การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว โดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก

REDUCING SUGAR PRODUCTION FROM OFFICE PAPER WASTE BY SULFURIC ACID HYDROLYSIS

นางสาวขนิษฐา ดุมชัยภูมิ

นางสาวณัฐธยา สุขสุดประเสริฐ

นางสาวณีรนุช ตั้งนิมิตโชค

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว โดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก

REDUCING SUGAR PRODUCTION FROM OFFICE PAPER WASTE BY SULFURIC ACID HYDROLYSIS

T149258

นางสาวขนิษฐา ดุมชัยภูมิ

นางสาวณัฐธยา สุขสุดประเสริฐ

นางสาวณีรนุช ตั้งนิมิตโชค

ว226ก
2558
ลงหมู่ 149258
ลงทะเบียน 30 ส.ค. 2561
วัน เดือน ปี

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REDUCING SUGAR PRODUCTION FROM OFFICEPAPER WASTE BY SULFURIC ACiD HYDROLYSIS

KANITTHA DUMCHAIYAPOOM

NATTHAYA SUKSUDPRASERT

NEERANUCH THANGNIMITCHOK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHERLOR OF SCIENCE

IN BIOTECHNOLOGY

DEPARTMENT OF BIOLOGY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACEDEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว โดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก Reducing sugar production from office paper waste by sulfuric acid hydrolysis
ชื่อนักศึกษา	นางสาวขนิษฐา ดุมชัยภูมิ 55051061 นางสาวณัฐธยา สุขสุดประเสริฐ 55051087 นางสาวณีรนุช ตั้งนิมิตโชค 55051094
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิตเทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชา	ชีววิทยาประยุกต์
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์สุขใจ ชูจันทร์

คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ. ลินจง สุขลำภู ประธานกรรมการ	
ดร. สุทธิจิต ศรีวัชรกุล กรรมการ	
รศ. สุขใจ ชูจันทร์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว โดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวขนิษฐา ดุมชัยภูมิ 55051061
	นางสาวณัฐธยา สุขสุดประเสริฐ 55051087
	นางสาวณีรนุช ตั้งนิมิตโชค 55051094
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิตเทคโนโลยีชีวภาพ
ภาควิชา	ชีววิทยาประยุกต์
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์สุขใจ ชูจันทร์

บทคัดย่อ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกระดาษเหลือใช้ นำตัวอย่างมาบดและร่อนให้ได้ขนาดที่ต้องการ ได้แก่ ขนาด 300-500, 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร หลังจากนั้นปรับสภาพตัวอย่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 4 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำกระดาษนี้มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก โดยเปรียบเทียบน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพ และไม่ผ่านการปรับสภาพ ทำการกำหนดปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อการไฮโดรไลซ์ 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.5 นอร์มอล เวลา 120 นาที และอัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรด 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่ากระดาษขนาด 500-850 ไมโครเมตร ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ให้น้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด คือ 9.79 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จึงได้นำกระดาษขนาดนี้มาไฮโดรไลซ์อีกครั้งด้วยกรดซัลฟิวริก ศึกษาปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อการไฮโดรไลซ์ 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เวลา และอัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรด โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกคือ 0.1, 0.5 และ 1 นอร์มอล เวลาคือ 60, 120 และ 180 นาที อัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรดคือ 1:8, 1:10 และ 1:12 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า การไฮโดรไลซ์ตัวอย่างขนาด 500-850 ไมโครเมตร ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 นอร์มอล เวลา 120 นาที อัตราส่วน 1:8 เป็นสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด คือ 21.53 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : กระดาษเหลือใช้ การปรับสภาพ การไฮโดรไลซ์ น้ำตาลรีดิวซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Reducing sugar production from office paper waste by sulfuric acid hydrolysis
Students	Miss Kanittha Dumchaiyapoom Student ID 55051061
	Miss Natthaya Suksudprasert Student ID 55051087
	Miss Neeranuch Thangnimitchok Student ID 55051094
Degree	Bachelor of Science Biotechnology
Department	Biology
Academic Year	2015
Advisor	Assoc.Prof. Sukjai Choojun

Abstract

The study of reducing sugar production from paper waste were blended and separated size by sieve (300-500, 500-850 and more than 850 µm). After that, adjust the samples to pretreatment with 4% NaOH at 70°C for 2 hours. This paper was hydrolyzed by sulfuric acid (H_2SO_4). The sample (paper) was compared amount of reducing sugar there were pretreated and non- pretreated. Set factors that affect to hydrolyzed are concentration of H_2SO_4 (0.5 N), time (120 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 (paper) were 500-850 µm of non-pretreated that can spend a maximum of reducing sugar, 9.79 mg/ml. Therefore, paper at this size is the best appropriate for hydrolyzed again with H_2SO_4. Study factors that affect to hydrolyzed are concentration of H_2SO_4 (0.1, 0.5 and 1.0 N), time (60, 120 and 180 min) and ratio of sample per acid volume (1:8, 1:10 and 1:12 g/ml) at 121 °C, at the second hydrolyzed. The result showed that the optimal condition for hydrolyzed of samples (paper size 500-850 µm of non-pretreated) were 1 N of H_2SO_4 at 120 min ; 1:8 g/ml that can spend a maximum of reducing sugar, 21.53 mg/ml.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keyword : hydrolysis, paper waste, pretreatment, reducing sugar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้ได้จัดทำขึ้นตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ สุขใจ ชูจันทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการทำโครงงานพิเศษ จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง ที่สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษาชี้นำ เป็นมิ่งขวัญและกำลังใจ ช่วยตรวจทานแก้ไขโครงงานฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์และครบถ้วน

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ลินจง สุขลำภู ประธานกรรมการและ ดอกเตอร์ สุทธิจิต ศรีวัชรกุล กรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขโครงงานพิเศษเล่มนี้ ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการชีววิทยา ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงงานพิเศษ และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาชีววิทยาทุกๆ ท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง เพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา หากโครงงานพิเศษฉบับนี้มีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ทางคณะผู้จัดทำขอน้อมรับไว้ทั้งหมด ส่วนคุณค่า คุณความดี และประโยชน์ ที่ปรากฏในโครงงานฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอยกให้ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นางสาวขนิษฐา ดุมชัยภูมิ
นางสาวณัฐธยา สุขสุดประเสริฐ
นางสาวณีรนุช ตั้งนิมิตโชค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
กิตติกรรมประกาศ		จ
สารบัญ		ฉ
สารบัญตาราง		ช
สารบัญรูป		ฎ
บทที่ 1 บทนำ		
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		
2.1	กระดาษ	3
2.2	ลิกโนเซลลูโลส	12
2.3	กระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment process)	23
2.4	กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis process)	35
2.5	น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar)	37
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย		
3.1	อุปกรณ์	42
3.2	เครื่องมือ	42
3.3	สารเคมี	43
3.4	วัตถุดิบ	43
3.5	การเตรียมวัตถุดิบ	43
3.6	กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	44
3.7	กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อหาสถานะและขนาดของตัวอย่างที่ดีที่สุด	44
3.8	กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นต่างกัน	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.9 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล 46
3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ 46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง
4.1 ผลการศึกษากระบวนการปรับสภาพกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 47
4.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ 48
4.3 ผลการศึกษาการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ ด้วยกรดซัลฟิวริก โดยออกแบบการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล 50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการทดลอง 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 57
เอกสารอ้างอิง 58
ภาคผนวก 64
ภาคผนวก ก 65
ภาคผนวก ข 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีและขนาดของเส้นใยของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง	9
2.2	ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือใช้หรือกากทางการเกษตร	15
2.3	จุดเด่นและจุดด้อยของกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน	32
2.4	ผลกระทบของกระบวนการปรับสภาพต่อองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส	34
3.1	การศึกษาสภาวะที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ โดยวางแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	45
4.1	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาด	47
4.2	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	48
4.3	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	49
4.4	เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	49
4.5	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ โดยออกแบบแผนการดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	50
4.6	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	52
4.7	ปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียล	53
4.8	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลรีดิซ์ของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	54
4.9	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการดลองแบบ 3x3x3 แพ่คทอเรียล	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.10	ปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล	56
ก.1	การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร	68
ก.2	การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0-0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	71
ข.1	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร ของกระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	72
ข.2	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร ของกระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	72
ข.3	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร ของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	72
ข.4	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร ของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	73
ข.5	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร ของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	73
ข.6	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร ของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	73
ข.7	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร ของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมดโดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 60 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 50, 300 และ 350 เท่า ตามลำดับ	74
ข.8	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 60 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 10 และ 30 เท่า ตามลำดับ	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.9 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 120 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 50, 300 และ 350 เท่า ตามลำดับ 76

ข.10 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 120 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 30 และ 30 เท่า ตามลำดับ. 77

ข.11 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 180 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 10 และ 30 เท่า ตามลำดับ 78

ข.12 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 180 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 20 และ 30 เท่า ตามลำดับ 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างตัดขวางภายในของเส้นใยไม้เนื้ออ่อน Conifer tracheid	10
2.2	กระดาษปรู๊ฟ	11
2.3	กระดาษอาร์ต	12
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส	13
2.5	โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช	14
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน	17
2.7	โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส	18
2.8	สูตรโครงสร้างของลิกนิน	19
2.9	โมโนเมอร์ของลิกนิน	20
2.10	สูตรโครงสร้างของ (a) trans-coniferyl alcohol, (b) trans-p-sinapyl alcohol และ (c) tran-pcoumaryl alcohol	21
2.11	ผลของการปรับสภาพ (pretreatment) วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส	23
2.12	แผนภาพของการปรับสภาพทางชีวภาพของลิกโนเซลลูโลส เชื้อราชนิดที่เป็นสีขาว ลดปริมาณลิกนิน และปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของลิกโนเซลลูโลส ทำให้การย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสมีประสิทธิภาพมากขึ้น	31
2.13	สูตรโครงสร้างของน้ำตาลแล็กโทส	38
ก.1	กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก	67
ก.2	กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีดีเอ็นเอส	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระดาษ หมายถึง วัตถุแผ่นบางๆ โดยทำมาจากใยเปลือกไม้ ฟาง เศษผ้า และอาจมีส่วนผสมอย่างอื่นเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของกระดาษดีขึ้น กระดาษเป็นวัสดุซึ่งย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ หาซื้อได้ทั่วไปและราคาถูกซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การเขียน การวาดภาพ การพิมพ์ และการบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

เส้นใยจากพืชที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ ทำมาจากไม้เนื้ออ่อน เช่น ต้นสน ต้นยูคาลิปตัส ซึ่งมีเส้นใยยาว ช่วยให้กระดาษมีความแข็งแรงและเหนียว และมีการนำไม้เนื้อแข็งจำพวก ต้นโอ๊ก ต้นเมเปิล มาใช้ทำเส้นใย ซึ่งจะได้เส้นใยที่สั้นกว่า แต่ช่วยทำให้ผิวกระดาษเรียบและทึบแสงมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำพืชล้มลุก เช่น ต้นกก ปอกระเจา อ้อย ฝ้าย มาใช้ทำเยื่อกระดาษด้วย เส้นใยจะประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสมาเรียงต่อกัน กับเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ซึ่งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างโมเลกุลของกลูโคสและน้ำตาลอื่นๆ เช่น แมนโนส (mannose) ฟูโคส (fucose) ไซโลส (xylose) มาต่อกัน เส้นใยยังมีส่วนที่เป็นลิกนิน (lignin) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมเส้นใยให้อยู่ด้วยกัน ในขบวนการผลิตกระดาษ ลิกนินจะถูกขจัดออกจากเยื่อกระดาษ หากมีลิกนินหลงเหลืออยู่ในกระดาษจะทำให้กระดาษเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับแสง

กระดาษผลิตจากเยื่อของต้นไม้ เพื่อลดการตัดต้นไม้ เราต้องใช้กระดาษให้เกิดประโยชน์คุ้มค่ามากที่สุด การใช้กระดาษในปัจจุบัน เนื่องจากกระดาษเป็นวัสดุสิ้นเปลือง จึงมีการนำกระดาษกลับมาใช้อีก เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์นำมาพับถุงกระดาษ กระดาษสำหรับเขียนแม้ใช้แล้วทั้งสองหน้าก็สามารถนำไปพิมพ์อักษรเบรลล์สำหรับคนตาบอดได้ เมื่อหมดสภาพแล้ว ก็นำไปเข้าโรงงานแปรรูปเป็นสินค้าประเภทลังกระดาษได้อีกด้วย การใช้กระดาษรีไซเคิลเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อกระดาษ และเป็นการร่วมกันอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติเพื่อลดภาวะโลกร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เป็นการศึกษาการใช้ประโยชน์จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว เพื่อใช้ผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

1.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรไลซ์ (hydrolysis) วัตถุดิบด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้ปริมาณสูงที่สุด

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ระหว่างวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เป็นการศึกษากระบวนการและสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการไฮโดรไลซ์ (hydrolysis) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้ปริมาณสูงที่สุด โดยนำกระดาษที่ใช้แล้วมาทำให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ รวมทั้งเป็นการช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถแปรสภาพกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วให้มีมูลค่าสูงขึ้น

1.4.2 เพื่อที่จะได้ทราบถึงกระบวนการไฮโดรไลซ์ (hydrolysis) ที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้ปริมาณสูงที่สุด

1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการนำน้ำตาลที่ผลิตได้ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระดาษ

2.1.1 ความหมายและความเป็นมาของกระดาษ

กระดาษ หมายถึง วัตถุแผ่นบางๆ โดยทำมาจากใยเปลือกไม้ ฟาง เศษผ้า และอาจมีส่วนผสมอย่างอื่นเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของกระดาษดีขึ้น

ประวัติของกระดาษเริ่มเมื่อประมาณ 5,000 ปีแล้วมา ชาวอียิปต์โบราณได้คิดค้นวิธีการทำกระดาษขึ้นจากต้นกกชนิดหนึ่งซึ่งมีชื่อเรียกว่า “ไซเปอรัส ปาไปรัส (*Cyperus papyrus*)” ต้นกกชนิดนี้ขึ้นตามริมฝั่งแม่น้ำไนล์มีความสูง 2 ถึง 3 เมตร โดยประมาณ ชาวอียิปต์นำต้นกกมาตัดให้ได้ขนาดตามขนาดกระดาษที่ต้องการ เสร็จแล้วลอกเปลือกออก วางเป็นแนวสานขัดเข้าด้วยกันแล้วจึงนำไปแช่ในน้ำจนนิ่ม ทุบให้ส่วนที่สานกันอยู่ให้แบนเป็นแผ่นติดกัน ตากให้แห้ง สุดท้ายใช้หินขัดผิวให้เรียบ แล้วนำมาใช้เขียนหนังสือหรือภาพต่างๆ กระดาษที่ได้นี้ถูกเรียกตามชื่อต้นกกว่า “ปาไปรัส (papyrus)” เนื่องจากต้นกกชนิดนี้เจริญเติบโตขึ้นได้ในสภาพภูมิอากาศแถบแม่น้ำไนล์ การผลิตกระดาษปาไปรัสจึงถูกจำกัดอยู่ในย่านนี้

ในยุคสมัยของกรีกและโรมัน ได้มีการนำหนังสัตว์ที่เรียกว่า “พาร์ชเม้นท์ (parchment)” มาใช้ในการจารึกหนังสือนอกเหนือจากการใช้กระดาษปาไปรัสซึ่งนำเข้าจากอียิปต์ที่มีราคาสูงขึ้นและเกิดการขาดแคลนอันมีสาเหตุมาจากต้นกกที่ใช้ทำกระดาษมีจำกัด กรรมวิธีการทำพาร์ชเม้นท์เริ่มจากการนำหนังสัตว์ เช่น หนังวัว หนังแกะ หรือหนังแพะมาแช่ในน้ำประมาณ 1 วัน เพื่อขจัดเลือดและสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำหนังสัตว์ที่ได้ไปแช่ในอ่างที่เป็นสารละลายประเภทด่างไม่ต่ำกว่า 1 สัปดาห์ เพื่อขจัดขนออก นำหนังสัตว์ดังกล่าวไปขึงให้ตึงกับกรอบไม้ ผึ่งให้แห้ง ใช้มีดขูดขนที่ยังหลงเหลืออยู่ให้หลุดออกและเป็นการทำให้ผิวเรียบ มีความหนาที่สม่ำเสมอกัน หนังสัตว์ซึ่งมีส่วนประกอบของคลอลาเจน (collagen) เป็นส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายกาว เมื่อเวลาแห้งจึงทำให้หนังสัตว์คงรูปเป็นแผ่นอยู่ได้และสามารถนำไปใช้งานต่อไป พาร์ชเม้นท์ที่มีคุณภาพดีมีชื่อเรียกว่า “เวลลัม (vellum)” ซึ่งจะมีผิวที่เรียบ ทนทาน เหมาะสำหรับใช้ในการขีดเขียน ต่อมาได้มีการพัฒนาพาร์ชเม้นท์ให้เหมาะกับการใช้ขีดเขียนมากขึ้น โดยคิดค้นให้พาร์ชเม้นท์มีความขาวขึ้น เรียบขึ้น ตลอดจนสามารถรับหมึกได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการย้อมให้พาร์ชเม้นท์มีสีต่างๆ ด้วย เช่น สีน้ำเงิน เขียว แดง ส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ที่มีส่วนสำคัญในการคิดค้นการทำกระดาษจนเป็นที่นิยมและเป็นหลักในการพัฒนาจนถึงปัจจุบันกลับเป็นชาวจีน ประมาณปี ค.ศ. 105 ชาวจีนผู้หนึ่งมีชื่อว่า ไจ่หลุน ได้นำเศษผ้าขี้ริ้วเก่า เศษไม้ มาต้มกับน้ำและทุบจนเปื่อยอยู่ในน้ำเป็นเยื่อกระดาษ นำน้ำเยื่อดังกล่าวมาเทลงบนตะแกรงผ้าแล้วเกลี่ยให้ทั่ว ส่วนของน้ำจะซึมผ่านตะแกรงเหลือแต่เยื่อกระดาษที่ยังเปียกอยู่ เมื่อนำไปตากแดดให้แห้งก็สามารถลอกและนำมาใช้เขียนได้ ต่อมาไจ่หลุนได้คิดค้นวิธีการทำกระดาษให้ดีขึ้น โดยใช้ตะแกรงจุ่มลงในอ่างที่มีน้ำเยื่ออยู่ แล้วค่อยๆ ช้อนเอาเยื่อกระดาษขึ้นมา ก่อนจะนำไปตากแห้งและใช้งาน วิธีนี้ทำให้กระดาษที่ได้มีความหนาสม่ำเสมอขึ้น กระดาษที่ได้จากการทำด้วยวิธีของไจ่หลุนจะมีความเหนียวขึ้นกว่าวิธีของชาวอียิปต์เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยต่างๆ ไม่เป็นระเบียบ การใช้กระดาษที่ผลิตโดยวิธีดังกล่าวเริ่มแพร่หลายขึ้นในประเทศจีน หลังจากนั้นก็ถูกเผยแพร่ต่อไปยังเกาหลี ญี่ปุ่น เอเชียกลาง อาหรับ และไปยังยุโรป มีการตั้งโรงผลิตกระดาษตามเมืองใหญ่ๆ หลายแห่ง สำหรับที่อาหรับ การทำกระดาษจะทำจากเศษผ้าเก่าเป็นวัตถุดิบเสียส่วนใหญ่ เนื่องจากขาดแคลนเยื่อไม้ ประกอบกับเครื่องมือที่ใช้ทำกระดาษไม่ค่อยดีนัก กระดาษที่ได้จึงถูกปรับปรุงโดยนำไปเคลือบด้วยแป้ง ทำให้กระดาษของชาวอาหรับมีสีขาวและเหมาะกับการใช้ขีดเขียนได้ดีขึ้น กระดาษของชาวอาหรับจะถูกนำไปจำหน่ายในยุโรปซึ่งมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ กรรมวิธีการผลิตกระดาษในยุคนั้นมักถูกเก็บเป็นความลับไม่เป็นที่เปิดเผย

