ในกลุ่มนี้มีเอนไซม์ 2 ประเภท คือ ฟีนอลออกซิเดส หรือแลคเคส และ
 เปอร้ออกซิเดส เอนไซม์กลุ่มลิกเนสนี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะผ่านเนื้อไม้ที่ไม่มีการปรับสภาพเข้าไป
 ย่อยลิกนินภายในได้ สันนิษฐานกันว่าในช่วงแรกลิกเนสน่าจะย่อยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ซึมผ่าน
 ออกมาเพื่อทำให้ลิกเนสเปลี่ยนแปลงก่อนเฮมิเซลลูโลสเป็นสารโพลีเมอร์ของน้ำตาลที่ละลายได้ใน
 อัลคาไลประกอบด้วยบางส่วนของผนังเซลล์ที่เป็นเซลลูโลส และเบต้า ดี-กลูแคน สารตระกูลเพคติน
 (polygalacturonans) และเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ที่มีแกแลคโตส
 แมนโนส และไซโลส เฮมิเซลลูโลสจะมีจำนวนหน่วยของโมโนเมอร์ในช่วงประมาณ 100-200 หน่วย
 ซึ่งเล็กกว่าเซลลูโลส (10000-14000 หน่วย) เอนไซม์กลุ่มของเฮมิเซลลูเลสจะประกอบด้วยหน่วยที่ยึด
 จับกับคาร์โบไฮเดรตกับหน่วยที่ช่วยคะตะไลส์ปฏิกิริยา โดยที่หน่วยหลังจะเป็นกลุ่มไฮโดรเลสที่ย่อย
 สลายสับสเตรทที่มีพันธะไกลโคไซด์ (glycoside hydrolase) ที่จะทำลายพันธะไกลโคไซด์
 (glycoside) ระหว่างโมเลกุลของน้ำตาล และ คาร์โบไฮเดรตเอสเทอเรส (carbohydrate esterase)
 ที่จะย่อยพันธะเอสเทอร์ที่เป็นกลุ่มข้างเคียง (side group) ของโพลีเมอร์เอนไซม์ของกลุ่มนี้ คือ
 ไซลานเนสที่ย่อยพันธะเบต้า 1-4 ระหว่างน้ำตาลหลัก หรือไซลานเปลี่ยนแปลงเฮมิเซลลูโลสให้กลายเป็น
 ไซโลโอลิโกเมอร์ (xylooligomer) แล้วย่อยต่อจนได้ไซลานโมเลกุลเดี่ยว เอนไซม์กลุ่มเซลลูเลสเป็นก
 ลุ่มผสมของเอนไซม์ชนิดต่างๆในการย่อยพันธะไกลโคไซด์โดยมี endoglucanase, cellobiohydase,
 β -glucosidase การทำงานของกลุ่มนี้เริ่มจาก endoglucanase หรือ carboxymethylcellulose
 (CM)-cellulase จะย่อยตำแหน่งต่างๆ ภายในส่วนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนแบบสุ่มเพื่อเป็นการเปิด
 ช่องทางให้ cellobiohydase เข้าไปทำงานต่อ cellobiohydase หรือ exoglucanase ซึ่งเป็น
 ส่วนประกอบหลัก (ประมาณร้อยละ 40-70 ของโปรตีนทั้งหมดในกลุ่ม) จะค่อยๆ ตัดน้ำตาลโมเลกุล
 เดี่ยว หรือคู่ออกจากปลายสายเซลลูโลส เอนไซม์นี้จะสามารถย่อยโครงสร้างที่เป็นผลึกได้ในขั้นตอน
 สุดท้ายกลูโคสโมเลกุลคู่ หรือ cellooligosaccharides จะถูกตัดออกเป็นกลูโคสด้วยเอนไซม์
 β -glucosidase ต้นทุนของเอนไซม์ที่ใช้อาจสูงถึงครึ่งหนึ่งของต้นทุนในกระบวนการแยกสลายด้วย
 น้ำทั้งหมด แม้ว่าในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ราคาของเอนไซม์จะลดลงอย่างมากมายการค้นหาเชื้อ
 ที่สามารถผลิตเซลลูเลสในปริมาณมากจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่ได้รับการค้นคว้ากันอย่างแพร่หลาย รวมทั้ง
 การค้นหาเอนไซม์ที่สามารถทนทานพีเอช อุณหภูมิ และสารยับยั้งชนิดต่างๆ เพื่อการใช้งานในสภาวะ
 ต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น การปรับปรุงสายพันธุ์ที่มีอยู่ด้วยวิธีการทางพันธุกรรมโดยใช้เทคนิคทางชีวสารสนเทศ
 เข้ามาช่วยก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่ได้รับการสนใจมีการผลิต designer enzymes หรือ

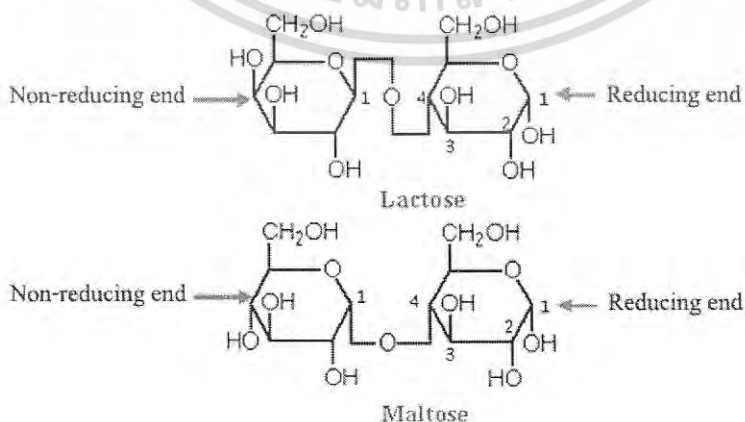
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เรียกว่า glycosynthase โดยการปรับเปลี่ยนกรดอะมิโนบางตัวในสายโปรตีน เช่น การแทนที่ typtophan สองตัวด้วย phenylalanine สามารถเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ peroxidase ได้ การนำเอนไซม์เซลลูเลส กลับมาใช้ใหม่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุน เซลลูเลสสามารถนำกลับมาจากส่วนใสด้านบน (supernatant) หรือตะกอนด้านล่างก็ได้ แต่จากส่วนใสด้านบนจะทำได้ง่ายกว่า มีงานวิจัยที่ทำการนำเอนไซม์ผสมระหว่าง celluclast และ novozym กลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5 ครั้งโดยมีรอบของการ (elapsed time) 48 ชั่วโมงระหว่างรอบของการนำกลับ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของเอนไซม์ก็ลดลงทุกๆรอบของการนำกลับมาใช้

2.6 น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) (ยุทธนา, 2556)

น้ำตาลรีดิวซ์ คือ โมโนแซคคาไรด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนที่ตำแหน่งแอนเอเมอร์ ซึ่งถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากโครงสร้างของโมโนแซคคาไรด์เป็นแบบอัลโดสและคีโตส หรือเป็นโครงสร้างแบบวง จึงมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปสายยาวและรูปวงแหวนอยู่ตลอดเวลา โมโนแซคคาไรด์เหล่านี้จึงสามารถแสดงสมบัติของแอลดีไฮด์และคีโตนได้ ซึ่งเมื่อถูกออกซิไดซ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรด เช่น เมื่อออกซิไดซ์กลูโคสจะได้กรดแอลโดนิค ซึ่งมีชื่อว่ากรดกลูโคนิก ดังนั้นน้ำตาลที่เนื่องจากอโนเมอร์คาร์บอนไม่ได้อยู่ในรูปไกลโคไซด์จึงเรียกว่า น้ำตาลรีดิวซ์ ตัวอย่างเช่น น้ำตาลกลูโคส

น้ำตาลรีดิวซ์ คือน้ำตาลที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือคีโตน (ketone) ที่เป็นอิสระอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาล และถูกออกซิไดส์ได้ง่ายด้วยตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) อย่างอ่อน ตัวอย่างของน้ำตาลกลุ่มนี้ ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ทุกชนิด เช่น น้ำตาลกลูโคส (glucose) น้ำตาลกาแล็กโทส (galactose) น้ำตาลฟรุคโทส (fructose) และน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) บางชนิด เช่น น้ำตาลแล็กโทส (lactose) น้ำตาลมอลโทส (maltose)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของน้ำตาลรีดิวซ์

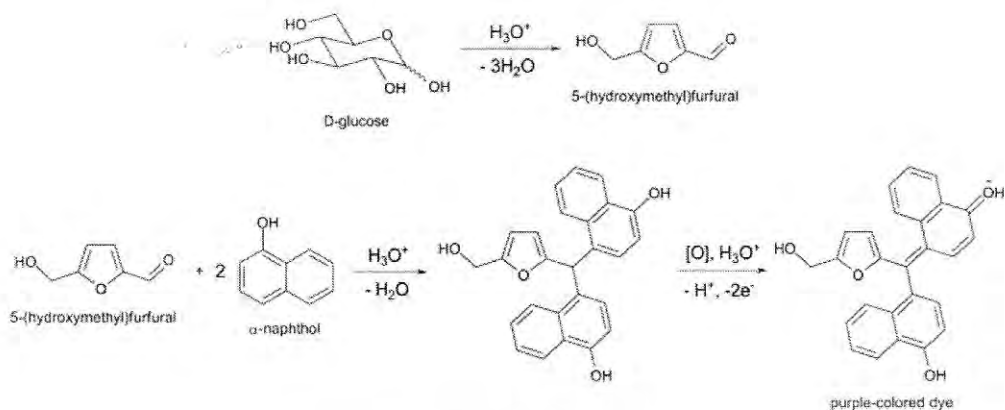
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ที่มา : นิตานาม (มปป.)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การนำมาผลิตเอทานอล