ในคริสศตวรรษที่ 13 ชาวอิตาเลียนได้พัฒนาการผลิตกระดาษให้ดีกว่าที่ทำจากอาหรับ โดยเน้นพัฒนาเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในขบวนการผลิต ประเทศอื่นๆ ในยุโรปก็มีการพัฒนากรรมวิธีในการผลิตกระดาษเรื่อยมาจนมีการนำเครื่องจักรมาช่วยในการผลิต โดยในปี ค.ศ. 1490 ได้มีการตั้งโรงงานผลิตกระดาษด้วยเครื่องจักรขึ้นที่เมือง เฮอฟอร์ดชายร์ (Herfordshire) ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1798 ชาวฝรั่งเศส ชื่อ เอ็ม ดิโดต์ (M. Didot) ได้ประดิษฐ์เครื่องจักรผลิตกระดาษแบบอัตโนมัติเครื่องแรกในปี ค.ศ. 1807 ที่ประเทศอังกฤษ พี่น้องตระกูลโฟร์ดริเนียร์ (Fourdrinier) และทีมงานได้นำแนวคิดของ นิโคลัส หลุยส์ โรเบิร์ต (Nicholas Loius Robert) ผู้ซึ่งเคยทำงานอยู่ในโรงผลิตกระดาษของเอ็ม ดิโดต์ มาสร้างเครื่องจักรผลิตกระดาษม้วนได้สำเร็จ และเครื่องจักรนี้ได้ถูกตั้งชื่อในภายหลังว่า “เครื่องโฟร์ดริเนียร์” ซึ่งถือเป็นเครื่องต้นแบบสำหรับเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตกระดาษจนถึงปัจจุบัน

สำหรับเยื่อกระดาษซึ่งเดิมทีใช้เศษผ้ามาเป็นวัตถุดิบ เมื่อมีความต้องการกระดาษมากขึ้น เศษผ้าเริ่มขาดแคลน จึงมีการทดลองใช้วัสดุอื่นมาเพื่อแทน เช่น ปอ ซังข้าวโพด อ้อย ไผ่ เปลือกไม้ เนื้อไม้ จนพบว่าเยื่อที่ทำจากเนื้อไม้ยืนต้นเหมาะที่จะนำมาทำกระดาษที่สุด การผลิตกระดาษในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการใช้เยื่อไม้หลายชนิดเข้าด้วยกัน เยื่อใยยาวมักจะได้มาจากต้นสนซึ่งจะช่วยเรื่องความเหนียวของกระดาษ เยื่อใยสั้นอาจจะใช้เยื่อของต้นยูคาลิปตัส โดยนำเนื้อไม้มาสับเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปบดหรือย่อยฟอกจนเป็นน้ำเยื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตกระดาษต่อไป ในปัจจุบันมีการผลิตกระดาษหลากหลายชนิดเพื่อนำไปใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันนอกจากจะใช้เพียงเพื่อการขีดเขียน เช่น เพื่อนำไปใช้ทำบรรจุภัณฑ์ วัสดุก่อสร้าง (ฝ้า ผนัง) ใช้ในการพิมพ์ ทำปกหนังสือ หรือแม้กระทั่งใช้เป็นกระดาษสุขภัณฑ์

2.1.2 องค์ประกอบของกระดาษ

องค์ประกอบของกระดาษแบ่งออกเป็น 2 จำพวก คือ

1. องค์ประกอบที่เป็นเส้นใย

กระดาษสามารถยึดตัวเป็นแผ่นได้เกิดจากเส้นใยเป็นจำนวนมากสานกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เส้นใยดังกล่าวโดยทั่วไปจะใช้เส้นใยจากธรรมชาติจากพืช อาจมีการใช้เส้นใยจากสัตว์หรือจากแร่ก็ได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้เส้นใยสังเคราะห์ เช่นพวกพอลิอาไมด์ (polyamide) ซึ่งช่วยทดแทนการใช้เส้นใยจากธรรมชาติ และเพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรได้คุ้มค่าประกอบกับการลดต้นทุนของกระดาษ ได้มีการนำกระดาษใช้แล้วมาใช้ในการผลิตกระดาษอีกครั้งหนึ่ง เยื่อที่ได้จากกระดาษที่ใช้แล้วจะมีความขาวและความแข็งแรงต่ำลงเนื่องจากต้องผ่านขบวนการขจัดสิ่งที่ปนเปื้อนมาด้วย

เส้นใยจากพืชที่เป็นตัวหลักของกระดาษ ทำมาจากไม้เนื้ออ่อน เช่น ต้นสน ต้นยูคาลิปตัส ซึ่งมีเส้นใยยาวช่วยให้กระดาษมีความแข็งแรงและเหนียว และมีการนำไม้เนื้อแข็งจำพวก ต้นโอ๊ก ต้นเมเปิล มาใช้ทำเส้นใยซึ่งจะได้เส้นใยที่สั้นกว่าแต่ช่วยทำให้ผิวกระดาษเรียบและทึบแสงมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำพืชล้มลุก เช่นต้นกก ปอกระเจา อ้อย ฝ้าย มาใช้ทำเยื่อกระดาษด้วย

เส้นใยจะประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสมาเรียงต่อกันกับเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ซึ่งเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างโมเลกุลของกลูโคสและน้ำตาลอื่นๆ เช่น แมนโนส (mannose) ฟูโคส (fucose) ไซโลส (xylose) มาต่อกัน เส้นใยยังมีส่วนที่เป็นลิกนิน (lignin) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมเส้นใยให้อยู่ด้วยกัน ในขบวนการผลิตกระดาษลิกนินจะถูกขจัดออกจากเยื่อกระดาษ หากมีลิกนินหลงเหลืออยู่ในกระดาษ จะทำให้กระดาษเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. องค์ประกอบที่ไม่ใช่เส้นใย

องค์ประกอบที่ไม่ใช่เส้นใยจะเป็นสารเติมแต่งหรือแอดดิทีฟ (additives) ที่เติมเข้าไประหว่างการผลิตกระดาษเพื่อช่วยให้กระดาษที่ได้ออกมามีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการได้ดียิ่งขึ้น สารเติมแต่งมีมากมายแล้วแต่กรรมวิธีการผลิตของแต่ละโรงงาน แต่ที่ใช้กันมากมีดังนี้

- ฟิวเลอร์ (filler)ใช้เพื่อให้กระดาษมีความขาวขึ้นเรียบขึ้น ทึบแสงมากขึ้น รับหมึกดีขึ้น ตลอดจนลดการซึมผ่านของหมึกพิมพ์ สารที่ใช้เติมเข้าไปมี ปูนขาว ดินเหนียว ไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น สารเหล่านี้ยังช่วยทำให้น้ำหนักกระดาษมากขึ้นเป็นการลดต้นทุนในการใช้เยื่อกระดาษได้

- สารยึดติด (adhesive) เป็นสารที่ช่วยให้เส้นใยและส่วนผสมอื่นๆ ยึดติดกันได้ดีอีกทั้งช่วยให้ผิวหน้ายึดติดกับเนื้อกระดาษ สารยึดติดมีทั้งสารที่ทำมาจากธรรมชาติ เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมัน โปรตีนที่มีอยู่ในนม และสารที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น อาคริลิก (acrylic) สารจำพวกโพลิไวนิล (polyvinyl) เป็นต้น

- สารกันซึม (sizing agent) เป็นสารที่ใช้เติมลงในน้ำเยื่อเพื่อช่วยลดการซึมของของเหลวเข้าไปในเนื้อกระดาษ กระดาษที่ใช้ในการพิมพ์ด้วยระบบออฟเซ็ทจำเป็นต้องเติมสารประเภทนี้ สารกันซึมที่ใช้มีทั้งสารที่ทำจากธรรมชาติและสารที่สังเคราะห์ขึ้น

- สารเพิ่มความแข็งแรงของผิว (surface sizing) เป็นสารที่ถูกเคลือบบนผิวกระดาษในขั้นตอนการผลิตกระดาษที่เป็นแผ่นแล้ว เพื่อช่วยให้เส้นใยที่ผิวมีการยึดเกาะกับเส้นใยชั้นถัดลงไปได้ดีขึ้น ทำให้ผิวมีความแข็งแรงทนต่อการขูดขีด แรงดึง แรงกดทะลุ การถอนของผิว สารเพิ่มความแข็งแรงของผิวที่ใช้กันมากและราคาไม่สูงคือ แป้งอย่างละเอียด (starch)

2.1.3 สมบัติเชิงโครงสร้างของกระดาษ

สมบัติเชิงโครงสร้างของกระดาษ คือ ลักษณะทางโครงสร้างของกระดาษที่ปรากฏในกระดาษแต่ละชิ้น สมบัติเชิงโครงสร้างดังกล่าวที่สำคัญมีดังนี้

1. น้ำหนักพื้นฐาน (basis weight) หมายถึง น้ำหนักของกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยวัดจากกระดาษที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ การวัดมี 2 ระบบ คือ ระบบน้ำหนักพื้นฐานแบบอิมพีเรียล (imperila basis weight system) กับ ระบบน้ำหนักพื้นฐานแบบเมตริก (metric basis weight system) สำหรับประเทศไทย เราใช้ระบบหลัง คือ ระบบน้ำหนักพื้นฐานแบบเมตริก ซึ่งเป็นการกำหนดน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษเป็นกรัมต่อหนึ่งตารางเมตร (gm/m^2) หรือ เรียกว่า แกรมเมจ (grammage) ในการสื่อสารกันในวงการพิมพ์มักเรียกสั้นๆ ว่า กรัม หรือ แกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความหนา (caliper) หมายถึง ระยะห่างระหว่างผิวกระดาษด้านหนึ่งไปยังผิวกระดาษอีกด้านหนึ่งโดยวัดในแนวตั้งฉากกับผิวกระดาษและวัดในสภาวะและวิธีการตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ หน่วยวัดจะเป็นมิลลิเมตร ไมโครเมตร หรือเป็นนิ้ว สำหรับเมืองไทยนิยมใช้เป็นมิลลิเมตร สิ่งที่มีผลทำให้เกิดความหนาของกระดาษที่แตกต่างกัน คือ น้ำหนักพื้นฐานของกระดาษ เยื่อกระดาษที่นำมาใช้ กรรมวิธีในการทำและบดเยื่อ แรงกดของลูกกลิ้งในขบวนการรีดกระดาษระหว่างผลิต ดังนั้นน้ำหนักพื้นฐานของกระดาษที่เท่ากันก็อาจมีความหนาที่ไม่เท่ากันได้

3. ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของเส้นใยกระดาษ (formation) หมายถึง การเปรียบเทียบปริมาณของเส้นใยในบริเวณต่างๆ ของกระดาษว่ามีความเท่ากันหรือต่างกันอย่างไร กระดาษที่มีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของเส้นใยที่ดี จะทำให้กระดาษเรียบเสมอกันทั้งแผ่นและมีความหนาเท่าเทียมกัน เมื่อนำไปพิมพ์ก็จะได้ภาพพิมพ์ที่ดีไม่กระด่ำกระด่าง

4. แนวเส้นใย (grain direction) หมายถึง แนวการเรียงตัวของเส้นใยกระดาษ ถึงแม้ว่าเส้นใยของกระดาษจะวางตัวไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อดูภาพรวมจะพบว่าการเรียงตัวของเส้นใยส่วนใหญ่จะมีทิศทางไปในแนวเดียวกันและเป็นแนวเดียวกับการไหลของน้ำเยื่อและการเคลื่อนของตะแกรงในเครื่องผลิต ซึ่งเรียกแนวนี้ว่าแนวขนานเครื่อง ส่วนแนวที่ตั้งฉากกับแนวขนานเครื่องเรียกว่าแนวขวางเครื่อง จากการศึกษาเรื่องความชื้นกับเส้นใย พบว่าเมื่อความชื้นสูงขึ้น อัตราการขยายตัวด้านกว้างของเส้นใยจะสูงกว่าด้านยาวของเส้นใย ดังนั้นการขยายตัวของกระดาษด้านแนวขวางเครื่องจะสูงกว่าด้านขนานเครื่องเมื่อกระดาษพบกับความชื้นที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่โรงพิมพ์ต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้กระดาษให้ถูกแนวเพื่อลดปัญหาการพิมพ์สีเหลื่อม

5. ความสามารถในการคงขนาด (dimensional stability) หมายถึง ความสามารถของกระดาษในการรักษาขนาดทั้งด้านกว้าง ด้านยาว และความหนาให้คงเดิมเมื่อได้รับสภาพแวดล้อมที่ต่างไป เช่นได้รับความชื้นที่เพิ่มขึ้น ได้รับแรงกดทับ ความสามารถในภารคงขนาดที่ดีช่วยลดปัญหาในการพิมพ์ เช่น ลดปัญหาการพิมพ์สีเหลื่อม

6. ความพรุน (porosity) หมายถึง การเปรียบเทียบปริมาณและขนาดความลึกของหลุมบนกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ความพรุนมากช่วยทำให้อากาศและของเหลวซึมผ่านได้ง่าย ดังนั้นเมื่อกระดาษที่มีความพรุนสูงได้รับหมึกพิมพ์หมึกก็จะซึมลงในหลุม ทำให้หมึกแห้งตัวเร็วแต่ยังผลให้เนื้อสีที่คงเหลืออยู่บนผิวน้อย ภาพพิมพ์จึงดูซีดและไม่คมชัด

7. ความเรียบ (smoothness) หมายถึง ระดับความเรียบของผิวกระดาษเทียบกับความเรียบของผิวแก้ว ความเรียบของผิวกระดาษที่ดีทำให้การรับเม็ดหมึกได้ดีไม่กระจายตัวออก ทำให้เม็ดสกรีนคม ภาพพิมพ์จึงออกมาคมชัดมีแสงเงาที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การทำกระดาษ

วิธีการทำกระดาษได้ถูกบันทึกเป็นหลักฐานครั้งแรกของโลกเมื่อห้าพันปีที่แล้วโดยชาวอียิปต์ คิดทำกระดาษขึ้นจากต้นหญ้าที่เรียกว่า พาไพรัส (papyrus) ซึ่งมีถิ่นกำเนิดตามแถบลุ่มแม่น้ำไนล์ มีวิธีการทำง่ายๆ โดยเริ่มจากแกะส่วนนอกของต้นพาไพรัสออกให้เหลือแต่แกนกลาง (pirh) แล้วตัดให้เป็นแถบยาวบางๆ จากนั้นนำแถบเหล่านี้มาประสานกันแล้วกดให้เป็นแผ่น เทกาวผสมลงไปให้ติดกันแน่นขึ้น และทำให้แห้งก็พร้อมที่จะถูกนำไปใช้งานได้ วิธีการนี้ได้ใช้กันมาจนกระทั่งในปี พ.ศ. 648 ที่ประเทศจีน ขันทีผู้หนึ่งชื่อ ฉีลุน (Tssi Lun) นำเส้นใยที่ใช้ทอผ้ามาตัดให้สั้นแล้วผสมกับสารละลายพิเศษที่เขาเตรียมไว้ จากนั้นเทสารละลายผสมนี้ลงบนกรอบไม้ที่ขึงด้วยผ้าน้ำจะซึมผ่านผ้าลงเหลือแต่เส้นใยที่ประสานกัน ยกกรอบไม้นี้ไปผึ่งตากแดดให้แห้ง น้ำบางส่วนที่ค้างในเส้นใยจะระเหยออกไปจนกลายเป็นแผ่นกระดาษที่สามารถใช้งานได้ ต่อมาฉีลุนได้เปลี่ยนวิธีการใหม่ที่เรียกว่า laid technique โดยการจุ่มกรอบไม้ที่ขึงด้วยผ้านี้ลงในถังที่มีสารละลายผสมเส้นใยแล้วยกขึ้นนำไปตากให้แห้ง วิธีนี้จะทำให้ได้กระดาษที่มีคุณภาพดีกว่าแบบเดิม

ข้อควรรู้ในการทำกระดาษ

ไม่ว่าจะเป็นกระดาษประเภทใดก็ตาม ผู้ประกอบการและผู้ผลิตจะต้องมีความรู้ทั้งด้านการเลือกใช้วัตถุดิบในการทำกระดาษ (process desige) และการควบคุมกำหนดสภาวะในขั้นตอนต่างๆ ของการทำงานของเครื่อง (process design) พร้อมๆ กัน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการเลือกใช้วัตถุดิบในการทำกระดาษ ผู้ผลิตกระดาษจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านวิทยาศาสตร์ของเส้นใย (fiber science) อันได้แก่

1. องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ซึ่งมี 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1.1 เซลลูโลส (cellulose) เป็นสารคาร์โบไฮเดรต ประเภท polysaccharide มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กันของ β-D-glucopyranose ต่อกันเป็นพอลิเมอร์ มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ ตัวทำละลายสารอินทรีย์ทั่วไป และสารละลายด่าง สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กับกรดได้ และที่สำคัญคือโครงสร้างเป็นได้ทั้งเรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline) ยืดหยุ่น (stess-strain) และพองตัว (swelling) เป็นต้น

1.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่มีโครงสร้างส่วนใหญ่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นจึงดูดซึมน้ำได้ดี ซึ่งมีผลช่วยทำให้เส้นใยพองตัวได้รวดเร็ว ง่ายต่อการตีเยื่อ และยังช่วยทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนั้นยังสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารละลายด่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ลิกนิน (lignin) เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติก (aromatic) และมีกลุ่มฟังก์ชั่นต่างๆ รวมอยู่ด้วย เช่น methoxyl aliphatic และ phenolic hydroxyl เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นสารยึดติดให้เส้นใยในเนื้อไม้เกาะตีดกัน มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำหรือสารละลายอินทรีย์ทั่วไป แต่ละลายได้บางส่วนในสารละลายด่างหรือ oxidizing agent สามารถเกิดปฏิกิริยา condensation ได้กับสารละลายกรดเข้มข้น

2. ประเภทของเส้นใยที่มาจากไม้เนื้อแข็ง (hardwoods) และไม้เนื้ออ่อน (softwoods)

เส้นใยที่มาจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง จะมีความแตกต่างกันที่สัดส่วนปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีและขนาดของเส้นใย ซึ่งสามารถสรุปได้คร่าวๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีและขนาดของเส้นใยของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง

	ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง
เซลลูโลส	40-45	40-50
เฮมิเซลลูโลส	25-30	25–35
ลิกนิน	25- 35	20-25
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย	ใหญ่	เล็ก
ความยาวของเส้นใย	ยาว	สั้น

ที่มา : หนังสือ กระดาษทางการพิมพ์ จัดทำโดย นักศึกษาแผนกวิชาการพิมพ์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ (เจ็ดยอด) (2557)

3. โครงสร้างและคุณสมบัติของเส้นใย

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างตัดขวางภายในของเส้นใยไม้เนื้ออ่อน conifer tracheid แสดงให้เห็นส่วนต่างๆ ดังนี้

3.1 ชั้น middle lamella (ML) ประกอบด้วยลิกนินเป็นส่วนใหญ่ ผสมกับโปรตีน pectin ทำหน้าที่ยึดเส้นใยให้ติดกับเนื้อไม้

3.2 ผนังเซลล์ชั้นที่ 1 (primary wall, P) เป็นชั้นบางๆ ประกอบด้วยลิกนินเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับชั้น ML

3.3 ผนังเซลล์ชั้นที่ 2 (secondary wall) เป็นชั้นของกลุ่มเส้นใยเล็กๆ (mecrofibrils) ที่ประกอบด้วยสารเซลลูโลส (cellulose) ผนังชั้นที่ 2 นี้มีผนังเซลล์ย่อยๆ 3 ชั้นเรียงต่อกันตามลำดับดังนี้

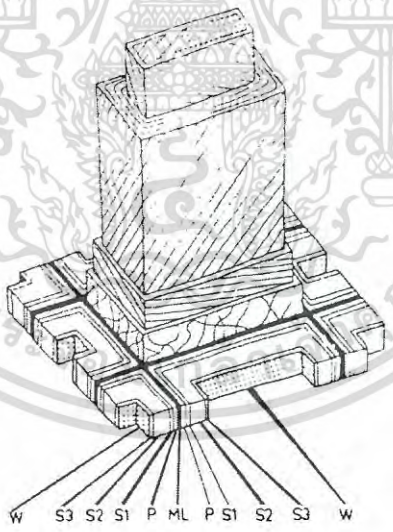
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 ชั้นนอก S1 ลักษณะบาง กลุ่มเส้นใยเล็กๆ จะม้วนพับซ้อนกันเป็นเกลียว (helix)

3.3.2 ชั้นกลาง S2 ลักษณะหนา กลุ่มเส้นใยเล็กๆ มักจะเรียงตัวขนานกันตามแนวเฉียงกับความยาวของเส้นใย (longitudinal fibre axis)

3.3.3 ชั้น S3 ลักษณะบาง และกลุ่มเส้นใยเล็กๆ มักจะซ้อนกัน เรียงตัวขนานกับกลุ่มเส้นใยเล็กๆ ในผนังชั้นนอก S1 มีข้อสังเกตในผนังด้านหนึ่งของชั้น S3 คือจะเห็นรอยนูนเป็นปุ่ม (wart)เกิดขึ้นทั้งด้านอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเข้าใจว่าเป็นส่วนที่เหลือของไซโตปลาสซึม (cytoplasm) จากเซลล์มีชีวิต ผนังด้านนี้สามารถแยกต่างหากเป็นอีกชั้นหนึ่งก็ได้

ผิวภายนอกของเยื่อกระดาษที่ดี ควรเป็นกลุ่มเส้นใยเล็กๆ ของผนังเซลล์ชั้นที่ 2 อาจเป็นชั้นย่อย S1 หรือ S2 ก็ได้ ขึ้นอยู่กับชั้นตอนการตีเยื่อ (beating) สารประกอบเส้นใยเซลลูโลสในกลุ่มเส้นใยเล็กๆ เหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเยื่อ ทำให้สามารถประสานกันเป็นแผ่นกระดาษได้ และยังช่วยทำให้เกิดคุณสมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) และมีความแข็งตึง (stiffness) ของแผ่นกระดาษด้วย



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างตัดขวางภายในของเส้นใยไม้เนื้ออ่อน conifer tracheid

ที่มา : หนังสือ กระดาษทางการพิมพ์ จัดทำโดย นักศึกษาแผนกวิชาการพิมพ์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ (เจ็ดยอด) (2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุดิบในการทำกระดาษ

วัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ คือ เซลลูโลสเป็นเส้นใยที่ได้มาจากพืชส่วนใหญ่จากต้นไม้ยืนต้นประเภทไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ ต้นสน ยูคาลิปตัส พืชชนิดอื่นๆ ได้แก่ ไผ่ ฝ้าย หญ้าไมยราพ ฟาง ข้าวต่างๆ กล่าวได้ว่าพืชทุกชนิดที่มีเส้นใยที่เหมาะสมกับการผลิตเท่านั้นและในปัจจุบันการใช้พืชในการผลิตอุตสาหกรรมกระดาษเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการทำลายป่า การขาดแคลนวัตถุดิบในการทำเยื่อ ทำให้ต้องมีการใช้เยื่อกระดาษอย่างระมัดระวัง มีการนำเศษวัสดุไม้จากอุตสาหกรรมอื่น หรือจากการเกษตรมาส่งเสริม รวมทั้งการนำกระดาษที่ใช้แล้วมาหมุนเวียนใช้ใหม่ เพื่อให้มีการใช้วัสดุอย่างคุ้มค่าและรักษาสิ่งแวดล้อมของโลก

2.1.5 ประโยชน์ของกระดาษ

กระดาษที่เรารู้จักกันนั้นมีมาตั้งแต่ยุคโบราณ ถูกคิดค้นขึ้นโดยชาวอียิปต์โบราณ สมัยนั้นวัสดุที่ใช้ผลิตกระดาษจะเป็นพืช (ชาวอียิปต์ใช้ต้นกกเป็นวัตถุดิบ) ประโยชน์จากกระดาษในสมัยโบราณส่วนมากจึงใช้ในการบันทึกเสียส่วนใหญ่ ส่วนในปัจจุบันกระดาษได้มีการพัฒนาขึ้นมามากกว่าเดิม มีทั้งใช้วัตถุดิบทั้งจากธรรมชาติ (ต้นไม้) และจากเยื่อสารเคมี ประโยชน์ของกระดาษในปัจจุบันจึงมีมากกว่าใช้ในการบันทึก ประโยชน์ของกระดาษในปัจจุบันสามารถแบ่งได้สองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1. ประโยชน์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลต่างๆ

เช่น เอกสารในสำนักงาน รูปภาพที่เขียนหรือวาดลงในกระดาษ เป็นต้น การบันทึกข้อมูลก็ทำได้โดยการพิมพ์จากเครื่องพิมพ์ต่างๆ การบันทึกโดยการเขียนลงในกระดาษ หรือโดยวิธีอื่นที่ต่างกันออกไป ส่วนมากวิธีที่ใช้บันทึกที่ต่างจากการพิมพ์หรือการเขียนจะเป็นงานศิลปะเพราะว่าเจ้าของผลงานอาจใช้วิธีไหนก็ได้ในการแต่งแต้มสีสันตามจินตนาการหรือความถนัด ส่วนกระดาษที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล เช่น กระดาษปรู๊ฟ (newsprint)เป็นกระดาษที่มีความแข็งแรงน้อยเหมาะสำหรับงานพิมพ์หนังสือพิมพ์ หรือเอกสารที่ไม่ต้องการคุณภาพมาก

รูปที่ 2.2 กระดาษปรู๊ฟ

ที่มา : http://promtpunpackaging.weebly.com/สืบค้นวันที่ 23 มีนาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระดาษอาร์ต (art paper) เป็นกระดาษที่ทำจากเยื่อเคมี เคลือบผิวด้านเดียวหรือสองด้าน เหมาะกับงานพิมพ์ที่ต้องการความสวยงามเป็นพิเศษ ตัวอย่างงานพิมพ์ที่ใช้กระดาษชนิดนี้ เช่น นิตยสาร โปสเตอร์ เป็นต้น

รูปที่ 2.3 กระดาษอาร์ต

ที่มา : http://www.qghservice.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard_show&WBntype=1&No=1386332 สืบค้นวันที่ 23 มีนาคม 2559

2. ประโยชน์ที่ใช้เพื่อใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ

กระดาษนอกจากจะใช้บันทึกข้อมูล ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งที่สำคัญ คือ การนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กล่องกระดาษสำหรับใส่สินค้า กระดาษทิชชู จานกระดาษ รองสันกำแพง ฐานรองปฏิทินตั้งโต๊ะ เป็นต้น กระดาษที่ใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระดาษกล่อง (box paper) เป็นกระดาษที่ทำจากเยื่อบด ใช้ทำสิ่งพิมพ์บรรจุภัณฑ์ เช่น กล่อง ป้ายแข็ง หรือจะเป็นกระดาษแข็ง (hard bord) เป็นกระดาษหลายชั้น แข็งหนา ทำจากเยื่อไม้บดและเยื่อกระดาษเก่า ใช้ทำฐานปฏิทินตั้งโต๊ะ ไส้ในของปกหนังสือ บรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

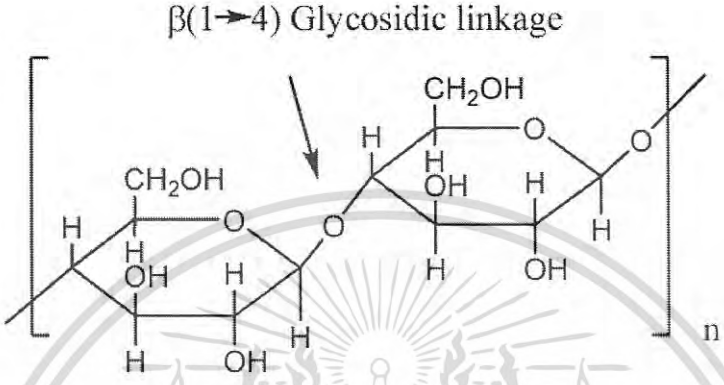
2.2 ลิกโนเซลลูโลส

อรุณี, (2555) ลิกโนเซลลูโลส หมายถึง ชีวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบมากในผนังเซลล์ของพืช ได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน เศษวัสดุจากการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และพวกฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากบ้านเรือน รวมถึงมูลสัตว์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์สายยาว และมีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตา (1,4) (β- (1,4) glucose linkage) ประมาณ 10,000 หน่วย พบโดยทั่วไปในธรรมชาติ โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังพืช และมีการเรียงตัวอยู่ในรูปของผลึก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส

ที่มา : http://biomolecule.myreadyweb.com/article/topic-42796.html

สืบค้นวันที่ 23 มีนาคม 2559

1. โครงสร้างของเซลลูโลส

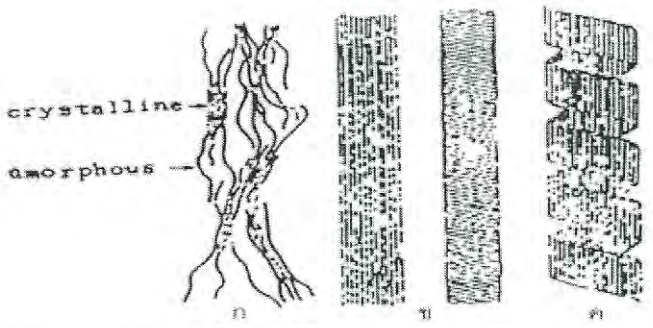
โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (D-glucose) ตั้งแต่ 15-40,000 หน่วย ต่อกันเป็นเส้นตรง (linear homopolymer) ด้วยพันธะเบต้า-ไกลโคซิดิกที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 และ 4 มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีชื่อทางเคมีว่า β-1,4-glucan มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 300,000-500,000 ดาลตัน (รัชนี, 2537) โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชมี 3 แบบ ดังนี้ (Norkrans, 1967)

1.1 fringe micelle ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous)

1.2 โครงสร้างของเซลลูโลสที่ม้วนหรือพับไปตามแกนของเส้นใยเซลลูโลส

1.3 โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบริบบิ้นและม้วนเป็นเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช

ที่มา : ศศิธร,(2553)

โครงสร้างที่แตกต่างกันถึง 3 แบบ และมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลโดยตลอดนี้จึงทำให้เซลลูโลสที่เกิดขึ้นในธรรมชาติไม่อยู่ในรูปบริสุทธิ์ ส่วนมากมักจับกับแป้ง เพ็กติน ลิกนินและ เฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีพวกพอลิแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส โปรตีน และแร่ธาตุอื่นๆบางชนิดในปริมาณน้อย

เซลลูโลสมีโครงสร้างเส้นใยเล็กๆ ที่เรียกว่า ไฟบริล (fibril) ซึ่งมีลักษณะเป็นมัดยาวรวมกันอยู่อย่างแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล การจัดเรียงตัวของโมเลกุลไฟบริลทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างหลายรูปแบบ โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของเซลลูโลสเกิดจากไฟบริล หรือโปรโตไฟบริลที่มีการเรียงตัวขนานและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นแผ่นบางๆ และเมื่อตัดขวางแผ่นบางๆ เหล่านี้ จะพบส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกที่มาจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวขนานกันไป โดยบางส่วนอาจเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งบริเวณนี้ทำให้เซลลูโลสสลายตัวและแยกออกจากกันได้โดยการเข้าทำปฏิกิริยาของของเหลว เช่น กรดแก่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดเป็นรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายโดยแรงกลเนื่องจากความไม่เป็นระเบียบและขีดจำกัดของความยืดหยุ่นของไมโครไฟบริล

2. สมบัติของเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นเส้นใยชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ไม่ละลายในด่าง และตัวทำละลายเป็นส่วนใหญ่ (Deveries & Reinhold, 1992) เซลลูโลสไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่สามารถดูดซับน้ำไว้ที่บริเวณผิวจึงเกิดการพองตัว เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสจับตัวหนาทึบเป็นเส้นหยาบ มีทั้งโมเลกุลที่เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันและสวนทางกัน ทำให้เส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งแรง ไม่เปราะง่าย แต่มีบางส่วนที่โมเลกุลเรียงตัวไม่เป็นระเบียบจับกันไม่แน่น ส่วนนี้เองที่สามารถดูดซับน้ำได้ จึงเกิดการพองตัว (ปาริชาติ, 2539) ซึ่งความสามารถในการพองตัวทั้งในน้ำและสารละลายจะแตกต่างกันไป โดยเมื่อเรียงลำดับตามความสามารถในการพองตัวของเซลลูโลสในสารละลาย โดยเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ได้ดังนี้ ตัวทำละลายอินทรีย์<น้ำ<เกลือ<กรด<ด่าง (Mark, 1985)

สมบัติของเซลลูโลสมักมีส่วนเกี่ยวข้องกับน้ำ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์โดยรวมเปลี่ยนแปลงไป เซลลูโลสที่มีลักษณะแห้งจะดูดความชื้น ทำให้เซลลูโลสสามารถพองตัวหรือหดตัวได้ แต่ในบางภาวะ เช่น เมื่อเซลลูโลสอยู่ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เซลลูโลสจะไม่เกิดการพองตัวเหมือนอยู่ในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ ความสามารถในการพองตัวของเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 9–21ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยการดูดน้ำหรือความชื้นจะเกิดจากท่อขนาดเล็กจำนวนมากที่อยู่ตามพื้นที่ผิวสัมผัสของเซลลูโลสและพื้นที่ทั้งหมดของวัสดุ โดยทั่วไปเซลลูโลสสามารถพองตัวได้ประมาณ 100 เท่า ของวัสดุแห้ง ซึ่งการพองตัวจะทำให้ตัวทำละลายต่างๆเข้าทำลายโครงสร้างได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือใช้หรือกากทางการเกษตร

วัสดุลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส(%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ลำต้นไม้เนื้อแข็ง	40-55	24-40	18-25
ลำต้นไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
แกนฝักข้าวโพด	45	35	15
หญ้า	25-40	35-50	10-30
กระดาษ	85-99	0	0-15
ฟางข้าวสาลี	30	50	15
ใบไม้	15-20	80-85	0
ใยเมล็ดฝ้าย	80-95	5-20	0
หญ้าคอสทอล เบอมิวดา	25	35.7	6.4
หญ้าสวิช	45	31.4	12.0

ที่มา : สุขใจ, (2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การย่อยสลายเซลลูโลส

ในธรรมชาติ การย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสเกิดโดยอาศัยการย่อยสลายจุลินทรีย์หลายชนิดรวมกันในสภาพที่มีออกซิเจน ผลที่ได้จากการย่อยสลายจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อิวมัส ความร้อน และจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์จะได้มาจากการย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสในสภาพที่เหมาะสม มีการระบายอากาศและอุณหภูมิที่เหมาะสม มีแหล่งอาหารเพียงพอกับการนำไปสร้างพลังงานเพื่อใช้ในระบบเมตาบอลิซึมและการเพิ่มจำนวนเซลล์ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน การย่อยสลายเซลลูโลสจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดเจน เอทานอล กรดฟอร์มิก กรดซัคซินิก กรดบิวทีริก และกรดแลคติก เป็นต้น นอกจากนี้การย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสยังสามารถทำได้โดยวิธีทางเคมี ซึ่งมีการย่อยสลายด้วยสารเคมี อาทิเช่น การใช้กรด การย่อยสลายวิธีนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่เฉพาะเจาะจง ดังนั้นน้ำตาลกลูโคสบางส่วนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับกรดต่อไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงชนิดอื่น และกรดยังทำปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นที่ติดมากับเซลลูโลส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ นอกจากนี้โครงสร้างในส่วนที่เป็นคริสตัลลีน ก็จำเป็นต้องใช้กรดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิสูงในการย่อยสลายจึงจะได้น้ำตาลกลูโคส ปฏิกิริยาย่อยจึงเกิดแบบรุนแรง ภาชนะที่ใช้ต้องทนทานต่อการกัดกร่อน ต้นทุนจึงสูงและกรดที่ถูกทิ้งออกมายังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย แต่วิธีนี้ปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 15-20 นาที

หรือโดยวิธีทางชีวภาพ อาทิเช่น การย่อยสลายด้วยเอนไซม์เซลลูเลส วิธีนี้เป็นวิธีที่เฉพาะเจาะจงระหว่างเอนไซม์เซลลูเลสกับสารประกอบเซลลูโลส โดยจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่ปนมา จึงทำให้ได้น้ำตาลกลูโคสซึ่งค่อนข้างบริสุทธิ์ ลักษณะการย่อยจะเกิดขึ้นช้าๆ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในที่มีอุณหภูมิซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถเจริญเติบโตได้ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็ไม่รุนแรง นอกจากนี้ก็อาจไม่จำเป็นต้องใช้ภาชนะที่ทนทานต่อการกัดกร่อน ต้นทุนจึงต่ำกว่า และยังไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม หากแต่วิธีนี้ น้ำตาลกลูโคสที่ได้อยู่ในรูปสารละลายเจือจาง (พรเทพ, 2538)

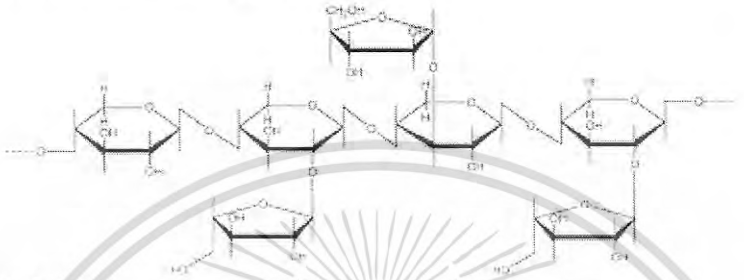
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ เป็นเฮทเทอร์โรโพลิเมอร์ของน้ำตาลชนิดต่างๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไซโลส และอะราบิโนส มีไซโลสมากที่สุดถึงร้อยละ 85–90 และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนน กาแลกแตน และอะราบิแนน (Bastawde และคณะ, 1992) มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย และมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยในพอลิเมอร์ไวแลน ดี-ไซโลสมีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 85-93 ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น กลูโคสกรดกลูคิวโรนิก กรดแมนนูโรนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

(mannuronic acid) กรดกาแลคตูโรนิก (galacturonic acid) จะพบปริมาณน้อย (Browing, 1963) โดยไซโลสที่พบจะเชื่อมด้วยพันธะเบตา 1,4 ไกลโคซิดิก (Browing, 1963; Bastawde และคณะ, 1992; Altıntas และคณะ, 2002) เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจาง หรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย สำหรับโครงสร้างทางเคมีของไซแลน แสดงในรูปที่ 2.6



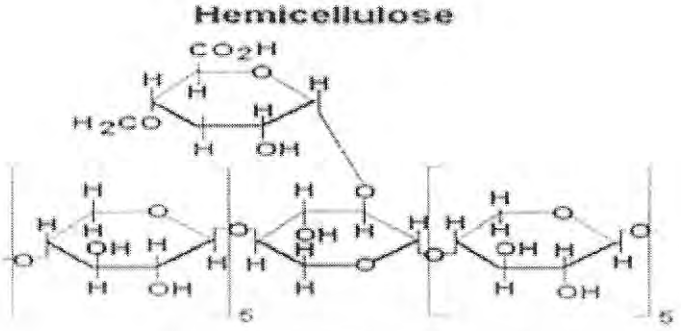
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน
ที่มา : Bastawde และคณะ(1992)

พืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่รวมกับเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรง และโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลส อะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนส และกาแลคโตส

องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1,4) และพบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ มักพบรวมอยู่กับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมทิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl-α-D-glucose) จับตัวอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกโดยง่ายด้วยสารละลายเบส แต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นอาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (delignifiction) ร่วมด้วย ส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุดและพบส่วนน้อยในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกย่อยสลายและสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
149258

เพกทิน ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเบส



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส

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

สืบค้นวันที่ 6 เมษายน 2559

1. ประโยชน์ของเฮมิเซลลูโลส

- ในรูป monomer สามารถแยกน้ำตาลโดยวิธี hydrolysis (hydrolysis คือ การสลายโดยใช้น้ำเป็นตัวย่อยสลาย ทำให้โมเลกุลของสารเปลี่ยนแปลงไป คุณสมบัติก็เปลี่ยนแปลงไป) เรียกวิธีนี้ว่า wood saccharification (การทำน้ำตาลจากเนื้อไม้) และวิธี คือ stream explosion ใช้ไอน้ำไปแยก ใช้ได้ดีและได้น้ำตาลมาก

- ในรูป polymer มีผลทำให้ผลผลิตเยื่อมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของเยื่อและกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างเป็น amorphous (อยู่รวมกันแบบหลวมๆ) น้ำจึงเข้าไปได้ง่าย เกิดการพองตัว ตัวเยื่ออุ้มน้ำได้ดี มีประโยชน์ในการตีเยื่อ คือ ทำให้ผิวของเส้นใยแตกออก เกิดการประสานตัวด้วย H-bond ทำให้เยื่อมีความแข็งแรงมากขึ้น

- เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาทางเคมีสังเคราะห์ ได้ food additive (สารแต่งเติมทำให้อาหารข้น), jelly agent (ใช้ในเครื่องสำอาง เป็นตัว absorbent), adhesive (ตัวเชื่อมประสาน) เป็นต้น

2. การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส จัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว สามารถละลายได้ในสารละลายด่างเจือจาง สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange) เมื่ออยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์

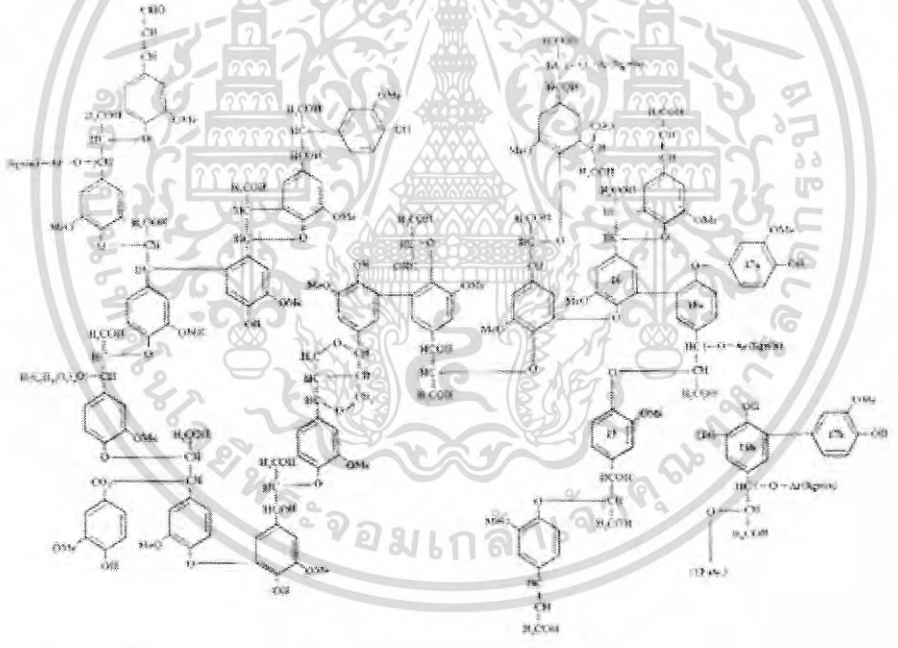
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ลิกนิน

เป็นสารประกอบที่มีมากรองจากเซลลูโลส ในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (softwood) จะมีลิกนินประมาณ 25-30% ส่วนในไม้ใบกว้าง (hardwood) มีลิกนินประมาณ 20-25% เป็นสารโพลิเมอร์ที่ซับซ้อนกว่าเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลสและเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ชนิดหนึ่ง พบใน ไม้ใบกว้าง (hardwood), ไม้ใบแคบ (softwood), พืชล้มลุก (grasses) และพืชชั้นต่ำทั่วๆ ไป แต่ไม่พบใน lichens, mosses, fungi, mushrooms ทำหน้าที่เป็น cell wall adhedsive ยึดเส้นใยที่อยู่รวมกันให้เป็นโครงสร้างของเนื้อไม้สามารถพบลิกนินใน ผล, บาสท์ (bast), pith, เปลือก(bark) เช่นกัน

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์ที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลส และพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเธอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์

1. โครงสร้างของลิกนิน



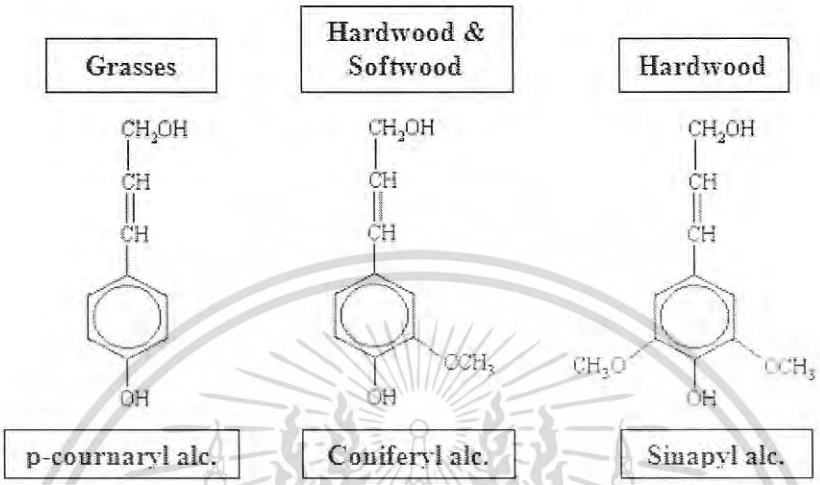
รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของลิกนิน

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

สืบค้นวันที่ 6 เมษายน 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากหน่วยที่เหมือนกันซ้ำๆ ประกอบเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรานอยด์ (phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมทิลอยู่บนโมเลกุล ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้า และไม้เนื้อแข็ง มีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (methoxy) และเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน



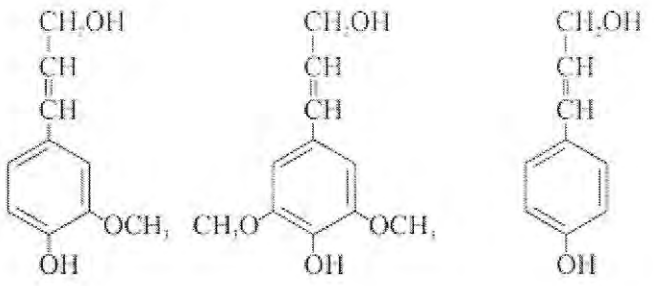
รูปที่ 2.9 โมโนเมอร์ของลิกนิน

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

สืบค้นวันที่ 6 เมษายน 2559

ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช พบในปริมาณที่แตกต่างไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลลินทรีย์ ลิกนินเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ไม่ตกผลึก (Cheng และคณะ, 2008) ประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ประกอบด้วย tran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohool และtrans-p-sinapyl alcohol (Eriksson และคณะ, 1990) นอกจากนี้โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่นอีกมากมาย เช่น vanillin และ syringaldehyde (Yudkin และ Offord, 1973) สูตรโครงสร้างของtran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohool และ trans-p-sinapyl alcohol แสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b) (c)

รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของ (a) trans-coniferyl alcohol, (b) trans-p-sinapyl alcohol และ (c) tran-pcoumaryl alcohol

ที่มา : Eriksson และคณะ, 1990

การที่ลิกนินอยู่รวมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างลิกนินที่อยู่รวมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้การใช้ประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมากขึ้น จึงต้องใช้การปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อน และป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนิน รวมทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป

2. สมบัติของลิกนิน

ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือ การละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง ขณะที่บางส่วนในกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไดออกเซน (dioxane) ไพริดีน (pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้ นอกจากนี้ เมื่อมีการเติมหมู่เมธิล (methylation) และหมู่อะซิติล (acetylation) แทนที่ตำแหน่งต่างๆบนวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตร้าไวโอเลตได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 280 นาโนเมตร ดังนั้น การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็เป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่โครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชนิดของลิกนิน

แบ่งตามโครงสร้างเป็น 4 ประเภท คือ

- G type (guaiacyl lignin) ประกอบด้วย coniferyl alc. พบในไม้ใบแคบที่ปกติ
- G-S type (guaiacyl-syringyl lignin) พบในไม้ใบกว้าง ทั้งปกติและไม่ปกติ ประกอบด้วย coniferyl alc. และ sinapyl alc.
- H-G-S type (4-hydroxylphenyl-guaiacyl-syringyl lignin) มี monomer ทั้ง 3 ชนิดอยู่รวมกัน
- H-G type (hydroxylphenyl-guaiacyl lignin) โดยมากพบในไม้ไม่ปกติ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น compression wood ประกอบด้วย coniferyl alc. และ p-cournaryl alc.