เซลลูโลส เป็นแหล่งวัตถุดิบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ในการนำมาผลิตเอทานอลเป็นอย่างมาก โดยเอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลสเป็นเอทานอลที่ผลิตจากวัตถุดิบหลักประเภท ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด และเปลือกไม้ รวมทั้งวัชพืช เช่น ผักตบชวา หญ้า และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น เนื่องจากในวัตถุดิบดังกล่าวจะประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic material) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์พืชที่เกิดขึ้นจากหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวหรือที่เรียกว่า โพลีเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส ทำให้เอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลสมีสมบัติและลักษณะทางเคมีเช่นเดียวกับเอทานอล ที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาลและแป้ง ดังนั้นถ้าสามารถนำเซลลูโลสดังกล่าวมาทำการแปรรูปเป็นเอทานอล ซึ่งทำให้ช่วยเพิ่มมูลค่าของเสียช่วยลดปัญหามลพิษจากการเผาทิ้งวัสดุดังกล่าว และยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) ด้วยการนำเซลลูโลสมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตเอทานอลต้องประกอบขึ้นด้วยขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้ คือการปรับสภาพเซลลูโลส (pretreatment) เพื่อกำจัดองค์ประกอบอื่น ได้แก่ ลิกนิน (lignin) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างที่เหมาะสม และเพิ่มการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์การย่อยสลายเซลลูโลส (hydrolysis) เพื่อให้ได้น้ำตาลรีดิวิซ การหมัก (fermentation) เป็นการนำน้ำตาลรีดิวิซมาใช้ในการผลิตเอทานอล

2.7 ปฏิกิริยาฟีนอล-กรดซัลฟิวริก (Phenol-sulfuric acid reaction)

การหาปริมาณน้ำตาลทั้งที่มีอยู่เดิมและที่ได้จากการย่อยสลายประกอบคาร์โบไฮเดรตสามารถทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกแล้วเกิดเป็นสารประกอบเฟอฟูรอลได้ หลักการของวิธีการนี้ คือกรดซัลฟิวริกเข้มข้นสลายพันธะไกลโคซิดิกในสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ให้แตกออกเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นสารประกอบเฟอฟูรอลและอนุพันธ์ต่างๆ ของสารประกอบเฟอฟูรอล (มนตรี, 2530) สารประกอบที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะสามารถรวมกันกับสารฟีนอลเกิดเป็นอนุพันธ์ของเอสเทอร์ (Fryhle, 2003) ได้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาลสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 480-490 นาโนเมตร จากข้อมูลข้างต้นคาดว่าปฏิกิริยาของวิธีการนี้น่าจะได้ดังรูปที่ 2.16

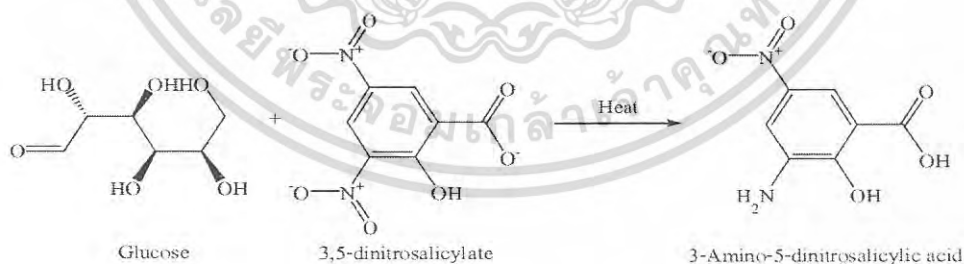


รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาของวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก

ที่มา : ดัดแปลงจาก มนตรี (2530) และ Fryhe (2003)

2.8 ปฏิกิริยาของกรด -3, 5-ไดไนโตรซาลิไซลิก

วิธีกรด-3,5-ไดไนโตรซาลิไซลิก (3,5-dinitrosalicylic acid, DNS) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ในตัวอย่างสารที่สกัดมาได้ โดยสารละลาย DNS ซึ่งมีหมู่ไนโตร 2 หมู่ มีลักษณะสีเหลืองเมื่อหมู่ไนโตร 1 หมู่ถูกรีดิวซ์โดยหมู่แอลดีไฮด์ของน้ำตาลโดยมีความร้อน และสารละลายต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้สารละลาย 3,5-dinitrosalicylate กลายเป็น 3-amino-5-nitrosalicylic acid ที่มีสีส้ม-แดง (มนตรี, 2530) ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 520-540 นาโนเมตร



รูปที่ 2.17 ปฏิกิริยาของวิธี DNS (Plummer, 1967)

ที่มา : นิรนาม (มปป.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสาวนาภรณ์ โชคสกุลพร, (2557) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการย่อยลิกโนเซลลูโลสในอ้อยเลา โดยการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยเทคนิคทางสเปกโตรสโคปี เริ่มจากการนำอ้อยเลามาปรับสภาพพืชเพื่อกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นเวลา 20 นาที พบว่ามีน้ำหนักพืชแห้งหลังการปรับสภาพเหลืออยู่ร้อยละ 57.70 ± 5.21 ของน้ำหนักพืชแห้งเริ่มต้น และพบว่ามีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสเกิดร่วมในกระบวนการนี้ด้วย โดยตรวจพบน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลายเบสปริมาณ 55.40 ± 1.12 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำพืชที่ผ่านการปรับสภาพมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกในสภาวะแตกต่างกัน ได้แก่ ความเข้มข้นกรด ระยะเวลาการไฮโดรไลซิส สัดส่วนน้ำหนักพืชต่อปริมาณกรด และอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางหรือการทำปฏิกิริยาโดยการเพิ่มปริมาณกรด หรืออุณหภูมิให้สูงขึ้นจะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้นสำหรับระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าไม่มีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากการทดลองนี้ คือการย่อยเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรในสัดส่วนพืชต่อปริมาณกรด 1:20 กรัมต่อมิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 27.57 ± 0.11 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักพืชแห้ง

จักรพงศ์ สังข์โชติ และคณะ (2555) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยลำต้นธูปฤาษีด้วยกรดเพื่อการผลิตเอทานอล โดยใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* var. *montache* ด้วยกระบวนการหมักแบบบะที่สภาวะนิ่ง จากการศึกษาการปรับสภาพลำต้นธูปฤาษีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที เพื่อกำจัดลิกนิน พบว่า Kappa number มีค่าเท่ากับ 3.55 และมีปริมาณลิกนินลดลงเหลือ 0.67 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างลำต้นธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยตัวอย่างลำต้นธูปฤาษีด้วยกรด โดยแปรผันความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกตั้งแต่ 1 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรใช้อัตราส่วนผงลำต้นธูปฤาษีต่อกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 1 ต่อ 20 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แปรผันระยะเวลาในการย่อยที่ 0 ถึง 10 ชั่วโมง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยลำต้นธูปฤาษีที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดคือ การย่อยด้วยกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 3.62 กรัมต่อลิตร และเมื่อนำสารละลายที่ได้จากการย่อยลำต้นธูปฤาษีมาผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการหมักแบบกะที่สถานะนิ่ง โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองสถานะคือ การหมักโดยใช้สารละลายที่ได้จากการย่อยลำต้นธูปฤาษีเพียงอย่างเดียว ใช้เวลาในการหมัก 36 ชั่วโมง และการหมักโดยใช้สารละลายที่ได้จากการย่อยลำต้นธูปฤาษีที่มีการปรับปริมาณน้ำตาล เป็น 20 องศาบริกซ์ ใช้เวลาในการหมัก 90 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่าสถานะที่มีการปรับปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นผลิตเอทานอลได้เท่ากับ 30.4 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้ และอัตราการผลิต เท่ากับ 0.39 และ 0.33 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ส่วนสถานะที่ไม่ได้มีการปรับปริมาณน้ำตาลผลิตเอทานอลได้ เท่ากับ 2.45 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้และอัตราการผลิตเท่ากับ 0.63 และ 0.07 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

Prachand Shrestha และคณะ (2010) ผลของการปรับสภาพเส้นใยข้าวโพดด้วยต่างอ่อนและไอน้ำ โดยใช้เชื้อราในกระบวนการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล และกระบวนการหมัก ซึ่งกระบวนการหมัก และการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลกระทำพร้อมกัน เรียกว่า การหมักแบบต่อเนื่อง (SSF) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเอทานอล ทำการปรับสภาพเส้นใยข้าวโพดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปรับสภาพเส้นใยข้าวโพดต่อด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 2.6 2.9 และ 5.5 กรัมต่อเส้นใยข้าวโพด 100 กรัม ตามลำดับ สำหรับเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* *Gloeophyllum trabeum* และ *Trichoderma reesei* นำมาใช้ในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง ผลการปรับสภาพเส้นใยข้าวโพดด้วยต่างอ่อน มีค่าผลได้ของน้ำตาลกลูโคสสูง อย่างไรก็ตาม ค่าผลได้ของเอทานอลเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ และที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยต่างอ่อน การหมักเส้นใยข้าวโพดด้วยเชื้อราในอาหารแข็งสามารถเพิ่มทั้งการจำกัดด้วยยับยั้งและลดปริมาณการใช้เอนไซม์ทางการค้าในระหว่างกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