4. การย่อยสลายลิกนิน

การย่อยในทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์ ลิกนินเป็นสารที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ในร่างกายมนุษย์ และไม่มีสัตว์ชนิดใดใช้ประโยชน์ได้เลย ลิกนินทำให้การย่อยได้ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงด้วย ดังนั้นปริมาณลิกนินจึงมีความสำคัญต่อการประเมินคุณภาพของพืชอาหารสัตว์ที่ใช้สำหรับเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้อง ม้า และกระต่าย

ลิกนินสามารถดูดซับน้ำดี (bile acid) ได้ดี และอาจมีผลชะลอการดูดซึมสารอาหารบางชนิดในลำไส้เล็ก

5. ประโยชน์ของลิกนิน

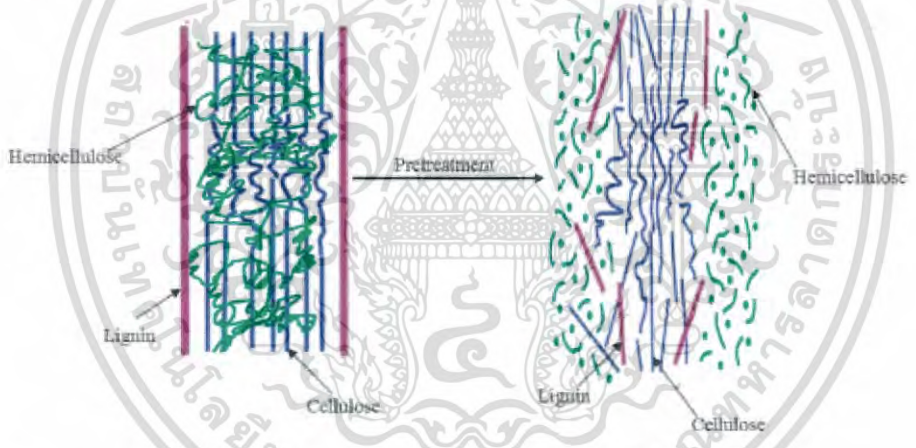
- ลิกนินที่ได้จากการต้มเยื่อกระดาษสามารถใช้เป็นเชื้อเพลงได้
- ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เมื่อนำมาสังเคราะห์จะได้สารอินทรีย์ เช่น วานิลลิน (vanillin), ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide = DMSO)
- ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักใช้ในรูปของแหล่งลิกนิกที่ได้มาโดยตรง เช่น ลิกนินซัลโฟเนตหรือคราฟลิกนิน และลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงใช้กันมากในอุตสาหกรรมการขุดเจาะน้ำมัน ทำสี ทำยาฆ่าแมลง ทำซีเมนต์ ทำยาง และอาจใช้เป็นตัวเพิ่ม (extenders) ในกาวฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการปรับสภาพ(Pretreatment process)

กระบวนการปรับสภาพ คือ การเปลี่ยนหรือการกำจัดโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ที่เป็นสิ่งกีดขวางต่อกระบวนการย่อยเซลลูโลส ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยดีขึ้น และผลได้ของน้ำตาลมีปริมาณเพิ่มขึ้น กระบวนการปรับสภาพมีหลายกระบวนการ ซึ่งแต่ละกระบวนการนั้นจะส่งผลต่อโครงสร้างของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสแตกต่างกัน ดังนั้นการปรับสภาพจึงถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการเปลี่ยนเซลลูโลส ให้เป็นน้ำตาล (ภูมิหทัย และประมุข, 2554)

การปรับสภาพวัตถุดิบมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดลิกนินซึ่งมีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจึงเป็นเหมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดรูพรุนของตัววัตถุดิบและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส (cellulose crystallinity) ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับใช้เอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลสเนื่องจากหากใช้เอนไซม์ในการย่อยเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนจะมีค่าใช้จ่ายสำหรับเอนไซม์ถึง 25% ของต้นทุนการผลิตเอทานอลทั้งหมด



รูปที่ 2.11 ผลของการปรับสภาพ (pretreatment) วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส
ที่มา : http://ucanr.edu/datastoreFiles/234-1388.pdf สืบค้นวันที่ 7 เมษายน 2559

โดยการปรับสภาพเบื้องต้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5วิธีดังนี้ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางฟิสิกส์ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมีและการปรับสภาพทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 กระบวนการปรับสภาพทางกายภาพ (Mechanical pretreatment) (อรุณี, 2555)

เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบ หรือคือการเพิ่มพื้นที่เพื่อให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ข้างในถูกย่อยสลายได้มากขึ้น โดยการหั่น การสับ การทุบ หรือการบดด้วยลูกบอลหรือลูกกลิ้ง จัดว่าเป็นวิธีการที่ให้ผลสำเร็จเป็นอย่างดีและมีต้นทุนต่ำ และยังช่วยลดปริมาณการใช้เอนไซม์ในการช่วยย่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้เปลี่ยนไปเป็นกลูแคนและไซแลนในขั้นตอนต่อไป

1. การบดด้วยแรงกล (mechanical comminution)

การบดวัสดุลิกโนเซลลูโลสโดยผ่านการตัด บด หรือโม่ ถูกใช้เพื่อลดส่วนที่เป็นผลึกของเซลลูโลส หลังจากการตัด วัสดุมีขนาด 10-30 มิลลิเมตร และหลังจากการบดหรือโม่ จะมีขนาด 0.2-2 มิลลิเมตร เครื่องบดแบบเขย่าให้ประสิทธิภาพในการลดโครงสร้างผลึกสูงกว่าเครื่องบดแบบธรรมดา ซึ่งช่วยปรับปรุงการไฮโดรไลซิส ขนาดของอนุภาคและลักษณะเฉพาะของชีวมวลทำให้รู้ถึงความต้องการของพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องมือที่ใช้บด

2.3.2 กระบวนการปรับสภาพทางฟิสิกส์ (Physical pretreatment) (อรุณี, 2555)

การเพิ่มอุณหภูมิ และการแผ่รังสี เป็นวิธีการทางกายภาพที่ประสบผลสำเร็จมากที่สุดวิธีหนึ่ง วิธีการที่เรียกว่า thermogravimeric pretreatment โดยเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1100 เคลวิน ภายใต้สภาวะทั้งที่มีก๊าซเฉื่อยและตัวออกซิแดนท์ สามารถทำให้เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินย่อยสลายได้ดี ส่วนวิธีการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน (pyrolysis) พวกเปลือกถั่วชนิดต่างๆ ฟางข้าว หรือขี้เลื้อย ที่อุณหภูมิ 600-1200 เคลวิน ให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพวกถ่าน ของเหลวและก๊าซมากกว่าวิธีธรรมดาทั่วไปร้อยละ 55

สำหรับการแผ่รังสีด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 700 วัตต์ ด้วยเวลานานต่างๆ กัน พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักของวัตถุดิบไปบ้าง เนื่องจากมีการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แต่ทำให้อัตราการย่อยสลายโดยใช้ด่างร่วมด้วยเพิ่มขึ้นมาก นอกจากนี้การใช้รังสีแกมมาขนาด 500 กิโลเกรย์ ทำให้โครงสร้างของฟางข้าวสาลีที่ป่นเป็นผงขนาด 140 เมช แตกตัวให้ผลผลิตน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.40

1. การแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis)

การแยกสลายด้วยความร้อนถูกใช้ในการเตรียมวัตถุดิบวัสดุลิกโนเซลลูโลส เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซและถ่านอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิต่ำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลายตัวจะช้ามาก ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนรูปเป็นสารระเหยได้น้อย เมื่อใช้กรดไฮโดรไลซิสด้วยสภาวะไม่รุนแรงหลังจากการปรับสภาพโดยการไพโรไลซิส พบว่าเปลี่ยนแปลงเซลลูโลสเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้ร้อยละ 80-85 ในจำนวนนั้นเป็นกลูโคสมากกว่าร้อยละ 50

2. การฉายรังสี (irradiation)

รังสี เช่น รังสีแกมมา ลำแสงอิเล็กตรอน และไมโครเวฟ สามารถปรับปรุงการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ของลิกโนเซลลูโลสได้ เมื่อใช้การฉายรังสีและวิธีอื่นรวมกัน เช่น การปรับสภาพด้วยกรดทำให้ประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เพิ่มมากขึ้น การปรับสภาพด้วยวิธีนี้ทำให้พันธะกลูโคไซด์ในสายเซลลูโลสเกิดการแตกออก แต่ไม่มีผลกับลิกนิน อย่างไรก็ตามวิธีการฉายรังสีมีราคาแพงและประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมได้ยาก

2.3.3 กระบวนการปรับสภาพทางเคมี-ฟิสิกส์ (Physicochemical pretreatment)

การรวมกันระหว่างวิธี chemical และ physical pretreatment มีส่วนสำคัญในการละลายน้ำของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ถูกเปลี่ยนโครงสร้างแล้ว เป็นผลทำให้การแตกตัวของเซลลูโลสในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น physicochemical pretreatment รวมกับ thermochemical pretreatment เช่น วิธี steam explosion, ammonia fibre explosion, CO_2 explosion, SO_2 explosion อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 160–200 องศาเซลเซียส กระทำภายใต้ความดัน 0.69–4.83 เมกะปาสกาล ที่มีไอน้ำอิ่มตัว เป็นเวลาหลายวินาที หรือ 2-3 นาที ก่อนที่จะปรับลดลงมาอยู่ที่ความดันปกติ วิธี wet oxidation pretreatment กระทำ ณ อุณหภูมิระหว่าง 200–210 องศาเซลเซียส และมีการเติมด่าง หรือ Na_2CO_3 ร่วมด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การละลายที่ดีขึ้นของสารพวกลิกโนเซลลูโลส และยังทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า (value–added product) โดยการใช้เอนไซม์ต่างๆ ให้ผลดีขึ้น ส่วนวิธี liquid hot water (LHW) ทำการปรับสภาพโดยการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 170–230 องศาเซลเซียส ความดัน 5 เมกะปาสกาล นานหลายนาที จึงปรับคืนสู่ความดันปกติ วิธีนี้ทำให้เฮมิเซลลูโลสในพวกชานอ้อย เส้นใยข้าวโพด และพวกฟางข้าวต่างๆ แตกตัวเป็นไซโลสได้ถึงร้อยละ 45–65 (อรุณี, 2555)

1. การระเบิดด้วยไอน้ำ (stream explosion) ชีวมวลที่ผ่านการหั่นและบดแล้วจะถูกปรับสภาพต่อด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสูง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยส่วนใหญ่จะควบคุมอุณหภูมิที่ 160-260 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.69-4.83 เมกะพาสคาล (MPa) ไว้ระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลงให้เหลือเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและการเปลี่ยนรูปลิกนิน เนื่องจากอุณหภูมิสูงและเป็นการเพิ่มศักยภาพในการย่อยเซลลูโลสด้วย ปัจจัยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีผลต่อการระเบิดด้วยไอน้ำ ได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ และขนาดของชิ้นชีวมวลข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้คือใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการบดด้วยเครื่องจักรเพียงอย่างเดียว มีความคุ้มค่าเมื่อใช้ในการปรับสภาพไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แต่มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ การทำลายส่วนประกอบของไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่พบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชและก่อให้เกิดสารองค์ประกอบที่อาจไปขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการต่อจากนี้

2. การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion, AFEX) การทำให้ชีวมวลสัมผัสกับแอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิและความดันสูงในระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยมีตัวแปร 4 ตัวสำคัญ ในการปรับสภาวะของกระบวนการนี้ให้มีประสิทธิผล ได้แก่ ภาระบรรทุกแอมโมเนีย ภาระบรรทุกน้ำ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปกระบวนการ AFEX จะใช้แอมโมเนียเหลวปริมาณ 1-2 กิโลกรัมแอมโมเนียต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้ง ที่อุณหภูมิ 60-120 องศาเซลเซียส และความดัน1.72-2.06 เมกะพาสคาล เป็นเวลา 30นาที กระบวนการนี้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้ปรับสภาพชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูง เช่น หนังสือพิมพ์ (มีลิกนิน 18-30%) เศษไม้ (มีลิกนิน 25-35%) นอกจากนี้พบว่ากระบวนการ AFEX มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการระเบิดด้วยไอน้ำ

3. การระเบิดด้วยไอน้ำโดยใช้กรดเป็นตัวเร่ง (acid-catalyzed steam explosion) กระบวนการนี้เป็นการปรับปรุงให้กระบวนการปรับสภาพมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และยังทำในสภาวะความรุนแรงปานกลาง พบว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่ง เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ร่วมกับการใช้ไอน้ำปรับสภาพ สามารถลดเวลาและอุณหภูมิ แต่ทำให้เกิดตัวยับยั้งขึ้น จุดประสงค์ของการใส่สารเคมีนี้คือ ปรับปรุงการเปลี่ยนเป็นน้ำตาลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่แตกตัว ในการทดลองอาจใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1-4 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 160-230 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที เป็นต้น ตัวอย่างการศึกษาโดยการปรับสภาพด้วยไอน้ำกับต้นหลิว มีการเติมกรดซัลฟิวริกหรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพื่อเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาล พบว่าผลได้กลูโคสสูงสุดร้อยละ 95 เมื่อปรับสภาพด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แต่ผลได้ของการเปลี่ยนเป็นน้ำตาลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่ำกว่าการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การใช้น้ำร้อน (liquid hot water, LHW) เป็นวิธีปรับสภาพแบบไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) โดยใช้น้ำภายใต้แรงดันสูงผ่านชีวมวล ทำให้เฮมิเซลลูโลสและบางส่วนของลิกนินถูกกำจัด ข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้องเติมสารเคมีและไม่ต้องใช้วัสดุที่ต้านทานการกัดกร่อนในกระบวนการปรับสภาพ ใช้สารเคมีปรับสภาวะให้เป็นกลางน้อย ในการละลายหลังจากการปรับสภาพ เมื่อเปรียบเทียบการปรับสภาพโดยใช้กรดเจือจาง เฮมิเซลลูโลสถูกละลายในสภาพสารละลายโอลิโกแซ็กคาไรด์ การใช้น้ำร้อนทำให้เซลลูโลสเกิดการขยายตัว เกิดพื้นที่ผิว และง่ายต่อการเข้าไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์

5. การย่อยเปียก (wet oxidation) วิธีการนี้ใช้ออกซิเจนและอากาศเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา นิยมใช้ถังหมักชีวภาพในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำภายใต้แรงดันและเวลาสั้น โดยทั่วไปจะใช้เวลา 10-15 นาที อุณหภูมิ 170-200 องศาเซลเซียส และความดันระหว่าง 10-12 บาร์ ของออกซิเจน (Ogbonna และคณะ, 2001) จากงานวิจัยของ Mishima และคณะ (2006) พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้ปริมาณเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น นิยมใช้ในการผลิตเอทานอลในขบวนการหมักแบบการย่อยให้เป็นน้ำตาลพร้อมการหมัก (simultaneous saccharification and fermentation, SSF)

6. การปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave pretreatment) วิธีการปรับสภาพโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟจัดเป็นวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมี เนื่องจากว่ามีการใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และส่วนที่ใช้สารเคมีเจือจางในการแช่วัสดุ การให้คลื่นไมโครเวฟจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ ใช้เวลาระหว่าง 5-20 นาที (Keshwani, 2009) จากการศึกษาเบื้องต้นของ เวสารัช และรัชพล (2555) และ Zhu และคณะ (2006) พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายด่างมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟมากกว่าสารละลายกรด

7. การปรับสภาพด้วยคลื่นความถี่สูงอัลตร้าซาวด์ (ultrasonic pretreatment) วิธีการปรับสภาพด้วยคลื่นความถี่สูงอัลตร้าซาวด์ยังมีรายงานเกี่ยวกับวิธีดังกล่าวน้อย แต่ผลที่ได้จากการใช้คลื่นความถี่สูงอัลตร้าซาวด์ พบว่าส่งผลให้เกิดการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ได้มากขึ้น จากงานวิจัยของ Yachmenev และคณะ (2009) พบว่าคลื่นความถี่สูงอัลตร้าซาวด์มีผลทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของวัสดุได้มากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย

8. การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 explosion) วิธีการนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากกรดคาร์บอนิกในการเพิ่มปฏิกิริยาย่อยสลายขั้นต่อไป นิยมใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมด้วย อาทิเช่น เอทานอล ช่วยในการกำจัดสารประเภทลิกนิน แต่วิธีการนี้ได้ผลผลิตต่ำกว่าการใช้ไอน้ำหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมโมเนีย แต่ไม่เกิดตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเหมือนวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Ragg and Fields, 1987)

ชนิดของสารละลายด่างเจือจางที่นิยมใช้กัน เช่น

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุด สามารถกำจัดลิกนินได้ดี เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสแก่ ซึ่งในบางครั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ได้กำจัดลิกนินออกไปเพียงอย่างเดียว แต่อาจทำลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วนออกไปด้วย ดังนั้นการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับพืชชนิดนั้นๆ ผลผลิตที่ได้จึงจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Wang และคณะ, 2010)

2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ไม่น้อยไปกว่า NaOH แต่เนื่องจากแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสอ่อน จึงต้องใช้เวลาในการกำจัดลิกนินนานกว่าเล็กน้อย แต่ปัญหาที่พบจากการใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ คือ การกำจัดลิกนินออกไม่หมด และอาจมีกลิ่นของแก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายลิกนิน (Gupta และ Lee, 2010)

3. โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เป็นสารเคมีที่นิยมน้อยที่สุด แต่เป็นสารที่กำจัดลิกนินได้ดีที่สุด โดยที่โซเดียมซัลไฟด์จะมีความจำเพาะเจาะจงกับลิกนินเท่านั้น โดยจะไม่มีผลต่อเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส เหตุผลที่นิยมใช้โซเดียมซัลไฟด์ค่อนข้างน้อย เนื่องจากกลิ่นของแก๊สไข่เน่าที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายลิกนิน แต่อย่างไรก็ตามโซเดียมซัลไฟด์ยังคงใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องกำจัดลิกนินออกเท่านั้น เช่น อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในหลายบริษัท เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้สารเคมีดังกล่าวข้างต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพืชแต่ละชนิดที่นำมาใช้ โดยปัจจัยในการเลือกใช้สารเคมีอาจจะเลือกจากความแข็งของเนื้อไม้และคุณภาพในการแยกลิกนิน ดังนั้นกระบวนการปรับสภาพตัวอย่าง จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการผลิตเซลลูโลซิกเอทานอล ทั้งในด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ (ชัชนันท์ และเฉลิม, 2555)

2.3.4 กระบวนการปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment)

สารเคมีตั้งแต่พวกออกซิไดซิ่งเอเจนท์ (oxidizing agent) พวกกรดต่างๆ ไปจนกระทั่งถึงด่างหรือเกลือสามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ และสามารถทำภายใต้ความดันและอุณภูมิปกติได้ ตัวอย่างเช่น

1. ด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์, แอมโมเนีย (NH_3), แอมโมเนียมซัลเฟต [$(NH_4)_2SO_4$]

การปรับสภาพด้วยด่าง (alkaline hydrolysis) โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาวเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการปรับสภาพด้วยด่าง ซึ่งด่างเหล่านี้สามารถแตกโครงสร้างของลิกนินและลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดผลึกของเซลลูโลส การปรับสภาพด้วยด่างเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการปรับสภาพด้วยกรด นันทิกา และคณะ (2554) รายงานว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้ปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง นอกจากนี้ Chen และคณะ (2012) พบว่า 70% ของเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดภายใน 4 สัปดาห์ ภายใต้การปรับสภาพด้วยด่างที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และการใช้เอนไซม์ชนิดผสมหลังจากการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยด่างแล้ว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายชีวมวลได้อย่างมีนัยสำคัญ

2. กรด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก, กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

การปรับสภาพด้วยกรด (acid hydrolysis) กรดที่นิยมใช้ได้แก่ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเดิมเคยใช้กรดเข้มข้นในการย่อยลิกโนเซลลูโลส แต่เนื่องจากกรดเข้มข้นเหล่านี้มีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องใช้ถังปฏิกิริยาที่ทนทานต่อการกัดกร่อน และมีค่าใช้จ่ายในการคืนสภาพของกรดนั้นสูงมาก ดังนั้นจึงใช้การเจือจางกรดในการปรับสภาพ และพบว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ การปรับสภาพด้วยการเจือจางกรดแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ การเจือจางกรดที่อุณหภูมิสูง (>160 องศาเซลเซียส) และการเจือจางกรดที่อุณหภูมิต่ำ (<160 องศาเซลเซียส) Jung และคณะ (2013) ได้ศึกษาการปรับสภาพทลายปาล์มเปล่าด้วยวิธีการเจือจางกรด พบว่าวิธีการนี้มีประสิทธิผลมาก โดยใช้กรดซัลฟิวริก 1 % (w/v) ทำปฏิกิริยาภายในเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ190 องศาเซลเซียส และทำการย่อยในไมโครเวฟ ถึงแม้ว่าการปรับสภาพด้วยกรดจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องค่าใช้จ่ายพบว่ามีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี นอกจากนี้จำเป็นต้องปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนหลังจากทำการปรับสภาพ เพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป

3. แก๊ส ได้แก่ คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2), ไนโตรเจนออกไซด์ (N_2O_3), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

4. ออกซิไดซิ่งเอเจนท์ ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), โอโซน (O_3)

การปรับสภาพด้วยโอโซน (ozonolysis) โอโซนสามารถย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสได้เช่น ฟางข้าวสาลีชานอ้อย หญ้า พืชถั่ว ไม้สน ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่ดี สามารถละลายน้ำได้ สามารถเข้าไปแตกโครงสร้างของลิกนินและปลดปล่อยสารประกอบที่ละลายน้ำได้และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย เช่น กรดอะซิติก กรดฟลอมิก ประสิทธิภาพการย่อยสลายชีวมวลด้วยเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยโอโซน ข้อดีของการปรับสภาพด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินไม่ผลิตสารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป และปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันห้อง อย่างไรก็ตาม ต้องใช้โอโซนปริมาณมากในกระบวนการปรับสภาพ ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง

5. ตัวทำละลายที่ใช้สกัดลิกนิน ได้แก่ เอทานอล-น้ำ, เบนซีน-น้ำ, เอทาลีนไกลคอล, บิวทานอล-น้ำ (อรุณี, 2555)

การปรับสภาพด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ในกระบวนการนี้ใช้ลิกโนเซลลูโลสผสมรวมกับตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) และน้ำ แล้วให้ความร้อนเพื่อละลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกจากเซลลูโลส อาจมีการเติมสารตัวเร่งเพิ่ม หรือลดอุณหภูมิลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินในกระบวนการปรับสภาพ โดยวิธีนี้ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งหรือไม่ใช้ก็ได้ ตัวอย่างเช่น กรดออกซาลิก (oxalic acid) กรดซาลิไซลิก (salicylic acid) และกรดแอซีทิลซาลิซาลิก (acetylsalicylic acid) ตัวทำละลายอินทรีย์ตัวอย่างเช่น แอลกอฮอล์, เอสเทอร์, คีโตน, ไกลคอล, กรดอินทรีย์, ฟีนอลและอีเทอร์ การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่หลังจากเสร็จสิ้น เช่น การระเหย และการกลั่น เป็นการลดต้นทุนของการปรับสภาพ วิธีนี้มีข้อเสียคือ หากมีตัวทำละลายอินทรีย์เหลืออยู่ในเซลลูโลสที่นำไปใช้ในการหมัก จะทำให้การทำงานของเอนไซม์และการหมักถูกยับยั้ง

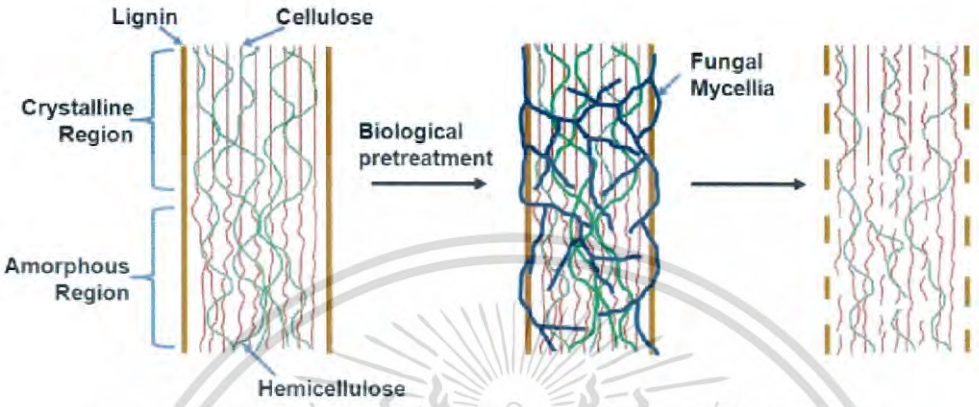
โดยเฮมิเซลลูโลสจะสามารถย่อยในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลส หรืออาจใช้สารละลายเบสเพื่อเพิ่มปริมารการละลายของเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (ชัชนันท์และเฉลิม, 2555)

2.3.5 กระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

เป็นการปรับสภาพที่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรา รวมทั้งเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลชีพเหล่านี้ (อรุณี 2555) เป็นการใช้เอนไซม์เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างที่ซับซ้อนของเซลลูโลสให้อยู่ในรูปโซ่ตรง และช่วยลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส (ชัชนันท์ และเฉลิม, 2555) เชื้อราทั้งชนิดที่เป็น white–rot, brown–rod และชนิดที่เป็น soft–rot สามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ โดย brown–rod มีบทบาทสำคัญในการย่อยพวกเซลลูโลส ในขณะที่ white–rot และ soft–rot จะเข้าย่อยสลายพวกลิกนินและเฮมิเซลลูโลส จากการทดลองเมื่อไม่นานมานี้ เมื่อนำลิกโนเซลลูโลสมาหมักกับเชื้อราเหล่านี้ที่อุณหภูมิ 25–35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-22 วัน พบว่า โฮโลเซลลูโลสและลิกนินถูกย่อยสลายไปได้มากถึงร้อยละ 45–75 และร้อยละ 65–80 ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่า ชีวมวลที่ปรับสภาพด้วยวิธีนี้ยังให้ก๊าซชีวภาพมากกว่าเมื่อนำไปปรับสภาพต่อด้วยระบบ anaerobic digestion เชื้อราและแบคทีเรียเหล่านี้ ได้แก่ *Aspergillus terreus*,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Trichoderma spp., *Cyathus stercoreus*, *Penicillium camemberti*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Streptomyces griseus*ฯลฯ เป็นต้น ส่วนเอนไซม์ที่ใช้ย่อยลิกโนเซลลูโลส ตัวอย่างเช่น cellulose, glucuronidase, acetylesterase, feruloylesterase, xylanase, β-xylosidase, lignin peroxidase, manganese peroxidase และ laccase เป็นต้น



รูปที่ 2.12 แผนภาพของการปรับสภาพทางชีวภาพของลิกโนเซลลูโลส เชื้อราชนิดที่เป็นสีขาวลดปริมาณลิกนิน และปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของลิกโนเซลลูโลส ทำให้การย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ที่มา : https://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_06/BioRes_06_4_5224_Isroi_MSNCLT_Biolog_Pretreat_Ligno_WRF_Review_1754.pdf สืบค้นวันที่ 7 เมษายน 2559

การปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการกำจัดลิกนิน แต่ให้ประสิทธิภาพต่ำ โดยทำให้คาร์โบไฮเดรตเกิดการสูญเสีย และใช้เวลานาน การปรับสภาพด้วยวิธีนี้ใช้จุลินทรีย์ในการย่อยลิกโนเซลลูโลส โดยใช้การทำงานของเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพในการสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส แต่พบว่าเซลลูโลสเกิดการสูญเสียน้อยมาก เนื่องจากเซลลูโลสมีความต้านทานการทำลายจากเชื้อจุลินทรีย์มากกว่าส่วนอื่น

กระบวนการปรับสภาพสำหรับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส ถือว่าเป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่สำคัญต่อการใช้ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นการทำลายโครงสร้างที่แข็งของลิกโนเซลลูโลส ส่งผลให้เอนไซม์หรือจุลินทรีย์สามารถเข้าถึงและย่อยวัสดุได้มากขึ้น โดยเฉพาะในขั้นตอนการย่อย (hydrolysis) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลในรูปแบบของน้ำตาลรีดิวส์ (reducing sugar) จากตารางที่ 2.3 จะแสดงให้เห็นว่า จุดเด่นและจุดด้อยของเทคนิคการปรับสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแต่ละเทคนิคส่งผลให้กระบวนการผลิตเอทานอลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส และการประยุกต์ใช้ในการผลิตเอทานอลอยู่มาก ซึ่งใช้กระบวนการปรับสภาพที่แตกต่างกันโดยแต่ละกระบวนการจะส่งผลต่อองค์ประกอบของวัสดุเหล่านี้แตกต่างกันออกไป (ตารางที่ 2.4) ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุเหล่านี้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลจำเป็นต้องทำการศึกษาและคัดเลือกกระบวนการการปรับสภาพที่เหมาะสมจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตอย่างมาก อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ ซึ่งส่งผลดีต่อการกำจัดวัสดุเหล่านี้ออกจากสิ่งแวดล้อม ทำให้สภาพแวดล้อมไม่เป็นพิษอันเนื่องมาจากการเสื่อมสลายของวัสดุเหล่านี้

ตารางที่ 2.3 จุดเด่นและจุดด้อยของกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน

การปรับสภาพ	จุดเด่น	จุดด้อย
ทางชีวภาพ	- ย่อยสลายลิกลิน และเฮมิเซลลูโลส - ใช้พลังงานต่ำ	- มีอัตราการย่อยสลายช้า
การบด การโม่	- ลดขนาดของเซลลูโลส	- ใช้พลังงานและพลังงานสูง
การระเบิดด้วยไอน้ำ	- มีผลทำให้ลิกนินเปลี่ยนรูป และย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้ดี - คุ้มค่าการลงทุน - ให้ผลผลิตของน้ำตาลกลูโคส และเฮมิเซลลูโลสสูง	- มีองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษเจือปน
AFEX	- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย - เกิดตัวยับยั้งในขั้นตอนการย่อยน้อย	- ไม่เหมาะสมกับวัสดุที่มีปริมาณลิกนินสูง - การลงทุนสูง
การระเบิดด้วย CO_2	- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย - มีองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษเจือปนน้อย	- ไม่มีผลต่อลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส - ระบบต้องใช้แรงดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 จุดเด่นและจุดด้อยของกระบวนการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน (ต่อ)

การปรับสภาพ	จุดเด่น	จุดด้อย
การย่อยเปียก	- มีประสิทธิภาพในการแยกลิกนิน - มีองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษเจือปนน้อย - ใช้พลังงานต่ำ	- มีค่าใช้จ่ายสูงในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา
ปฏิกิริยาโอโซน	- ลดปริมาณลิกนิน - ไม่ก่อให้เกิดองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษ	- มีค่าใช้จ่ายสูง
สารละลายอินทรีย์	- ส่งผลต่อการย่อยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส	- การลงทุนสูง - การใช้สารละลายอินทรีย์ต้องมีการดูแลและจัดการที่ดี
กรดความเข้มข้นสูง	- ให้ผลผลิตกลูโคสสูง - เกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ	- ค่าใช้จ่ายสูง และการจัดการต้องอยู่ภายใต้การควบคุม - เกิดสารพิษเจือปนสูง
กรดเจือจาง	- ลดปัญหาการกัดกร่อนเมื่อเปรียบเทียบกับกรดความเข้มข้นสูง - เกิดองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษต่ำ	- ผลผลิตค่อนข้างหลากหลาย - ให้ผลผลิตน้ำตาลต่ำ

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Alvira และคณะ (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของกระบวนการปรับสภาพต่อองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

	การบด	การระเบิดด้วยไอน้ำ	ความร้อนชื้น	กรด	ด่าง	สารออกซิแดนส์	AFEX	การระเบิดด้วย CO_2
- เพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
- การย่อยสลายผลึกเซลลูโลส	สูง	-	n.d.	-	-	n.d.	สูง	-
- การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส	-	สูง	สูง	สูง	ต่ำ	-	ปานกลาง	สูง
- การแยกลิกนิน	-	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	-
- เกิดองค์ประกอบของสารอื่นที่เป็นพิษเจือปน	-	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	-
- เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนิน	-	สูง	ปานกลาง	สูง	สูง	สูง	สูง	-

n.d. ไม่ปรากฏข้อมูล

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Alvira และคณะ (2010)

2.4 กระบวนการการไฮโดรไลซ์ (Hydrolysis process)

การไฮโดรไลซ์ คือ การย่อยสลายเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของน้ำตาลคาร์บอน 5 และ6 อะตอม จะได้น้ำตาลไซโลส แมนโนส อะราบิโนส และกลูโคส ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Bosch และคณะ, 2010) ซึ่งการไฮโดรไลซ์จะทำให้สายพอลิเมอร์ทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำให้สั้นลงกลายเป็นน้ำตาลอิสระ ซึ่งในการไฮโดรไลซ์มี 2 กระบวนการหลักๆ ได้แก่ การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ และการไฮโดรไลซ์ทางเคมี (ชัชนันท์ และ เฉลิม, 2555)

2.4.1 การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์

วัสดุเซลลูโลสตามธรรมชาติส่วนใหญ่เกิดการสลายตัวจากการย่อยของเอนไซม์เซลลูโลส (cellulose) ซึ่งพบทั่วไปในจุลินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบมากในรา เอนไซม์เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่สิ่งมีชีวิตสร้างขึ้นเพื่อทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาภายในเซลล์ เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงในสภาวะการทำงานที่เหมาะสมจะสามารถเร่งปฏิกิริยาได้เร็วถึง 108–1011 เท่า เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง นอกจากนี้เอนไซม์ยังมีความจำเพาะ(specificity) ต่อปฏิกิริยาหนึ่งๆ เท่านั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง แม้ว่าเอนไซม์จะถูกสร้างอยู่ภายในเซลล์ แต่สามารถสกัดออกมาใช้งานได้เช่นเดียวกับเมื่ออยู่ในเซลล์(ชัชนันท์ และเฉลิม, 2555)

การไฮโดรไลซ์วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เป็นกระบวนการที่ช้ามาก เพราะการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสจะถูกขัดขวางโดยโครงสร้างของซับสเตรทเอง เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส พื้นที่ผิว และความเป็นผลึกของเซลลูโลส เอนไซม์ทำงานได้ดีขึ้นเมื่อลิกโนเซลลูโลสได้รับการปรับสภาพ ต้นทุนความเสื่อมสภาพของเครื่องมือในการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กรด เพราะการใช้เอนไซม์ในสภาวะที่ไม่รุนแรง (pH 4.8 อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส) ไม่มีปัญหาการกัดกร่อน และผลได้ของน้ำตาลดีกว่าการใช้กรด ในปัจจุบันมีการลดต้นทุนโดยการนำเทคโนโลยีชีวภาพเข้ามาช่วย

2.4.2 การไฮโดรไลซ์ทางเคมี

เป็นวิธีทั่วไป กรดทุกชนิดสามารถนำมาใช้ได้ แต่กรดที่ใช้ทั่วๆ ไป ได้แก่ กรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถัน เพราะมีราคาถูก กระบวนการไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดเจือจาง และกระบวนการไฮโดรไลซ์โดยใช้โดยกรดเข้มข้น (ชัชนันท์ และเฉลิม, 2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการไฮโดรไลซ์โดยใช้กรด

จากการศึกษาพบว่า การใช้กรดไฮโดรไลซ์ลิกโนเซลลูโลส ทำให้เกิดไซโลส, เซลลูโลส และลิกนินที่แตกออก การใช้กรดไฮโดรไลซ์ชานอ้อยจะทำให้ไซโลสเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วไปเป็นเฟอร์ฟูรอล และผลิตภัณฑ์อื่นๆ การสลายตัวนี้ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น 5-ไฮดรอกซีเมทิล-เฟอร์ฟูรอล (HMF)แอซีเทต การใช้กรดเป็นตัวเร่งการไฮโดรไลซ์เป็นปฏิกิริยาที่มีหลายแบบ โดยกลไกของการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสคือการไปตัดพันธะเบต้า 1,4 ไกลโคซิดิก (β-1,4 glycosidic) เกิดเป็นโมโนแซ็กคาไรด์ ซึ่งมีทั้งการใช้กรดเจือจางและกรดเข้มข้น

1. การไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดเจือจาง(dilute acid hydrolysis)

ผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางจะมีปริมาณน้อย แต่มีการเพิ่มอุณหภูมิและความดัน สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายให้ได้ปริมาณกลูโคสที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มความเข้มข้นของกรดสามารถเพิ่มผลผลิตของน้ำตาลให้สูงขึ้นได้ แต่ควรคำนึงถึงจุดที่เหมาะสมที่สุดของความเข้มข้นกรดที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย (อังคณา, 2552)

กระบวนการนี้ทำให้เฮมิเซลลูโลสแตกออกที่อุณหภูมิต่ำกว่าเซลลูโลส ซึ่งการทำงานจะมี 2 ขั้น ที่แตกต่างกันระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ขั้นแรกใช้อุณหภูมิต่ำเพิ่มผลได้น้ำตาล 5 คาร์บอน จากเฮมิเซลลูโลส ขั้นที่ 2 ใช้อุณหภูมิสูงกว่าเพื่อไฮโดรไลซ์เซลลูโลสภายใต้สภาวะที่รุนแรงเพื่อให้ได้น้ำตาล 6 คาร์บอน ข้อดีของกระบวนการนี้คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วมาก แต่มีข้อเสียคือผลได้ของน้ำตาลต่ำ

2. การไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดเข้มข้น(concentrated acid hydrolysis)

โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในธรรมชาติจะถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 70 แต่วิธีการนี้ทำได้ยากในทางการค้าเพราะกรดซัลฟิวริกเข้มข้นมีราคาสูง และจำเป็นต้องมีขั้นตอนของการหมุนเวียนการใช้งาน (อังคณา, 2552) แต่การไฮโดรไลซ์โดยใช้กรดเข้มข้นมีข้อดีคือ มีศักยภาพในการผลิตน้ำตาลได้สูง โดยได้น้ำตาลจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 90 นอกจากนี้กรดที่ใช้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลังจากการย่อยสลาย โดยการระเหยซ้ำหลายๆ ครั้ง

กระบวนการนี้ทำให้เซลลูโลสถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคสอย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว เฮมิเซลลูโลสเปลี่ยนเป็นน้ำตาล 5 คาร์บอน และสลายไปเล็กน้อย ตัวแปรสำคัญของวิธีนี้คือปริมาณน้ำตาลที่เปลี่ยนแปลงในรูปสารละลายและกรดที่นำกลับมาใช้ใหม่ วิธีนี้ใช้อุณหภูมิและความดันไม่สูง เวลาทำปฏิกิริยานานกว่าการใช้กรดเจือจาง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละ 70 อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส เวลา 2-4 ชั่วโมง การใช้อุณหภูมิและความดันต่ำทำให้น้ำตาลสลายน้อย แล้วนำน้ำตาลหลังจากการไฮโดรไลซ์ในขั้นตอนแรกออก เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปของน้ำตาล ขั้นตอนต่อไปคือการทำให้เซลลูโลสแตกออก โดยนำส่วนที่เหลือจากขั้นตอนแรก ดึงน้ำออก และเติมกรดซัลฟิวริกร้อยละ 30-40 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 50 นาที เพื่อเป็นการไฮโดรไลซ์เซลลูโลส ข้อดีสำหรับวิธีนี้คือได้น้ำตาลสูง แต่มีข้อเสียคือยากในการทำงานและการนำกรดกลับมาใช้ใหม่

กระบวนการไฮโดรไลซ์โดยใช้ด่าง (สุขใจ, 2554)

การไฮโดรไลซ์ด้วยด่าง สามารถไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสและลดระดับลิกนินได้เซลลูโลสที่เอนไซม์สามารถไฮโดรไลซ์ได้ง่าย กลไกของการไฮโดรไลซ์ด้วยด่างคือ การเกิดปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน (saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของไซแลน เฮมิเซลลูโลส และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ทำให้ช่องว่างของลิกนินในเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางเพื่อไฮโดรไลซ์ลิกโนเซลลูโลส ทำให้เกิดการบวมน้ำ นำไปสู่การเพิ่มพื้นที่ผิวภายใน ลดระดับการเกิดพอลิเมอร์ ลดความสามารถของการสร้างผลึก มีการแยกโครงสร้างที่เชื่อมกันระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต และทำลายโครงสร้างลิกนิน วิธีนี้ใช้ได้ดีในฟางข้าวและชานอ้อย โดยใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กรด แต่ใช้เวลานานกว่า

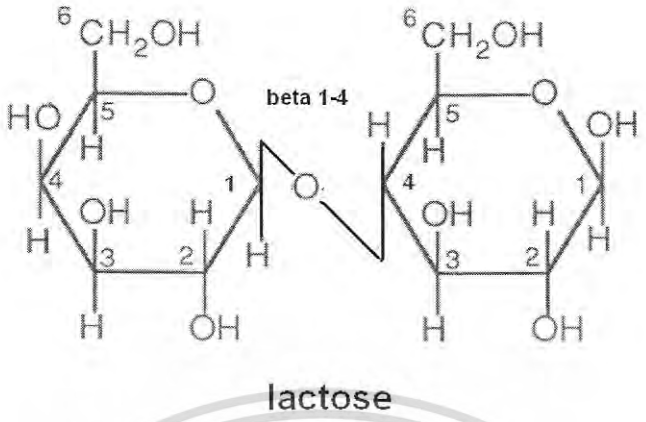
2.5 น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) (ยุทธนา, 2556)

น้ำตาลรีดิวซ์ คือ โมโนแซคคาไรด์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนที่ตำแหน่งแอนเอเมอร์ ซึ่งถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากโครงสร้างของโมโนแซคคาไรด์เป็นแบบอัลโดสและคีโตส หรือเป็นโครงสร้างแบบวง จึงมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปสายยาวและรูปวงแหวนอยู่ตลอดเวลา โมโนแซคคาไรด์เหล่านี้จึงสามารถแสดงสมบัติของแอลดีไฮด์และคีโตนได้ ซึ่งเมื่อถูกออกซิไดซ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรด เช่น เมื่อออกซิไดซ์กลูโคสจะได้กรดแอลโดนิก ซึ่งมีชื่อว่ากรดกลูโคนิก ดังนั้นน้ำตาลที่เนื่องจากอโนเมอริกคาร์บอนไม่ได้อยู่ในรูปไกลโคไซด์จึงเรียกว่า น้ำตาลรีดิวซ์ ตัวอย่างเช่น น้ำตาลกลูโคส

น้ำตาลรีดิวซ์ (reducting sugar) คือ น้ำตาลที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือ คีโทน (ketone) ที่เป็นอิสระอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาล และถูกออกซิไดส์ได้ง่ายด้วยตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) อย่างอ่อน ตัวอย่างของน้ำตาลกลุ่มนี้ ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ทุกชนิด เช่น น้ำตาลกลูโคส (glucose) น้ำตาลกาแล็กโทส (galactose) น้ำตาลฟรักโทส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(fructose)น้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) บางชนิด เช่น น้ำตาลแล็กโทส (lactose) น้ำตาลมอลโทส (maltose)



รูปที่ 2.13สูตรโครงสร้างของน้ำตาลแล็กโทส

ที่มา : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1056/reducing-sugar-

สืบค้นเมื่อวันที่ 7 เมษายน 2559

การตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หาได้โดยอาศัยคุณสมบัติที่สามารถหารีดิวซ์โลหะอิออน เช่นCu^{2+} หรือ Ag^{2+} ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำ ตัวอย่างของน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น กลูโคส มอลโตส เซลโลไบโอส และ แลคโตส ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ เนื่องจากอะโนเมอริกคาร์บอนทั้งคู่ถูกจับยึดไว้โดยพันธะไกลโคซิดิก เช่น น้ำตาลซูโครส จัดว่าเป็นน้ำตาล non-reducing

คุณสมบัติในการรีดิวซ์โลหะอิออนนั้น นอกจากจะใช้เพื่อตรวจสอบปริมาณแล้ว ยังสามารถใช้ในการบอกตำแหน่งทิศทางของหน่วยย่อยคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ได้ในพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นสายตรง (linear chain) ในหนึ่งโมเลกุลจะมีปลาย reducing end 1 หน่วย (เป็นโมโนแซคคาไรด์ที่มีอะโนเมอริกคาร์บอนอิสระ) และปลายที่เป็น non-reducing end 1 หน่วย ส่วนพอลิแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้าน (branched) ในหนึ่งโมเลกุลจะมีปลายที่เป็น non-reducing end มากมายตามจำนวนกิ่งก้านที่มี แต่จะมีปลาย reducing end เพียงตำแหน่งเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chua และFeng(2011)ศึกษาการใช้เอนไซม์ในการเปลี่ยนกระดาษหนังสือพิมพ์และกระดาษสำนักงานเป็นน้ำตาลหมักโดยศึกษาผลของ 4 ปัจจัย คือ เวลาในการไฮโดรไลซิส ปริมาณของเอนไซม์ สารลดแรงตึงผิว และการปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งขอบเขตของการประเมินผลและการวัดปริมาณผลผลิตน้ำตาลจะใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (response surface methodology; RSM) ในการไฮโดรไลซิสกระดาษหนังสือพิมพ์ พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซิสจะทำให้มีการปล่อยน้ำตาลออกมาเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณของเอนไซม์และการปรับสภาพด้วยกรดแทบจะไม่มีผล ส่วนสารลดแรงตึงผิวจะแสดงผลที่ดีเมื่อปริมารการใช้เอนไซม์ค่อนข้างต่ำ ในการใช้กระดาษสำนักงานเป็นสารตั้งต้น พบว่า เวลาในการไฮโดรไลซิส ปริมาณเอนไซม์ และการไฮโดรไลซิสด้วยกรด จะแสดงผลที่ดีในการปล่อยน้ำตาลออกมา ในสภาวะที่เหมาะสมพบว่า มีผลผลิตน้ำตาลสูงสุดจากกระดาษสำนักงาน 0.82 กรัมของน้ำตาลรีดิวซ์ต่อกรัมของกระดาษ ซึ่งสูงกว่าค่าการปล่อยน้ำตาลสูงสุดจากกระดาษหนังสือพิมพ์ประมาณ 4.8 เท่า

Dubey และคณะ(2011) ศึกษาการผลิตไบโอเอทานอลจากกระดาษเหลือใช้ โดยการปรับสภาพและไฮโดรไลซิสด้วยกรด และหมักกับ *Pichia stipitis* ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพกระดาษเหลือใช้ด้วยกรดเจือจาง โดยสภาวะที่ศึกษาคือ อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:8-1:14 (w/v), เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-6 ชั่วโมง และความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.005-1.00 N ที่อุณหภูมิ 120°C ในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซิสกระดาษเหลือใช้ด้วยกรดคือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 N ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนของชีวมวลต่อกรด 1:10 (w/v) จากนั้นนำกระดาษเหลือใช้ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสแล้วไปหมักกับ *Pichia stipitis* ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ผลการผลิตเอทานอลคือ 3.73±0.16 g/l และมีประสิทธิภาพในการหมัก 77.54±4.47 %

Meinita และคณะ (2014) ศึกษาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกเพื่อการไฮโดรไลซิสในการผลิตไบโอเอทานอลด้วย *Gelidium latifolium* (Gelidiales, Rhodophyta)รายงานนี้แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริก โดยการไฮโดรไลซิส *G. latifolium*แสดงให้เห็นว่าการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกให้การผลิตน้ำตาลและการผลิตเอทานอลดีกว่าเมื่อเทียบกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ผลการทดลองนี้มีความสำคัญสำหรับอนาคตของการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jutakritsadaและคณะ (2014) ศึกษาการไฮโดรไลซิสข้าวฟ่างเพื่อการหมักไบโอเอทานอลจาก *Sachromyces cerevisiae* TISTR 5596 โดยจะตรวจสอบเพื่อความเข้าใจถึงผลกระทบของกรดซัลฟูริกในการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสสังเคราะห์และฟางข้าวฟ่าง แล้วนำไปหมักต่อกับ*S.cerevisiae* TISTR 5596 เพื่อผลิตเป็นเอทานอล ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสสังเคราะห์ใน 5% v/vของกรดซัลฟิวริก ซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงมีผลผลิต 28 กรัม/ลิตรและสำหรับปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวฟ่างใน 3%v/v ของกรดซัลฟิวริกได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 25.46 กรัม/ลิตร นอกจากนี้การหมักเอทานอลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 ชั่วโมงกับการไฮโดรไลซ์ของเซลลูโลสสังเคราะห์และฟางข้าวฟ่างถูกวิเคราะห์โดยแก๊สโครมาโตกราฟี *S.cerevisiae* TISTR 5596 สามารถผลิตเอทานอล 9.021 กรัม/ลิตร หรือความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น 32.89% ได้ 28 กรัม/ลิตร สำหรับการหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 ชั่วโมง และผลิตเอทานอล 1.8 กรัม/ลิตร หรือความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ 22.52% ได้ 25.46 กรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 40 ชั่วโมง สำหรับตัวอย่างที่สกัดจากเซลลูโลสสังเคราะห์และฟางข้าวฟ่างตามลำดับ

Park, และคณะ (2002)ศึกษาการประเมินผลเกี่ยวกับการทดลองการไฮโดรไลซิสกระดาษเหลือใช้ด้วยเอนไซม์เซลลูเลสโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสทางการค้า 3 ชนิด คือacremonium cellulase, meicelase และ cellulosin T2 ใช้ปริมาณเอนไซม์ที่แตกต่างกัน คือ 1-10%(w/w) กระดาษเหลือใช้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์แล้วนำมาตรวจสอบ การเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเอนไซม์ ในกรณีที่มีปริมาณเอนไซม์ 10% (w/w) acremonium cellulase เปลี่ยนกระดาษเหลือใช้ให้ผลผลิต 79% ซึ่งสูงกว่า 17% เมื่อเทียบกับ meicelase และ สูงกว่า 13% ของ cellulosin T2

Kurakake และคณะ (2007) ศึกษากระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยแบคทีเรียสองสายพันธุ์เพื่อการไฮโดรไลซิสกระดาษสำนักงานด้วยเอนไซม์สายพันธุ์ที่สามารถไฮโดรไลซ์เซลลูโลสได้ คือ *Sphingomonas paucimobilis* MK1 และ *Bacillus circulans* MK2 ถูกแยกจากดินและเพาะเลี้ยงด้วยกันในจานเพาะเลี้ยง การเจริญเติบโต *B. circulans* MK2 จะเพาะเลี้ยงในอาหารเพาะเลี้ยงที่เป็นของเหลวต้องการอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยกับ *S. paucimobilis* MK1 การปรับสภาพทางชีวภาพร่วมกันของสายพันธุ์ที่แขวนลอย หลังจากมีการปรับปรุงการเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวการไฮโดรไลซิสของกระดาษสำนักงานจากเทศบาล การนำน้ำตาลกลับมาใช้ใหม่โดย *S.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

paucimobilis MK1 (51%) เป็น 1.4 เท่าสูงกว่าของกลุ่มตัวอย่างที่ (30%) และในการรวมสายพันธุ์กับ *B. circulans* MK2 นำกลับมาได้ดีขึ้น 2.5 เท่า (75%) การนำน้ำตาลกลับมาในสภาวะสูงสุดเพิ่มได้ถึง 94% สำหรับกระดาษสำนักงาน นอกจากนี้ผลกระทบของการปรับสภาพทางชีวภาพได้รับการยืนยันเป็นเวลานานกว่า 1 วัน ในการเอกซเรย์แบบเลี้ยวเบนสำหรับผลึกเซลลูโลสในกระดาษสำนักงานมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการปรับสภาพทางชีวภาพ มีผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ปรับสภาพ กลไกของผลกระทบการปรับสภาพทางชีวภาพถูกอธิบายได้ด้วยความจริงที่ว่ามีสายพันธุ์ที่ทำหน้าที่เป็น endoglucanase ซึ่งมีการไฮโดรไลซ์ลักษณะสัณฐานแบบสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) บริษัท Pyrex, Germany

3.1.2 หลอดทดลอง (test tube) บริษัท Pyrex, Germany

3.1.3 ที่วางหลอดทดลอง (rack)

3.1.4 กระดาษฟลอยล์

3.1.5 ปิเปต บริษัท Precicolor, Germany

3.1.6 จุกยาง

3.1.7 บีกเกอร์ บริษัท Pyrex, Germany

3.1.8 คิวเวต (cuvette)

3.1.9 หลอดหยด (dropper)

3.1.10 ตะแกรงร่อน บริษัท Laboratory test sieve, UK

3.1.11 กระบอกตวง บริษัท VitaLab, Germany

3.1.12 ขวดปรับปริมาตร (volumn metric flask) บริษัท Schott, West Germany

3.1.13 ผ้าขาวบาง

3.2 เครื่องมือ

3.2.1 เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) บริษัท Barnstead–Thermolyne, USA

3.2.2 เครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง บริษัท Goettingen, Germany

3.2.3 เครื่องชั่งสองตำแหน่ง รุ่น EB-4000H บริษัท Shimadzu Corporation, Japan

3.2.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง รุ่น UB-10 บริษัท Denver Instrument

3.2.5 เครื่องปั่น รุ่น EM-ICE บริษัท Sharp

3.2.6 เครื่องผสมสารละลาย (vortex) บริษัท VELP scientifica, Italy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) รุ่น UV-2800A บริษัท Unico, USA

3.2.8 ตู้ดูดควัน (hood)

3.2.9 ตู้อบลมร้อน 105 องศาเซลเซียส รุ่น ED/FD บริษัท Binder, Germany

3.2.10 เตาแก๊ส รุ่น HW-C2295 บริษัท House Worth, Thailand

3.2.11 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) รุ่น HA-300M IV บริษัท Hirayama, Japan

3.2.12 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) บริษัท Becthai, Thailand

3.2.13 เครื่องบดละเอียด

3.3 สารเคมี

3.3.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96–98 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 Univa, Australia

3.3.4 ดีเอ็นเอส (3,5-dinitrosalicylic acid; ($C_7H_4N_2O_7$)) บริษัท Sigma, USA

3.4 วัตถุดิบ

เป็นกระดาษ A4 ที่ใช้แล้ว ซึ่งเอามาจากที่บ้าน และได้รับความอนุเคราะห์จากเพื่อนๆ

3.5 การเตรียมวัตถุดิบ

3.5.1 ตัดกระดาษเป็นชิ้นเล็กๆ โดยให้มีขนาดประมาณ 2x2 เซนติเมตร

3.5.2 นำมาแช่ในน้ำกลั่น ขยำให้ยุ่ย จากนั้นแช่ทิ้งไว้ 1 คืน

3.5.3 บีบเอาน้ำออก

3.5.4 นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง

3.5.5 นำไปบดให้ละเอียด

3.5.6 คัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน 3 ขนาด (300, 500, 850 ไมโครเมตร)

3.5.7 เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าจะทำการทดลอง

จะได้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ กระดาษขนาด300–500 ไมโครเมตร, กระดาษขนาด 500–850 ไมโครเมตร และกระดาษขนาดมากกว่า 850ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