Yang และ Wyman (2008) การปรับสภาพชีวมวลเพื่อใช้สำหรับผลิตเอทานอล จำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมากเพื่อกำจัดด้วยยับยั้ง และกระบวนการทำให้เป็นกลาง เพื่อที่จะลดการใช้น้ำในการแยกซึ่งข้าวโพดที่ถูกย่อยออกจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมล และกรดซัลฟิวริก 0.05 โมล ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ถูกนำมาผสมกันโดยที่ค่าพีเอชหลังการผสมจะเท่ากับ 7 ซึ่งวิธีการนี้จะลดการใช้ น้ำ 10 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำให้เป็นกลางโดยใช้น้ำกลั่น และน้ำที่ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการล้าง การใช้สารผสมปรับสภาพชีวมวล (อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที) สามารถเพิ่มการปลดปล่อยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ระหว่างการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูโลสที่ถูกผลิตจากเชื้อรา *Phanerochete chrysosporium* NCIM 1106 มีค่าเท่ากับ 38.49 FPU(IU) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่า และ 15 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยสารละลายผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริก การย่อยด้วยเอนไซม์ (เอนไซม์ที่สกัดจากจุลินทรีย์) ปลดปล่อยน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 395.15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ระหว่างชั่วโมงที่ 48 ซึ่งน้อยกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ (เอนไซม์ที่ได้จากจุลินทรีย์โดยตรง) ปลดปล่อยน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 424.50 มิลลิกรัม ภายหลังจากชั่วโมงที่ 120

ประมุข ภาวะกลูโคสสถิตย์, (2554) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการฟัรทีริตเมนต์ชีวมวล 4 ชนิด คือ ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา ลำต้นปาล์ม และหางใบปาล์ม โดยกระบวนการระเบิดไอน้ำเพื่อลดสัดส่วนของเพนโตแซน และการสกัดต่างเพื่อลดสัดส่วนของลิกนิน ส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และลดการกีดขวางการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีเกิดเปลี่ยนแปลง ช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลให้ดียิ่งขึ้น การฟัรทีริตเมนต์โดยการสกัดต่างที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิที่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 60 และ 90 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดต่างของไม้ยูคาลิปตัส และกระถินเทพา คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 90 นาที โดยสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และลิกนินต่ำสุด คือ 76.84 16.79 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง และ 61.54 29.86 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดต่างของลำต้นปาล์มและหางใบปาล์ม คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที โดยสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และลิกนินต่ำสุด คือ 87.14 6.13 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง และ 82.92 19.26 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ผ่องศรี ศิวราศักดิ์, (2549) การศึกษานี้ใช้วิธีการชิมเพล็กซ์สำหรับหาสภาวะที่เหมาะสมของการย่อยสลายฟางข้าวด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อกำหนดตัวแปรคงที่ คือ อัตราส่วนของฟางข้าวต่อกรดซัลฟิวริก (98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ให้มีค่าเท่ากับ 1 ต่อ 30 (กรัมต่อมิลลิลิตร) และตัวแปรแปรผันที่ใช้ คือ เวลา อุณหภูมิ และน้ำหนักกรดซัลฟิวริก พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ต้องการกรดซัลฟิวริกหนัก ประมาณ 63 มิลลิกรัม และใช้เวลาย่อยสลายด้วยกรดนาน 38 นาทีที่อุณหภูมิ 147 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดสูงสุดประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดนน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้วิธีการซึมพลั๊กซ์หาน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกและเวลาย่อยสลายที่ อุณหภูมิที่เท่ากับ 147 องศาเซลเซียสต่อไปอีก พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ต้องการกรดซัลฟิวริก และเวลาย่อยสลายเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าด้วยเช่นกันซึ่งมี ค่าประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

นันทิกา คล้ายชม และคณะ (2552) ศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากซางข้าวฟ่างหวานโดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) อุณหภูมิที่ 30 60 และ 90 องศาเซลเซียส และเวลา 1-3 ชั่วโมง และหาองค์ประกอบของซางข้าวฟ่างหวาน ผลการทดลองพบว่า องค์ประกอบหลักของซางข้าวฟ่างหวานคือ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้น 13.44 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลส 32.5 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 15.5 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 5 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิส คือ ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 4 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 19.67 เปอร์เซ็นต์

สมคิดและคณะ (2552) วิสดุลิกโนเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว เปลือกข้าวโพด ชังข้าวโพด และ ใบหญ้าแฝก นำมาทำการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และทำการไฮโดรไลซ์กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.0 5.0 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 100 111 121 องศาเซลเซียส และเวลา 15 และ 30 นาที ทำกลางเงื่อนไขการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ที่มีความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด คือที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อุณหภูมิ 111 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สำหรับวิสดุลิกโนเซลลูโลสทั้งหมดในการศึกษานี้ใบหญ้าแฝกถูกคัดเลือกมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพและการไฮโดรไลซ์เพื่อเป็นการตรวจสอบ จากการศึกษา พบว่าสภาวะที่มีความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น คือ การปรับสภาพที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ และการไฮโดรไลซ์ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 111 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์

- 3.1.1 กระบอกตวง บริษัท Vita Lab, Germany
- 3.1.2 กรวยแก้ว บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.3 ขวดปริมาตร (Volumn metric flask) บริษัท Schott, West Germany
- 3.1.4 ขวดรูปชมพู่ บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.5 คิวเวต บริษัท Starna, Australia
- 3.1.6 ซ้อนตักสาร
- 3.1.7 ชุดกรองสุญญากาศ บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.8 จุกยาง
- 3.1.9 ถ้วยครุชชีเบลล์ รูปขนาน 40-90 ไมครอน บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.10 ตะแกรงวางหลอดทดลอง (rack)
- 3.1.11 ตะแกรงร่อน บริษัท Laboratory test sieve, UK
- 3.1.12 แท่งแก้ว
- 3.1.13 บีกเกอร์ บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.14 ปีเปต บริษัท Precicolor, Germany
- 3.1.15 ลูกยาง
- 3.1.16 หลอดทดลอง บริษัท Pyrex, Germany
- 3.1.17 กระดาษวัดค่าพีเอช บริษัท Dermstadt, Germany

3.2 เครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) บริษัท Barnstead-Thermolyne, USA
- 3.2.2 เครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง รุ่น Adventurer บริษัท OHAUS, USA
- 3.2.3 เครื่องผสมสารละลาย (Vortex) บริษัท VELP scientifica, Italy
- 3.2.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) รุ่น UV-2800A บริษัท Unico, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.5 ตู้ดูดควัน (Hood)
- 3.2.6 ตู้อบลมร้อน 105 องศาเซลเซียส รุ่น ED 53 บริษัท Contherm Scientifica, Germany
- 3.2.7 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส บริษัท Contherm Scientifica, New Zealand
- 3.2.8 เตาแก๊ส รุ่น Dual burners IG623 บริษัท Imarflex, Thailand
- 3.2.9 โถดูดความชื้น (Desicator) บริษัท Brand, Western – Germany
- 3.2.10 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) บริษัท Hirayama, Japan
- 3.2.11 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) บริษัท Becthai, Thailand
- 3.2.12 เครื่องบดละเอียด บริษัท Retsch, Germany
- 3.2.13 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น UB-10 บริษัท Denver Instrument, USA

3.3 สารเคมี

- 3.3.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 95-98 เปอร์เซ็นต์ (H_2SO_4) บริษัท JT-Baker, China
- 3.3.2 ฟีนอล (C_6H_5OH) บริษัท PS Panreac, E.U.
- 3.3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท Unive, Australia
- 3.3.4 กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) บริษัท Unive, Australia
- 3.3.5 ดีเอ็นเอส (3,5-Dinitrosalicylic acid; ($C_7H_4N_2O_7$)) บริษัท Sigma, USA
- 3.3.6 โซเดียมเพแทสเซียมตาร์ทเรท ($KNaC_4H_4O_6$) บริษัท Unive, Australia

3.4 วัตถุดิบ

ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) จากโรงงานจากโรงงานแปรรูปไม้ สินธาราค้าไม้ ตำบล คลองด่าน อำเภอ บางบ่อ จังหวัด สมุทรปราการ

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ

- วัตถุดิบผ่านการตากแห้ง
- ทำการไล่ความชื้นออกจนความชื้นคงที่ โดยการนำไปอบที่ตู้อบอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการบดโดยเครื่องบดละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาด 3 ขนาด ดังนี้
น้อยกว่า 500 ไมโครเมตร ระหว่าง 500-850 ไมโครเมตร และมากกว่า 850 ไมโครเมตร
จากนั้นเก็บในภาชนะปิดที่อุณหภูมิห้อง

3.5 กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

3.5.1 การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการชั่งตัวอย่างที่บดมาแล้ว 1 กรัม
เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 น้ำหนักโดยปริมาตร โดยใช้
ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (w/v) ในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร

3.5.2 จากนั้นนำส่วนหนึ่งไปให้ความร้อนโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่
อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5.3 หลังจากตัวอย่างผ่านการปรับสภาพมาแล้วทำการกรองด้วยชุดกรองสุญญากาศโดยใช้
กระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นทำการปรับพีเอชสารละลายส่วนใสให้มีพีเอชเท่ากับ 7
(ดัดแปลงมาจาก Kumar และคณะ, 2013)

3.5.4 ทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคส และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ดัดแปลงมาจาก
Wuc และคณะ, 2011)

3.5.5 ส่วนตะกอนทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ได้มีพีเอชเท่ากับ 7 (ดัดแปลงมาจาก
Moradi และคณะ, 2013) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนกว่า
จะแห้งสนิท (ดัดแปลงมาจาก Wang และคณะ, 2010) จากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์
หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและน้ำตาลรีดิวซ์ต่อไป

3.6 กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อหาขนาดของตัวอย่างที่ดีที่สุด

3.6.1 นำตัวอย่างซีเลื้อยไม้ยางพาราที่ผ่านการปรับสภาพ มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อ
เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลที่ได้จากตัวอย่างขนาดต่างๆ โดยทำการชั่งตัวอย่างที่บดมาแล้ว
1 กรัมในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร

3.6.2 เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เวลา 90 นาที อัตราส่วน
ตัวอย่างต่อกรด 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อจนครบเวลาที่กำหนดแล้วทำการแยกส่วนของเหลวและกากออกจากกัน ด้วยการกรองด้วยผ้าขาวบาง

3.6.4 นำส่วนที่เป็นสารละลายของเหลวส่วนใสไปปรับค่าพีเอชมีสถานะเป็นกลาง ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้มีพีเอชเท่ากับ 7 (ดัดแปลงมาจาก Kumar และคณะ, 2013)

3.6.5 นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956) เพื่อหาขนาดของตัวอย่างที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด

3.7 กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

3.6.1 หลังจากที่เราทราบความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนเป็นน้ำตาลได้ดีที่สุดจากขั้นตอนการปรับสภาพแล้วจะนำกากที่ได้เข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซ์โดยใช้ปริมาณกาก: กรดซัลฟิวริกที่อัตราส่วน 1:10 1:20 และ 1:30 ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.1 0.2 และ 0.4 โมลาร์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 90 และ 120 นาที โดยที่อัตราส่วน 1:10 1:20 และ 1:30 ทำในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

3.6.2 จากนั้นนำมาวิเคราะห์ หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956) จึงจะสรุปได้ว่าที่สภาวะใดให้ผลผลิตปริมาณน้ำตาลได้สูงสุด

ตารางที่ 3.1 แสดงการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส โดยวางแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟกทอเรียล

ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกที่ใช้	เวลา (นาที)	อัตราส่วน	ตัวอย่าง : กรด (กรัม/มิลลิลิตร)		
			1 : 10 (C ₁)	1 : 20 (C ₂)	1 : 30 (C ₃)
0.1 โมลาร์ (A ₁)	60 (B ₁)		a ₁ b ₁ c ₁	a ₁ b ₁ c ₂	a ₁ b ₁ c ₃
	90 (B ₂)		a ₁ b ₂ c ₁	a ₁ b ₂ c ₂	a ₁ b ₂ c ₃
	120 (B ₃)		a ₁ b ₃ c ₁	a ₁ b ₃ c ₂	a ₁ b ₃ c ₃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส โดยวางแผนการทดลองแบบ $3 \times 3 \times 3$ แฟกทอเรียล (ต่อ)

ความเข้มข้นกรด ซัลฟิวริกที่ใช้	เวลา (นาที)	อัตราส่วน ตัวอย่าง : กรด (กรัม/มิลลิลิตร)		
		1 : 10 (C_1)	1 : 20 (C_2)	1 : 30 (C_3)
0.2 โมลาร์ (A_2)	60 (B_1)	$a_2b_1c_1$	$a_2b_1c_2$	$a_2b_1c_3$
	90 (B_2)	$a_2b_2c_1$	$a_2b_2c_2$	$a_2b_2c_3$
	120 (B_3)	$a_2b_3c_1$	$a_2b_3c_2$	$a_2b_3c_3$
0.4 โมลาร์ (A_3)	60 (B_1)	$a_3b_1c_1$	$a_3b_1c_2$	$a_3b_1c_3$
	90 (B_2)	$a_3b_2c_1$	$a_3b_2c_2$	$a_3b_2c_3$
	120 (B_3)	$a_3b_3c_1$	$a_3b_3c_2$	$a_3b_3c_3$

3.8 วิธีวิเคราะห์ผล

3.8.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

หลังจากผ่านกระบวนการปรับสภาพ และกระบวนการไฮโดรไลซิสจะทำการกรองด้วย กรวยบุชเนอร์ โดยจะแยกส่วนที่เป็นของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวออกจากกัน โดยของเหลวจะ นำมาปรับพีเอชให้มีสภาพเป็นกลาง แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) และวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก

3.8.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธีฟินอล - ซัลฟิวริก (Dubois, 1956)

- นำตัวอย่างในส่วนที่เป็นของเหลวมาใส่ในหลอดทดลองปริมาณ 1 มิลลิลิตร ส่วนใน หลอดทดลองที่เป็นตัวควบคุมจะใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์แทนตัวอย่าง จากนั้นเติม ฟินอลปริมาณ 1 มิลลิลิตร

- เติมกรดซัลฟิวริกปริมาณ 5 มิลลิลิตร จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาทีนำมาผสม ให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer แล้วตั้งทิ้งไว้อีก 10-20 นาทีจึงนำไปวัดค่าการ ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร โดยเทียบความเข้มข้นกับกราฟน้ำตาล มาตรฐาน (standard curve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS) (Miller, 1959)

- นำตัวอย่างปริมาณ 1 มิลลิลิตร มาใส่ในหลอดทดลอง หลอดทดลองที่เป็นตัวควบคุม จะใช้น้ำกลั่นเป็นแบล็คแทนตัวอย่าง
- จากนั้นเติมสารละลายไดไนโตรซาลิไซลิกปริมาณ 3 มิลลิลิตร หลอดควบคุมจะใช้น้ำกลั่นเป็นแบล็คแทนตัวอย่าง นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer แล้วจึงนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที
- ทำให้เย็นโดยใช้น้ำก๊อก
- เติมน้ำกลั่นปริมาณ 6 มิลลิลิตร นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยเทียบความเข้มข้นกับกราฟน้ำตาลมาตรฐาน (standard curve)

3.8.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ CRD (complete randomized design) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ศึกษาโดย Duncan's New Multiple Test ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป SPSS version 17

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษากระบวนการปรับสภาพซีล้อยไม้ยางพาราด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการศึกษากระบวนการปรับสภาพซีล้อยไม้ยางพารา เพื่อหาขนาดวัตถุดิบที่เหมาะสมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซ์ นำวัตถุดิบร่อนผ่านตะแกรง 3 ขนาด คือ ขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร ขนาดระหว่าง 500-850 ไมโครเมตร และขนาดมากกว่า 850 ไมโครเมตร โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 ทำการทดลองในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตรใช้อัตราส่วนของตัวอย่างต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปกรองเพื่อแยกส่วนของสารละลายและกากออกจากกัน จากนั้นนำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (Phenol-sulfuric method (Dubois M.,1956)) และวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีดีเอ็นเอส (Dinitrosalicylic acid method (DNS) (Miller, 1959)) ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากกระบวนการปรับสภาพซีล้อยไม้ยางพารา

ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
< 500	20.46	5.32
ระหว่าง 500-850	14.92	4.23
> 850	13.71	3.61

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ซีล้อยไม้ยางพาราที่ขนาดน้อยกว่า 500, 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 20.46 14.92 และ 13.71 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับและมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 5.32 4.23 และ 3.61 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ โดยซีล้อยไม้ยางพารา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตรให้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุดและเป็นขนาดที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรไลซ์

4.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้ยางพารา

ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้ยางพาราแต่ละขนาดด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วน 1:10 จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ เป็นเวลา 90 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปกรองเพื่อแยกส่วนของสารละลายและกากออกจากกัน จากนั้นนำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยยางพาราแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาดตัวอย่าง (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
< 500	22.86	6.70
ระหว่าง 500-850	17.88	4.98
> 850	15.27	4.45

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ซีเลื้อยไม้ยางพาราที่ขนาดน้อยกว่า 500, 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 22.86, 17.88 และ 15.27 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับและมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 6.70, 4.98 และ 4.45 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยซีเลื้อยไม้ยางพาราขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตรให้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด

4.3 ผลการศึกษาการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้ยางพาราด้วยกรดซัลฟิวริก โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟคทอเรียล

จากการศึกษากระบวนการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้ยางพารา เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคส โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟคทอเรียล ปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (0.1 0.2 และ 0.4 โมลาร์) อัตราส่วนซีเลื้อยไม้ยางพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก (อัตราส่วน 1:10 1:20 และ 1:30 กรัมต่อลิตร) และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ (60 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 120 นาที) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ซึ่งซีลี้อยไม้ยางพาราที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพนั้น มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงผลดังตารางที่ 4.3 และ 4.5 ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากซีลี้อยไม้ยางพารามาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS VERSION 17 เพื่อศึกษาว่าแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลที่เกิดขึ้นหรือไม่ ซึ่งแสดงผลด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางในภาคผนวก (ตารางที่ ข.1) และ (ตารางที่ ข.2) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของการไฮโดรไลซ์ซีลี้อยไม้ยางพารา โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟกทอเรียล

ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วนตัวอย่าง:กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1:10 (C ₁)	1:20 (C ₂)	1:30 (C ₃)
0.1 (A ₁)	60 (B ₁)	9.79±0.10 ^{no}	8.77±0.13 ^{op}	8.48±0.36 ^{op}
	90 (B ₂)	14.40±0.35 ^{ij}	11.37±0.82 ^{lm}	10.56±0.56 ^{mn}
	120 (B ₃)	18.27±0.62 ^{gh}	10.59±0.41 ^{lmn}	10.56±0.56 ^{mn}
0.2 (A ₂)	60 (B ₁)	22.51±0.21 ^f	11.00±0.80 ^{lm}	8.51±0.08 ^{op}
	90 (B ₂)	25.16±0.19 ^e	14.01±1.27 ^{ij}	10.60±0.19 ^{mn}
	120 (B ₃)	35.78±2.46 ^b	13.19±0.67 ^j	9.87±0.52 ^{no}
0.4 (A ₄)	60 (B ₁)	27.66±1.94 ^d	12.55±0.19 ^k	7.71±0.19 ^{pq}
	90 (B ₂)	28.50±0.23 ^c	16.77±0.18 ^{hi}	10.13±0.13 ^{mn}
	120 (B ₃)	37.16±2.25 ^a	18.81±0.23 ^{gh}	16.02±1.50 ^{hi}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากการไฮโดรไลซ์ขี้เลี้ยงไม้ยางพารา ที่สภาวะต่างๆ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟกทอเรียล

การทดลองที่	เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ (นาทีก)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง:กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	60	0.1	1:10	9.79 ± 0.10 ^{no}
2	60	0.1	1:20	8.77 ± 0.13 ^{op}
3	60	0.1	1:30	8.48 ± 0.36 ^{op}
4	60	0.2	1:10	22.51 ± 0.21 ^f
5	60	0.2	1:20	11.00 ± 0.80 ^{lm}
6	60	0.2	1:30	8.51 ± 0.08 ^{op}
7	60	0.4	1:10	27.66 ± 1.94 ^d
8	60	0.4	1:20	12.55 ± 0.19 ^k
9	60	0.4	1:30	7.71 ± 0.19 ^{pq}
10	90	0.1	1:10	14.40 ± 0.35 ^{ij}
11	90	0.1	1:20	11.37 ± 0.82 ^{lm}
12	90	0.1	1:30	10.56 ± 0.56 ^{mn}
13	90	0.2	1:10	25.16 ± 0.19 ^e
14	90	0.2	1:20	14.01 ± 1.27 ^{ij}
15	90	0.2	1:30	10.60 ± 0.19 ^{mn}
16	90	0.4	1:10	28.50 ± 0.23 ^c
17	90	0.4	1:20	16.77 ± 0.18 ^{hi}
18	90	0.4	1:30	10.13 ± 0.13 ^{mn}
19	120	0.1	1:10	18.27 ± 0.62 ^{gh}
20	120	0.1	1:20	10.59 ± 0.41 ^{mn}
21	120	0.1	1:30	10.56 ± 0.56 ^{mn}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้อย่างพาราที่สภาวะต่างๆ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟกทอเรียล (ต่อ)

การทดลองที่	เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ (นาที)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง:กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
22	120	0.2	1:10	35.78± 2.46 ^b
23	120	0.2	1:20	13.19± 0.67 ^j
24	120	0.2	1:30	9.87± 0.52 ^{no}
25	120	0.4	1:10	37.16± 2.25 ^a
26	120	0.4	1:20	18.81 ± 0.23 ^{sh}
27	120	0.4	1:30	16.02± 1.51 ^{hi}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้อย่างพารา เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด (ตารางในภาคผนวก ตารางที่ ค.1-ค.4) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์และอัตราส่วนซีเลื้อยไม้อย่างพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับอัตราส่วนซีเลื้อยไม้อย่างพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์กับอัตราส่วนซีเลื้อยไม้อย่างพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์และอัตราส่วนซีเลื้อยไม้อย่างพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการทดลองทั้งหมดคิดเป็น 27 ปัจจัย จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงผลดังตารางที่ 4.4 (ซึ่งกำหนดให้ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก หมายถึง ความแตกต่างหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ยางพารา คือ ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.4 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนขี้เลื่อยยางพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก (กรัมต่อมิลลิลิตร) 1:10 สามารถผลิตน้ำตาลทั้งหมดได้ 37.16 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ของการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟกทอเรียล

ความเข้มข้น กรดซัลฟิวริก (โมลาร์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)		
		อัตราส่วนตัวอย่าง:กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1:10 (C ₁)	1:20 (C ₂)	1:30 (C ₃)
0.1 (A ₁)	60 (B ₁)	5.78±0.29 ^{kl}	5.30±0.58 ^{kl}	3.17±0.05 ^{mn}
	90 (B ₂)	8.56±1.15 ^{hi}	5.54±0.37 ^{kl}	3.54±0.05 ^{mn}
	120 (B ₃)	11.02±0.41 ^e	6.47±0.89 ^{jk}	4.46±0.48 ^{lm}
0.2 (A ₂)	60 (B ₁)	10.01±0.30 ^f	6.07±0.28 ^{jk}	4.46±0.31 ^{lm}
	90 (B ₂)	7.38±0.60 ^{ij}	6.80±0.27 ^{jk}	5.17±0.30 ^{kl}
	120 (B ₃)	18.08±1.08 ^b	7.74±0.62 ^{ij}	5.79±0.36 ^{kl}
0.4 (A ₄)	60 (B ₁)	15.06±0.73 ^{cd}	8.04±0.44 ^{hi}	4.87±0.35 ^{lm}
	90 (B ₂)	15.11±0.32 ^{cd}	8.17±0.35 ^{hi}	5.35±0.44 ^{kl}
	120 (B ₃)	19.48±1.29 ^a	9.78±0.70 ^s	6.60±0.14 ^{jk}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากการไฮโดรไลซ์ขี้เสี้ยนไม้ยางพารา ที่สภาวะต่างๆ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟกทอเรียล

การทดลอง ที่	เวลาที่ใช้ในการ ไฮโดรไลซ์ (นาที)	ความเข้มข้นของ กรดซัลฟิวริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง:กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	60	0.1	1:10	5.78±0.29 ^{kl}
2	60	0.1	1:20	5.30±0.58 ^{kl}
3	60	0.1	1:30	3.17±0.05 ^{mn}
4	60	0.2	1:10	8.56±1.15 ^{hi}
5	60	0.2	1:20	5.54±0.37 ^{kl}
6	60	0.2	1:30	3.54±0.05 ^{mn}
7	60	0.4	1:10	11.02±0.41 ^e
8	60	0.4	1:20	6.47±0.90 ^{jk}
9	60	0.4	1:30	4.46±0.48 ^{lm}
10	90	0.1	1:10	10.01±0.30 ^f
11	90	0.1	1:20	6.07±0.28 ^{jk}
12	90	0.1	1:30	4.46±0.31 ^{lm}
13	90	0.2	1:10	7.38±0.60 ^{ji}
14	90	0.2	1:20	6.80±0.27 ^{jk}
15	90	0.2	1:30	5.17±0.30 ^{kl}
16	90	0.4	1:10	18.08±1.087 ^b
17	90	0.4	1:20	7.74±0.62 ^{ji}
18	90	0.4	1:30	5.79±0.36 ^{kl}
19	120	0.1	1:10	15.06±0.73 ^{cd}
20	120	0.1	1:20	8.04±0.44 ^{hi}
21	120	0.1	1:30	4.87±0.35 ^{lm}
22	120	0.2	1:10	15.11±0.32 ^{cd}
23	120	0.2	1:20	8.17±0.35 ^{hi}
24	120	0.2	1:30	5.35±0.44 ^{kl}
25	120	0.4	1:10	19.48±1.29 ^a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) จากการไฮโดรไลซ์ซี่เลื่อยไม้ยางพารา ที่สภาวะต่างๆ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3×3×3 แฟกทอเรียล (ต่อ)

การทดลองที่	เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ (นาท)	ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (โมลาร์)	อัตราส่วน ตัวอย่าง:กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
26	120	0.4	1:20	9.78±0.70 ^g
27	120	0.4	1:30	6.60±0.14 ^{jk}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์ซี่เลื่อยไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (ตารางในภาคผนวก ตารางที่ ค.5-ค.8) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนซี่เลื่อยไม้ยางพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับอัตราส่วนซี่เลื่อยไม้ยางพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์กับอัตราส่วนซี่เลื่อยไม้ยางพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนซี่เลื่อยไม้ยางพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่าปัจจัยแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการทดลองทั้งหมดคิดเป็น 27 ปัจจัย จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงผลดังตารางที่ 4.5 (ซึ่งกำหนดให้ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก หมายถึง ความแตกต่างหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์ซี่เลื่อยไม้ยางพารา คือ ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.4 โมลาร์ เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนขี้เลื่อยยางพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก (กรัมต่อมิลลิลิตร) 1:10 สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 19.48 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

Rafiqul และคณะ (2011) ศึกษาพลังงานจลน์โดยการใช้กรดในการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ Meranti (ไม้สยาหิน) เพื่อผลิตน้ำตาลไซโลส จากการศึกษาการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อยไม้ Meranti ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 2 เปอร์เซ็นต์ 4 เปอร์เซ็นต์ และ 6 เปอร์เซ็นต์ ณ เวลาต่างๆกันคือ ช่วงเวลา 0-120 นาทีที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ พบว่าความเข้มข้นของกรด 2 เปอร์เซ็นต์ 4 เปอร์เซ็นต์ และ 6 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ น้ำตาลไซโลส เพิ่มขึ้นตามลำดับ จนถึงที่เวลา 20 นาที ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลไซโลสจะมีค่าลดลง ที่เวลา 120 นาที จะมีปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์น้ำตาลกลูโคส, เพอฟูรัล และกรดอะซิติกสูงที่สุด และเวลาที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ น้ำตาลกลูโคส, ปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เพอฟูรัลเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนคงที่ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และพบว่าความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 2 เปอร์เซ็นต์ 4 เปอร์เซ็นต์ และ 6 เปอร์เซ็นต์ยิ่งความเข้มข้นมากก็ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เพอฟูรัลเพิ่มขึ้นด้วย

Kwon และคณะ (2015) ศึกษาผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากสาหร่ายขนาดใหญ่ *Gracilaria verrucosa* โดยการใช้กระบวนการร่วมกันของกรดซिटริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปรับสภาพและการใช้เอนไซม์ในการไฮโดรไลซ์ จากการศึกษาการปรับสภาพด้วยกรดซिटริก 0.1 โมลาร์โดยใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1: 10 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมด 50.9 เปอร์เซ็นต์ในการปรับสภาพจะเกิดผลได้ของ TRS ที่อัตราส่วนเพียง 3 ค่า คือ 1:10 1:15 และ 1:20 ผลของความเข้มข้นของกรดซिटริก (โมลาร์) ที่ความเข้มข้น 0 0.025 0.1 0.25 0.5 1 โมลาร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ TRS จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์สูงขึ้น และไม่เกิดผลได้ของ TRS จากการใช้กรดในการปรับสภาพที่ความเข้มข้นของกรดซिटริกที่ 0 โมลาร์ ผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ (ชั่วโมง) ที่เวลา 0 30 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 4 ชั่วโมงและ 5 ชั่วโมงจะพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์ TRS จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์และการปรับสภาพสูงขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Li และคณะ (2016) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการปรับสภาพเพื่อผลิตแก๊สมีเทนชีวภาพและอัตราการใช้ไฮโดรไลซ์ของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากครัว จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการปรับสภาพในช่วง 55-160 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 15-120 นาทีในการไฮโดรไลซ์ของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากครัว พบว่า ที่อุณหภูมิในการปรับสภาพช่วง 55-120 องศาเซลเซียส ให้ผลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และเวลาในการปรับสภาพที่เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างแก๊สมีเทนและอัตราการใช้ไฮโดรไลซ์ที่สูงขึ้นด้วยซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีส่งผลให้ค่าผลได้ของแก๊สมีเทนสูงที่สุด

Wu และคณะ (2013) ศึกษาการปรับสภาพวัสดุที่ใช้สำหรับการเพาะเห็ดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมักน้ำตาล จากการศึกษาโดยสกัดวัสดุที่ใช้สำหรับการเพาะเห็ด เพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอน สำหรับเพาะเชื้อ *Bacillus thuringiensis* โดยเปรียบเทียบสภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพ เพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดเพื่อย่อยเซลลูโลส ให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.5-2.0 เปอร์เซ็นต์ (v/v) 50-121 องศาเซลเซียส, 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5-2.0 เปอร์เซ็นต์ (w/v) 50-121 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 0.2-4 เปอร์เซ็นต์ (w/v) 50-121 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และน้ำร้อน 50-121 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง จะได้ว่ากรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะให้ค่าเซลลูโลสที่สูงที่สุดและให้ค่าน้ำตาลรีดิวซ์สูงถึง 284.24 กรัมต่อกิโลกรัม

Unhasirikul และคณะ (2012) การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกทุเรียนโดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากการศึกษาวัสดุทางการเกษตรเหลือทิ้งจากเปลือกทุเรียนเพื่อให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ต้นทุนราคาถูกโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5-2.0 เปอร์เซ็นต์ (v/v) ใช้อุณหภูมิ autoclave ที่ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15-60 นาทีพบว่าสัมประสิทธิ์การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (acid hydrolysis efficiency, AHE) มีค่าสูงสุด 80.99 เปอร์เซ็นต์ที่สภาวะความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 15 นาทีที่น้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด 56.07 กรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 45 นาที ให้ผลผลิตน้ำตาลทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 59.83 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 45 นาที ที่สภาวะความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์ 30 นาที และความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 45 นาที และ 60 นาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษากระบวนการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้อย่างพารา จากการปรับสภาพโดยใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขนาดของซีเลื้อยไม้อย่างพาราที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮโดรไลซ์ คือ ขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร สามารถผลิตปริมาณน้ำตาลได้สูงที่สุด คือปริมาณน้ำตาลทั้งหมดได้ 20.46 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุดคือ 5.32 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หลังจากนั้นได้นำซีเลื้อยไม้อย่างพารา มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ใช้อัตราส่วน 1:10 ให้ความร้อนที่ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที ซึ่งเป็นสภาวะอ้างอิงพบว่า ซีเลื้อยขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร สามารถผลิตปริมาณน้ำตาลได้สูงที่สุด คือปริมาณน้ำตาลทั้งหมดได้ 22.86 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุดคือ 6.70 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซีเลื้อยขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป โดยการนำไปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส โดยออกแบบการทดลองแบบ $3 \times 3 \times 3$ แฟกทอเรียล เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลทั้งหมด และน้ำตาลรีดิวซ์พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์ซีเลื้อยไม้อย่างพารา คือ ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 0.4 โมลาร์ ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนซีเลื้อยไม้อย่างพาราต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก (กรัมต่อมิลลิลิตร) 1:10 ได้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 37.16 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 19.48 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากโครงการพิเศษนี้ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ซีเลื่อยไม้ยางพาราใช้ระยะเวลาสั้นสุดเพียง 120 นาที และเป็นสถานะที่ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด หากต้องการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จึงควรทำการทดลองโดยการเพิ่มระยะเวลาให้มากกว่า 120 นาที เพื่อศึกษาผลของการไฮโดรไลซ์ซีเลื่อยไม้ยางพาราที่จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น
- ในงานวิจัยนี้ควรคำนึงถึงหลักทางด้านเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติมด้วย เช่น ในขั้นตอนการไฮโดรไลซ์ซีเลื่อยไม้ยางพาราที่วางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3x3x3 ในการไฮโดรไลซ์ที่ระยะเวลา 120 นาที ควรจะไฮโดรไลซ์เป็นระยะเวลา 60 นาที จำนวน 2 ครั้ง เพราะจะให้ปริมาณน้ำตาลที่สูงกว่า และมองในหลักทางเศรษฐศาสตร์เป็นการลดต้นทุน สดพลังงานของเครื่อง autoclave



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา คมกิจ, กานต์ธิดา วรเดชากุล, นรินทิพย์ สีดำพา. 2557. กระบวนการไฮโดรไลซิสวัสดุเหลือใช้จากการเพาะเห็ดนางฟ้าและเห็ดขอนขาวด้วยกรดเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์. โครงการงานพิเศษ. สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จักรพงษ์ สังข์โชติ, นงรักษ์ เขียนปัญญา, พุทธชาติ ประค้ำนอก และวิภาดา ผลเจริญ. 2555. โครงการงานพิเศษ. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยลำต้นธูปฤาษีด้วยกรดเพื่อการผลิตเอทานอล. สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- จุฑาทิพย์ วรรมประเสริฐ, ชนิกานต์ ยงศิริ, ดาราภรณ์ นราองอาจ. 2556. กระบวนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรดจากเส้นใยลูกตาลเพื่อผลิตน้ำตาลกลูโคส. โครงการงานพิเศษ. สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จริยาภรณ์ อุ่นวงศ์. 2556. รูปแบบการสร้างมูลค่าเพิ่มวัสดุเหลือใช้จากผลิตภัณฑ์ชุมชน. โครงการงานวิจัยชุมชน.
- ซันนันทน์ นิवासวงษ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2555. การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์. 40(4): 1073-1088.
- นันทิกา คล้ายชม, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และอนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา. 2554. โครงการงานวิจัย. การผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์ จากซางข้าวฟ่างหวาน โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียมปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.
- นิรนาม.(มปป.) โครงสร้างของน้ำตาลรีดิวิซ์. dwb.unl.edu/.../Biochem_3521/lect14/lect14.html. สืบค้นวันที่ 29 ธันวาคม 2558
- นิรนาม.(มปป.) ปฏิกริยาของวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก (ดัดแปลงจาก มนตรี, 2530 และ Fryhe, 2003). en.wikipedia.org. สืบค้นวันที่ 29 ธันวาคม 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิรนาม.(มปป.) ปฏิกริยาของวิธี DNS (Plummer,1967).

<http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/6160/9/Chapter2.pdf>, สืบค้นวันที่
29 ธันวาคม 2558

บุญรอด วงษ์สวาท. 2558. สารประกอบอินทรีย์ เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ และสารชีวโมเลกุล.
บทเรียน e-Learning วิชาเคมี กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ โรงเรียนพรหมานุสรณ์.

ประมุข ภาระกุลสุขสถิตย์. 2555. การผลิตไบโอเอทานอลจากชีวมวล. รายงานวิจัย. ภาควิชา
เทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ.
ผ่องศรี ศิวราศักดิ์. 2549. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการย่อยสลายฟางข้าวด้วยกรดซัลฟิวริกค
เข้มข้นเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์สำหรับการหมักเอทานอล. วารสารวิศวกรรมศาสตร์.
หน้า 46-53.

พิชญ ศิริระกุล. 2547. องค์ประกอบของเซลล์พืช. แผนการสอน. รายวิชาเทคโนโลยีและสื่อสาร
การศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

รัชพล พะวงศรีรัตน์. 2558. กระบวนการปรับปรุงสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุ
เหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. วารสารวิทยาศาสตร์. สาขาวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสึปปากร. 2(1): 2408 - 1248.

สุขใจ ชูจันทร์. 2554. การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มวลชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุรัชย์ ศรีชินราช. 2556. คุณสมบัติทางเคมีของไม้ยางพารา. บริษัท บูรณาการรูป จำกัด.

เสาวนาภรณ์ โชคสกุลพร. 2557. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จาก
อ้อยเลาโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด. โครงการพิเศษ. สาขาวิชาเคมี คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม.

Bastawde, K.B. 1992. Xylan structure, microbial xylanases and their mode of action.
World J. of Microbiol. and Biotechnol.. 8 : 355-368.

Bosch, P., Wallberg, O., Joelsson, E., Galbe, M. and G. Zacchi. 2010. Impact of dual
temperature profile in dilute acid hydrolysis of spruce for ethanol production.
Biotechnology for Biofuels. 3: 15.

Chaisarn P, Satapanajaru T. and Mahujcharyawong J. 2008. Adsorption of VOCs by
activated charcoal produced from saw dust in para-rubber wood furniture
manufacturing. Thammasat Int J Sci Technol. 13: 8-17.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cheng, K.K., J.A. Zhang., W.X. Ping., J.P. Ge., Y.J. Zhou., H.Z. Ling and J.M. Xu. 2008. Sugarcane Bagasse Mild Alkaline/Oxidative Pretreatment for Ethanol Production by Alkaline Recycle Process. **Biochem Biotechnol.** 151: 43-50.
- Dubois, M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Rebers P.A., and Smith F. 1956. Calorimetric method for determination of sugars and related substances. **Anal Chem.** 28: 350-356.
- Eriksson, K.E.L., Blanchette R.A. and Ander P. 1990. Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Component. **Springer Verlag, Berlin.** 407p.
- Faiqah Abd-Rahim, Helmi Wasoh, Mohd Rafein Zakaria, Arbakariya Ariff, Rizal Kapri, Nazaruddin Ramli and Liew Siew-Ling, 2014, Production of high yield sugars from *Kappaphycus alvarezii* using combined methods of chemical and enzymatic hydrolysis. **Food Hydrocolloids.** 42: 309-315.
- Fan, L.T., Gharpuray, M.M. and Lee Y.H. 1987. Cellulose Hydrolysis Biotechnology Monographs. **Springer, Berlin.** 57p.
- Kumar S., Singh, S.P., Mishra, I.M., Adhikari and D.K. 2011. Continuous ethanol production by *Kluyveromyces* sp. IPE453 immobilized on bagasse chips in packed bed reactor, **Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels**, 2(1): 1-6.
- Maria Dyah Nur Meinita, Bintang Marhaenia, Tjahjo Winantoa, Dwi Setyaningsih and Yong-Ki Hong. 2014. Catalytic efficiency of sulfuric and hydrochloric acids for the hydrolysis of *Gelidium latifolium* (Gelidiales, Rhodophyta) in bioethanol production. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry.** 27: 108–114.
- Matura Unhasirikul, Nuanphan Naranong and Woatthichai NarkrugsuReducing. 2012. Sugar Production from Durian Peel by Hydrochloric Acid Hydrolysis. **International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering.** World Academy of Science, Engineering and Technology. 6(9).
- Miller and G.L. 1959. Using dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Anal. Chem.** 31: 426–428.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ngah, W.S., Hanafiah and M.A.K.M. 2008. Removal of heavy metal from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. **Bioresource Technology**. 99: 3935–3948.
- Oh-Min Kwon, Dong-Hyun Kim, Sung-Koo Kim and Gwi-Taek Jeong. 2016. Production of sugars from macro-algae *Gracilaria verrucosa* using combined process of citric acid-catalyzed pretreatment and enzymatic hydrolysis. **Algal Research**. Department of Biotechnology, Pukyong National University, Busan 608-737, South Korea. 13: 293–297.
- Rafiqul I.S.M. and Mimi Sakinah A.M. 2012. Kinetic studies on acid hydrolysis of Meranti wood sawdust for xylose production. **Chemical Engineering Science**. Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26300 Kuantan, Pahang, Malaysia, Department of Genetic Engineering and Biotechnology, University of Chittagong, Bangladesh. 71: 431–437.
- Songqing Wu, Yanjiao Lan, Zhimao Wu, Yan Peng, Siqi Chen, Zhipeng Huang, Lei Xu, Ivan Gelbic, Xiong Guan, Lingling Zhang and Shuangquan Zou. 2013. Pretreatment of spent mushroom substrate for enhancing the conversion of fermentable sugar. **Bioresource Technology**. 148: 596–600.
- Srinivasakanan C. and Bakar M Z A. 2004. Production of activated carbon from rubber wood sawdust. **Biomass Bioenerg**. 27: 89–96.
- Yangyang Li, Yiyang Jin, Jinhui Li, Hailong Li and Zhixin Yu. 2016. Effects of thermal pretreatment on the biomethane yield and hydrolysis rate of kitchen waste. **Applied Energy**. 172: 47–58.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

วิธีวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ด้วยวิธี Phenol-sulfuric acid method (Dubois, M. 1956)

1.1 อุปกรณ์

1.1.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

1.1.2 เครื่องผสมสารละลาย (vortex)

1.1.3 คิวเวต

1.1.4 ปิเปต

1.1.5 ลูกยาง

1.1.6 หลอดทดลอง

1.2 สารเคมี

1.2.1 กรดซัลฟิวริก (reagent grade 95.5 เปอร์เซ็นต์, specific gravity 1.84)

1.2.2 ฟีนอลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งฟีนอล 5 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นอีก 95 กรัม เพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

1.2.3 สารละลายกลูโคสมาตรฐาน เตรียมโดยชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 1000 มิลลิลิตร ได้สารละลายกลูโคสเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรจากนั้นนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังตาราง ก.1

1.3 วิธีการวิเคราะห์

1.3.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายกลูโคสมาตรฐานปริมาตร 1.0 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายฟีนอลร้อยละ 5 ลงไป 1.0 มิลลิลิตร

- 1.3.2 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตรลงไปอย่างรวดเร็ว โดยปล่อยกรดลงไป
ที่ผิวหน้าของของเหลวในหลอดทดลองโดยตรง จะทำให้การผสมกัน
เกิดขึ้นได้ดีกว่าการปล่อยลงที่ข้างหลอด
- 1.3.3 ตั้งหลอดทดลองของสารผสมนี้ไว้เป็นเวลา 10 นาที แล้วผสมให้เข้ากัน
- 1.3.4 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาว
คลื่น 490 นาโนเมตร
- 1.3.5 นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส (ภาพที่ ก.1) เพื่อ
หาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง หรือคำนวณได้จาก

$$\text{ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร} \times \text{อัตราการเจือจาง}}{\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน}}$$

ตารางที่ ก.1 การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อ
มิลลิลิตร

หลอดที่	สารละลายกลูโคส (0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	สารละลายกลูโคสมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	0	10	0
2	2	8	20
3	4	6	40
4	6	4	60
5	8	2	80
6	10	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำตาล (ug/ml) ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร

ความเข้มข้นน้ำตาล (ug/ml)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร
0	0
20	0.10
40	0.23
60	0.36
80	0.50
100	0.62



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีฟินอล-ซัลฟิวริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid Method (DNS) (Miller, 1959)

1.1 อุปกรณ์

- 1.1.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)
- 1.1.2 เครื่องผสมสารละลาย (vortex)
- 1.1.3 คิวเวต
- 1.1.4 ปิเปต
- 1.1.5 ลูกยาง
- 1.1.6 หลอดทดลอง

1.2 สารเคมี

- 1.2.1 DNS เตรียมโดยการชั่ง 3,5-dinitrosalicylic acid 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ ที่ละน้อย (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 16 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร) คนจนสารละลายใส แล้วเติมโพแทสเซียมซัลเฟต 300 กรัม ที่ละน้อย จากนั้นทำการปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
- 1.2.2 สารละลายกลูโคสมาตรฐาน เตรียมโดยชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร ได้สารละลายกลูโคสเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังตาราง ก.2

1.3 วิธีการวิเคราะห์

- 1.3.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายกลูโคสมาตรฐานปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก 3 มิลลิลิตร
- 1.3.2 นำไปต้มในน้ำเดือด 5 นาที
- 1.3.3 ทำให้เย็นทันที และเติมน้ำกลั่น 6 มิลลิลิตร
- 1.3.4 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร
- 1.3.5 นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส (ภาพที่ ก.2) เพื่อหาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง หรือคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความเข้มข้นของกลูโคส(กรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร} \times \text{อัตราการเจือจาง}}{\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน}}$$

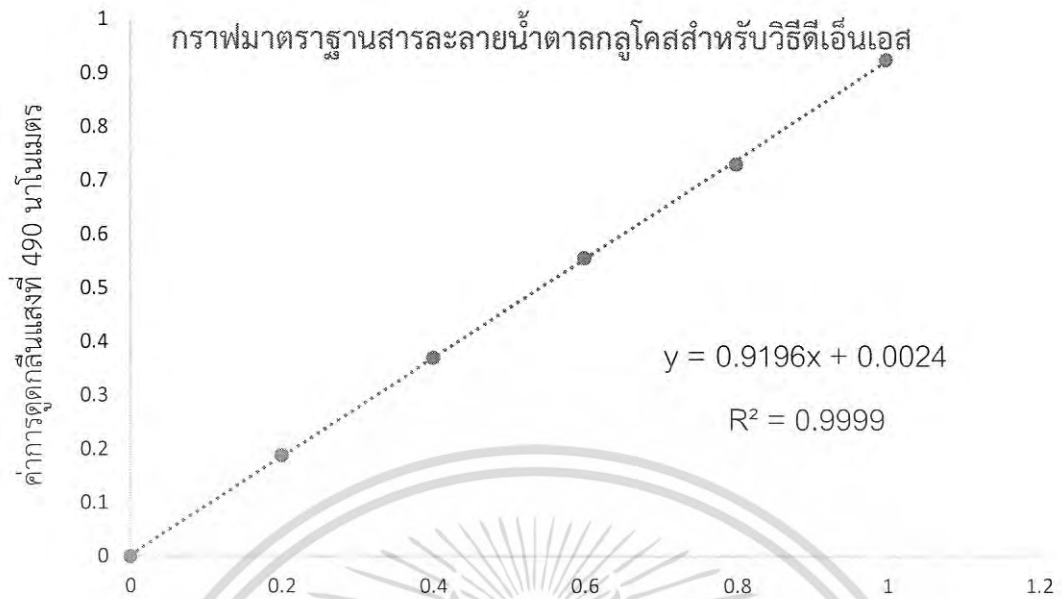
ตารางที่ ก.3 การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0-0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

หลอดที่	สารละลายกลูโคส (1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	สารละลายกลูโคสมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	0	10	0
2	2	8	0.2
3	4	6	0.4
4	6	4	0.6
5	8	2	0.8
6	10	0	1.0

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าความเข้มข้นน้ำตาล (mg/ml) ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร

ความเข้มข้นน้ำตาล (mg/ml)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร
0	0
0.2	0.19
0.4	0.37
0.6	0.56
0.8	0.73
1.0	0.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีดีเอ็นเอส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลของค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณน้ำตาล

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรและปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 3 ซ้ำการทดลอง จากการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม่ยั้งพาราด้วยกรด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

การทดลอง	เวลา	ความเข้มข้น	อัตราส่วน	Dilution	ซ้ำที่ 1		ซ้ำที่ 2		ซ้ำที่ 3	
					OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล
1	60	0.1	1:10	150	0.61	9.68	0.619	9.83	0.62	9.87
2	60	0.1	1:20	100	0.56	8.9	0.54	8.65	0.55	8.76
3	60	0.1	1:30	100	0.53	8.4	0.56	8.87	0.52	8.17
4	60	0.2	1:10	200	0.70	22.29	0.71	22.54	0.715	22.7
5	60	0.2	1:20	100	0.66	10.49	0.67	10.62	0.75	11.9
6	60	0.2	1:30	100	0.53	8.44	0.54	8.59	0.54	8.49
7	60	0.4	1:10	250	0.64	25.48	0.71	28.29	0.74	29.21
8	60	0.4	1:20	150	0.52	12.36	0.53	12.55	0.535	12.74
9	60	0.4	1:30	100	0.50	7.92	0.48	7.54	0.48	7.68
10	90	0.1	1:10	200	150	0.6	14.29	0.62	14.79	0.59
11	90	0.1	1:20	100	100	0.67	10.56	0.768	12.19	0.72
12	90	0.1	1:30	100	100	0.65	10.38	0.64	10.11	0.71
13	90	0.2	1:10	250	200	0.79	25.08	0.80	25.37	0.79
14	90	0.2	1:20	200	150	0.64	15.12	0.53	12.62	0.6
15	90	0.2	1:30	100	100	0.67	10.62	0.66	10.4	0.68
16	90	0.4	1:10	250	250	0.72	28.69	0.71	28.25	0.72
17	90	0.4	1:20	250	200	0.52	16.6	0.53	16.95	0.53
18	90	0.4	1:30	100	150	0.43	10.17	0.42	9.98	0.42
19	120	0.1	1:10	150	0.761	18.12	0.75	17.74	0.80	18.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรและปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 3 ซ้ำการทดลอง จากการไฮโดรไลซิสซีเลื้อยไม่ย่างพาราด้วยกรด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล (ต่อ)

การทดลอง	เวลา	ความเข้มข้น	อัตราส่วน	Dilution	ซ้ำที่ 1		ซ้ำที่ 2		ซ้ำที่ 3	
					OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล
20	120	0.1	1:20	100	0.661	10.49	0.65	10.24	0.70	11.05
21	120	0.1	1:30	100	0.654	10.38	0.64	10.11	0.71	11.19
22	120	0.2	1:10	350	0.62	34.44	0.62	34.28	0.70	38.61
23	120	0.2	1:20	150	0.522	12.43	0.57	13.67	0.57	13.48
24	120	0.2	1:30	100	0.593	9.41	0.62	9.762	0.66	10.44
25	120	0.4	1:10	400	0.569	36.13	0.56	35.62	0.63	39.75
26	120	0.4	1:20	150	0.791	18.83	0.78	18.57	0.80	19.02
27	120	0.4	1:30	150	0.744	17.71	0.65	15.48	0.62	14.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์
3 ซ้ำการทดลอง จากการไฮโดรไลซิสซีลี้อย่างพาราด้วยกรด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ
3x3x3 แฟคทอเรียล

การทดลอง	เวลา	ความเข้มข้น	อัตราส่วน	Dilution	ซ้ำที่ 1		ซ้ำที่ 2		ซ้ำที่ 3	
					OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล
1	60	0.1	1:10	10	0.30	3.28	0.54	5.88	0.45	4.93
2	60	0.1	1:20	10	0.43	4.7	0.54	5.85	0.49	5.35
3	60	0.1	1:30	5	0.59	3.23	0.58	3.13	0.58	3.15
4	60	0.2	1:10	20	0.36	7.83	0.45	9.72	0.57	12.48
5	60	0.2	1:20	10	0.59	6.37	0.54	5.82	0.55	6.01
6	60	0.2	1:30	10	0.44	4.81	0.39	4.22	0.4	4.35
7	60	0.4	1:10	20	0.66	14.35	0.73	15.81	0.69	15.01
8	60	0.4	1:20	10	0.78	8.47	0.74	8.06	0.56	6.08
9	60	0.4	1:30	10	0.49	5.27	0.43	4.68	0.43	4.65
10	90	0.1	1:10	15	0.47	7.6	0.66	10.7	0.70	11.48
11	90	0.1	1:20	10	0.38	4.14	0.42	4.58	0.53	5.74
12	90	0.1	1:30	5	0.64	3.48	0.66	3.57	0.66	3.57
13	90	0.2	1:10	15	0.46	7.55	0.48	7.88	0.41	6.72
14	90	0.2	1:20	10	0.63	6.86	0.50	5.42	0.67	7.25
15	90	0.2	1:30	10	0.44	4.82	0.49	5.34	0.49	5.34
16	90	0.4	1:10	30	0.37	11.94	0.47	15.37	0.45	14.75
17	90	0.4	1:20	10	0.76	8.28	0.76	8.23	0.72	7.79
18	90	0.4	1:30	10	0.52	5.69	0.45	4.85	0.51	5.52
19	120	0.1	1:10	10	0.59	6.43	0.45	4.89	0.53	5.76
20	120	0.1	1:20	10	0.69	7.5	0.55	6.01	0.54	5.9
21	120	0.1	1:30	10	0.42	4.6	0.36	3.93	0.45	4.86
22	120	0.2	1:10	30	0.59	19.31	0.54	17.65	0.53	17.29
23	120	0.2	1:20	10	0.80	8.72	0.66	7.19	0.77	8.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 3 ซ้ำการทดลอง จากการไฮโดรไลซิสซีลี้อยไม่ยงพาราด้วยกรด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล (ต่อ)

การทดลอง	เวลา	ความเข้มข้น	อัตราส่วน	Dilution	ซ้ำที่ 1		ซ้ำที่ 2		ซ้ำที่ 3	
					OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล	OD	น้ำตาล
24	120	0.2	1:30	10	0.495	5.38	0.553	6.01	0.551	5.99
25	120	0.4	1:10	30	0.6	19.57	0.64	20.72	0.56	18.14
26	120	0.4	1:20	15	0.55	8.97	0.62	10.15	0.63	10.21
27	120	0.4	1:30	10	0.621	6.75	0.60	6.56	0.60	6.48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ค.1 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของกระบวนการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อย
ไม้อย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	5415.78 ^a	26	208.30	249.50	.000
Intercept	20424.67	1	20424.67	24465.01	.000
conc	906.19	2	453.10	542.73	.000
ratio	473.91	2	236.96	283.83	.000
time	3013.48	2	1506.74	1804.80	.000
conc * ratio	54.33	4	13.58	16.27	.000
conc * time	714.95	4	178.74	214.10	.000
ratio * time	188.90	4	47.22	56.57	.000
conc * ratio * time	64.03	8	8.00	9.59	.000
Error	45.08	54	.835		
Total	25885.53	81			
Corrected Total	5460.86	80			

a. R Squared = .992 (Adjusted R Squared = .988)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post Hoc Tests

ตารางที่ ค.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรไลซ์ซีเลื่อยไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Homogeneous Subsets

Conc

Duncan^{a,b}

Conc	Subset			
	N	1	2	3
0.10	27	11.42 ^c		
0.20	27		16.74 ^b	
0.40	27			19.48 ^a
Sig.		1.000	1.000	1.000

Alpha = 0.05

ตารางที่ ค.3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเวลาในกระบวนการไฮโดรไลซ์ซีเลื่อยไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Time

Duncan^{a,b}

Time	Subset			
	N	1	2	3
60.00	27	12.10 ^c		
90.00	27		15.72 ^b	
120.00	27			18.92 ^a
Sig.		1.000	1.000	1.000

Alpha = 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราส่วนในกระบวนการไฮโดรไลซ์
ซีลีเนียมอย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Ratio

Duncan^{a,b}

Ratio	Subset			
	N	1	2	3
30.00	27	10.27 ^c		
20.00	27		13.01 ^b	
10.00	27			24.36 ^a
Sig.		1.000	1.000	1.000

Alpha = 0.05



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของกระบวนการไฮโดรไลซ์ขี้เลื่อย
ไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1429.16 ^a	26	54.97	165.22	.000
Intercept	5270.60	1	5270.60	15842.01	.000
conc	248.93	2	124.46	374.10	.000
ratio	142.89	2	71.45	214.75	.000
time	787.41	2	393.70	1183.36	.000
conc * ratio	16.76	4	4.191	12.60	.000
conc * time	104.21	4	26.05	78.31	.000
ratio * time	85.55	4	21.39	64.29	.000
conc * ratio * time	43.42	8	5.43	16.31	.000
Error	17.97	54	.33		
Total	6717.73	81			
Corrected Total	1447.13	80			

a. R Squared = .988 (Adjusted R Squared = .982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post Hoc Tests

ตารางที่ ค.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรไลซ์ซีลีเนียมอย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Homogeneous Subsets

Conc

Duncan^{a,b}

Conc	Subset			
	N	1	2	3
0.10	27	5.98 ^c		
0.20	27		7.94 ^b	
0.40	27			10.27 ^a
Sig.		1.000	1.000	1.000

Alpha = 0.05

ตารางที่ ค.7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของเวลาในกระบวนการไฮโดรไลซ์ซีลีเนียมอย่างพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Time

Duncan^{a,b}

Time	Subset			
	N	1	2	3
60.00	27	6.97 ^c		
90.00	27		7.29 ^b	
120.00	27			9.94
Sig.		1.000	1.000	1.000

Alpha = 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของอัตราส่วนในกระบวนการไฮโดรไลซ์
ซีลื้อยไม้ยางพาราเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Ratio

Duncan^{a,b}

Ratio	Subset			
	N	1	2	3
30.00	27	4.82 ^c		
20.00	27		7.10 ^b	
10.00	27			12.28 ^a
Sig.		1.000	1.000	1.000

Alpha = 0.05



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้