วัตถุดิบแต่ละกลุ่มแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกไม่นำมาปรับสภาพ ส่วนที่สองนำมาปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 (จุลวัชร์ และคณะ, 2556) โดยใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์คือ ร้อยละ 1:10 โดยมวลต่อปริมาตร นำวัตถุดิบและโซเดียมไฮดรอกไซด์ใส่ในฟลาสก์ จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการแยกส่วนของเหลวและกากออกจากกันโดยการกรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำส่วนกากมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกว่าค่าพีเอชจะเป็นกลาง แล้วนำส่วนที่เป็นของเหลวไปปรับค่าพีเอชให้มีสภาวะเป็นกลาง ด้วยกรดซัลฟิวริก แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟีนอล–ซัลฟิวริก (Dubois, 1956) ทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลที่ได้หลังจากการปรับสภาพ

3.7 กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อหาสถานะและขนาดของตัวอย่างที่ดีที่สุด

นำตัวอย่างกลุ่มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลที่ได้จากตัวอย่างขนาดต่างๆ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยควบคุมสภาวะที่ใช้ 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้น เวลา และอัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรด โดยใช้ความเข้มข้น 0.5นอร์มอล เวลา 120 นาที อัตราส่วนตัวอย่างต่อกรด 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ จนครบเวลาที่กำหนด แล้วทำการแยกส่วนของเหลวและกากออกจากกันด้วยการกรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำส่วนที่เป็นของเหลวไปปรับค่าพีเอชให้มีสภาวะเป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟีนอล–ซัลฟิวริก (Dubois, 1956) เพื่อหาสถานะและขนาดของตัวอย่างที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 กระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นต่างกัน

นำตัวอย่างกลุ่มที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลที่ได้จากตัวอย่างขนาดเดียวกัน โดยออกแบบการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล ซึ่งควบคุมและเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ใช้ 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้น เวลา และอัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรด โดยใช้ความเข้มข้น 0.1, 0.5, และ 1.0 นอร์มอล เวลา 60, 120, และ 180 นาที อัตราส่วนตัวอย่างต่อกรด 1:8, 1:10 และ1:12 กรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 3.1ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ จนครบเวลาที่กำหนด แล้วทำการแยกส่วนของเหลวและกากออกจากกันด้วยการกรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำส่วนที่เป็นของเหลวไปปรับค่าพีเอชให้มีสภาวะเป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS (Miller, 1959) และวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก (Dubois, 1956) เพื่อหาสภาวะในการไฮโดรไลซ์ที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด

ตารางที่ 3.1 การศึกษาสภาวะที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ โดยวางแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (นอร์มอล)	เวลา (นาที)	อัตราส่วนตัวอย่าง : กรด (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1 : 8 (c_1)	1 : 10 (c_2)	1 : 12 (c_3)
0.1 นอร์มอล (a_1)	60 (b_1)	$a_1b_1c_1$	$a_1b_1c_2$	$a_1b_1c_3$
	120 (b_2)	$a_1b_2c_1$	$a_1b_2c_2$	$a_1b_2c_3$
	180 (b_3)	$a_1b_3c_1$	$a_1b_3c_2$	$a_1b_3c_3$
0.5 นอร์มอล (a_2)	60 (b_1)	$a_2b_1c_1$	$a_2b_1c_2$	$a_2b_1c_3$
	120 (b_2)	$a_2b_2c_1$	$a_2b_2c_2$	$a_2b_2c_3$
	180 (b_3)	$a_2b_3c_1$	$a_2b_3c_2$	$a_2b_3c_3$
1.0 นอร์มอล (a_3)	60 (b_1)	$a_3b_1c_1$	$a_3b_1c_2$	$a_3b_1c_3$
	120 (b_2)	$a_3b_2c_1$	$a_3b_2c_2$	$a_3b_2c_3$
	180 (b_3)	$a_3b_3c_1$	$a_3b_3c_2$	$a_3b_3c_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

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

ในขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำตาลด้วยวิธี Phenol-sulfuric acid method จะนำตัวอย่างในส่วนที่เป็นของเหลวมาใส่ในหลอดทดลอง ปริมาตร1 มิลลิลิตร ส่วนในหลอดทดลองที่เป็นตัวควบคุมจะใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่าง จากนั้นเติมฟีนอลปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วจึงเติมกรดซัลฟิวริกปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer แล้วตั้งทิ้งไว้อีก 20 นาที จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร โดยเทียบความเข้มข้นกับกราฟน้ำตาลมาตรฐาน (standard curve)

3.9.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid method (DNS) (Miller, 1959)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำตาลด้วยวิธี DNS นำตัวอย่างปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร มาใส่ในหลอดทดลอง ส่วนในหลอดทดลองที่เป็นตัวควบคุมจะใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่าง จากนั้นเติม DNS ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer แล้วจึงนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปแช่ในน้ำเย็น แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 3 มิลลิลิตร นำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยเทียบความเข้มข้นกับกราฟน้ำตาลมาตรฐาน (standard curve)

3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ CRD (complete randomized design) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ศึกษาโดยวิธี Duncan's new range test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษากระบวนการปรับสภาพกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการศึกษากระบวนการปรับสภาพของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 4 ทำการทดลองในฟลาสก์ 250 มิลลิลิตร โดยใช้อัตราส่วน 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปกรองเพื่อแยกส่วนของสารละลายและกากออกจากกัน จากนั้นนำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก (Phenol-sulfuric method (Dubois M.,1956)) และวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีดีเอ็นเอส (Dinitrosalicylic acid method (DNS) (Miller,1959)) ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาด

ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
300-500	4.64	0.29
500-850	4.42	0.27
>850	5.94	0.24

จากตารางที่ 4.1 พบว่ากระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่มีขนาด300-500, 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด4.64, 4.42 และ5.94 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่มีขนาด300-500, 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตรมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 0.29, 0.27 และ 0.24 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ผลการศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาดที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล โดยใช้อัตราส่วน 1:10 จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ เป็นเวลา 120 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปกรองเพื่อแยกส่วนของสารละลายและกากออกจากกัน จากนั้นนำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
300-500	11.21	7.96
500-850	12.82	8.51
>850	11.28	7.93

จากตารางที่ 4.2 พบว่ากระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่มีขนาด300-500, 500-850 และมากกว่า 850ไมโครเมตร มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 11.21, 12.82 และ 11.28 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่มีขนาด300-500, 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 7.96, 8.51 และ 7.93 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
300-500	10.26	6.21
500-850	15.82	9.79
>850	11.40	7.38

จากตารางที่ 4.3 พบว่ากระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่มีขนาด300-500, 500-850 และมากกว่า 850ไมโครเมตร มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด10.26, 15.82 และ11.40มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่มีขนาด300-500, 500-850 และมากกว่า 850 ไมโครเมตร มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 6.21, 9.79 และ 7.38มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์(มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	
	ผ่านกระบวนการปรับสภาพ	ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ
300-500	7.96	6.21
500-850	8.51	9.79
>850	7.93	7.38

จากตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพที่ขนาดและสภาวะเดียวกัน พบว่ากระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพจะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากกว่ากระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ เนื่องจากโครงสร้างของกระดาษมีเซลลูโลสอยู่ประมาณร้อยละ 85-99 และมีลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 0-15 เมื่อนำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสถูกด่างทำลายไปบางส่วน จึงทำให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมาได้น้อย

4.3 ผลการศึกษาการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

ผลการศึกษากระบวนการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วด้วยกรดซัลฟิวริก โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (0.1, 0.5 และ1.0 นอร์มอล) ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ (60, 120 และ 180 นาที) และอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก (1:8, 1:10 และ 1:12กรัมต่อมิลลิลิตร) ซึ่งกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพนั้นมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์แสดงผลดังตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.7 ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS เวอร์ชั่น 17 เพื่อศึกษาว่าแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลที่เกิดขึ้นหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (นอร์มอล)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด(มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) อัตราส่วนตัวอย่าง:กรด(กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1:8 (c_1)	1:10 (c_2)	1:12 (c_3)
0.1 (a_1)	60 (b_1)	1.92 ± 0.22^{op}	1.32 ± 0.36^{op}	1.45 ± 0.29^{op}
	120 (b_2)	2.39 ± 0.40^{no}	1.66 ± 0.04^{op}	1.71 ± 0.17^{op}
	180 (b_3)	2.26 ± 0.34^{no}	2.07 ± 0.23^{no}	1.69 ± 0.16^{op}
0.5 (a_2)	60 (b_1)	10.06 ± 0.86^{l}	9.63 ± 0.71^{m}	8.97 ± 0.66^{n}
	120 (b_2)	16.84 ± 1.68^{hi}	15.83 ± 1.08^{ij}	15.24 ± 0.65^{ij}
	180 (b_3)	14.90 ± 0.92^{jk}	13.19 ± 2.39^{k}	16.14 ± 4.00^{hi}
1.0 (a_3)	60 (b_1)	21.91 ± 1.16^{c}	17.56 ± 0.48^{g}	14.19 ± 1.09^{jk}
	120 (b_2)	27.03 ± 1.25^{a}	25.40 ± 1.96^{b}	20.02 ± 1.67^{d}
	180 (b_3)	18.20 ± 1.28^{f}	15.78 ± 0.84^{ij}	20.00 ± 0.45^{e}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	5235.684[a]	26	201.372	127.008	.000
Intercept	11190.584	1	11190.584	7058.051	.000
conc	4575.543	2	2287.772	1442.928	.000
ratio	48.917	2	24.458	15.426	.000
time	256.196	2	128.098	80.793	.000
conc * ratio	44.106	4	11.026	6.955	.000
conc * time	185.241	4	46.310	29.208	.000
ratio * time	62.450	4	15.613	9.847	.000
conc * ratio * time	63.232	8	7.904	4.985	.000
Error	85.617	54	1.586		
Total	16511.886	81			
Corrected Total	5321.302	80			

a. R Squared = .984 (Adjusted R Squared = .976)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียล

		N	subset		
Conc.	0.10	27	1.83[c]		
	0.50	27		13.42[b]	
	1.00	27			20.07[a]
	Sig.		1.00	1.00	1.00
Ratio	1:8	27		12.84[a]	
	1:10	27	11.38[b]		
	1:12	27	11.04[b]		
	Sig.		0.33	1.00	
Time	60	27	9.67[c]		
	120	27			14.01[a]
	180	27		11.58[b]	
	Sig.		1.00	1.00	1.00

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ เพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด (ตารางที่ 4.6) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์กับอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดของค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงผลดังตารางที่ 4.6 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว คือ การใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 นอร์มอล ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรของกรดซัลฟิวริก 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส สามารถผลิตน้ำตาลทั้งหมดได้ 27.03มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (นอร์มอล)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด(มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) อัตราส่วนตัวอย่าง:กรด(กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		1:8 (c_1)	1:10 (c_2)	1:12 (c_3)
0.1 (a_1)	60 (b_1)	0.41 ± 0.03^{mn}	0.38 ± 0.03^{mn}	0.42 ± 0.02^{mn}
	120 (b_2)	0.54 ± 0.06^{mn}	0.55 ± 0.11^{mn}	0.48 ± 0.04^{mn}
	180 (b_3)	0.47 ± 0.08^{mn}	0.41 ± 0.03^{mn}	0.37 ± 0.02^{mn}
0.5 (a_2)	60 (b_1)	4.49 ± 0.17^{lm}	4.98 ± 0.66^{lm}	4.94 ± 0.57^{lm}
	120 (b_2)	12.43 ± 0.53^{gh}	13.95 ± 0.81^{fg}	13.32 ± 0.25^{fg}
	180 (b_3)	9.14 ± 0.67^{j}	8.04 ± 0.76^{kl}	8.79 ± 0.68^{kl}
1.0 (a_3)	60 (b_1)	14.80 ± 0.82^{ef}	11.13 ± 0.91^{hi}	11.11 ± 0.65^{hi}
	120 (b_2)	21.53 ± 1.35^{a}	17.42 ± 1.03^{c}	15.08 ± 0.34^{d}
	180 (b_3)	20.40 ± 0.23^{b}	14.91 ± 0.59^{ef}	12.11 ± 0.15^{gh}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3702.021[a]	26	142.385	413.780	.000
Intercept	5504.651	1	5504.651	15996.839	.000
conc	3031.302	2	1515.651	4404.572	.000
ratio	54.498	2	27.249	79.187	.000
time	303.022	2	151.511	440.299	.000
conc * ratio	126.675	4	31.669	92.032	.000
conc * time	164.271	4	41.068	119.345	.000
ratio * time	9.921	4	2.480	7.208	.000
conc * ratio * time	12.331	8	1.541	4.479	.000
Error	18.582	54	.344		
Total	9225.253	81			
Corrected Total	3720.602	80			

a. R Squared = .995 (Adjusted R Squared = .993)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียล

		N	subset		
Conc.	0.10	27	0.45[c]		
	0.50	27		8.90[b]	
	1.00	27			15.39[a]
	Sig.		1.00	1.00	1.00
Ratio	1:8	27			9.36[a]
	1:10	27		7.98[b]	
	1:12	27	7.40[c]		
	Sig.		1.00	1.00	1.00
Time	60	27	5.85[c]		
	120	27			10.59[a]
	180	27		8.29[b]	
	Sig.		1.00	1.00	1.00

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (ตารางที่ ข.) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาปัจจัยหลัก คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกกับอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์กับอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ และอัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดของค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงผลดังตารางที่ 4.6 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้ว คือ การใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 นอร์มอล ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรของกรดซัลฟิวริก 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 21.53 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

Dubey และคณะ(2011) ศึกษาการผลิตไบโอเอทานอลจากกระดาษที่ใช้แล้วโดยการปรับสภาพและการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดและการหมักด้วย *Pichia stipites* จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์กระดาษที่ใช้แล้ว คือ กรดซัลฟิวริก 0.5 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอัตราส่วนระหว่างกระดาษที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก 1:10

Meinita และคณะ (2014) ศึกษาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกเพื่อการไฮโดรไลซ์ในการผลิตไบโอเอทานอลด้วย *Gelidium latifolium*(Gelidiales, rhodophyta) จากการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้น 12% ความเข้มข้นของกรด 0.2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที กรดซัลฟิวริกให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมาได้มากกว่ากรดไฮโดรคลอริก (34.43±3.31 กรัมกาแลคโตสต่อลิตร และ 2.40±0.02 กรัมกาแลคโตสต่อลิตร)

Jutakritsadaและคณะ (2014) ศึกษาการไฮโดรไลซ์ข้าวฟ่างเพื่อการหมักไบโอเอทานอลจาก *Sachromyces cerevisiae* TISTR 5596 จากการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมาเพิ่มมากขึ้นที่สภาวะ 3% v/v ของกรดซัลฟิวริก อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง จะให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคส 6.31 กรัมต่อลิตร น้ำตาลไซโลส 10.65 กรัมต่อลิตร และน้ำตาลอะราบิโนส 1.43 กรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษากระบวนการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ โดยใช้กรดซัลฟิวริก 0.5 นอร์มอล อัตราส่วนของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อกรดซัลฟิวริก 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ และเพื่อคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ พบว่ากระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพที่มีขนาด 500-850 ไมโครเมตร ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด คือ 9.79 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

จากนั้นนำกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพขนาดดังกล่าว มาทำการไฮโดรไลซ์ในสภาวะต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้และหาสภาวะที่เหมาะสม โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียล จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 1 นอร์มอล ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์ 120 นาที และอัตราส่วนของกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรของกรดซัลฟิวริก 1:8 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ออกมามากที่สุด คือ 21.53มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วด้วยกรดซัลฟิวริกควรจะมีการปรับให้อัตราส่วนระหว่างกระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริกให้มีอัตราส่วนที่แตกต่างกันมากกว่านี้ เพื่อทำให้เห็นความแตกต่างของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแต่ละสภาวะได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

จุฑาทิพย์ วรรณประเสริฐ, ชนิกานต์ ยงศิริ, ดาราภรณ์ นราองอาจ. 2556.**กระบวนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรดจากเส้นใยลูกตาลเพื่อผลิตน้ำตาลกลูโคส**. โครงงานพิเศษ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จุลวัชร์ คงแท่น, บดินทร์ เนียมนคร และวีรพันธุ์ ไม้แก้ว. 2556. **การผลิตกลูโคสจากเส้นใยมะพร้าวโดยกระบวนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด.** วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชัชนันท์ นิวาสวงษ์และเฉลิม เรืองวิริยะชัย. 2555. การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย. **วารสารวิทยาศาสตร์.** 40(4):1073-1088.

นักศึกษาแผนกวิชาการพิมพ์. **กระดาษทางการพิมพ์.**สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ (เจ็ดยอด) อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300 โทร. (053) 222406

นันทิกา คล้ายชม, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และอนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา, 2554, การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากซางข้างฟางหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด, **วิศวกรรมสาร มก.** 24: 91-102

ปาริชาติ สักกะทานุ. 2539. **คุณค่าอาหารเส้นใยป้องกันบำบัดสรรพโรค.** กรุงเทพฯ. รวมทรรศน์

พรเทพ ถนนแก้ว. 2538. **ภาวะเหมาะสมของการผลิตเซลลูเลสจากเชื้อราที่คัดแยกจากบริเวณปลูกป่าศรนารายณ์.** วิทยานิพนธ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์. **สาระน่ารู้เรื่องกระดาษพิมพ์.** คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภูมิหทัย คูประเสริฐยิ่ง และประมุข ภระกูลสุขสถิตย์. 2554. **สิ่งแวดล้อมและพลังงาน.**สรรสาระเทคโนโลยีชีวภาพ. กรุงเทพฯ

รัชนี ตัณฑะพานิชกุล . (2537). **เคมีอาหาร.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

รุ่งทิพย์ ทองเถื่อน, วนารี จิตร์มานะ, วิจิตรี มุตตาบรรณาการ. 2557. **การผลิตน้ำตาลเพื่อการหมักจากวัสดุเหลือ ใช้จากการเพาะเห็ดฟางโดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด.** โครงงานพิเศษ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เวสารัช สุนทรชัยบรูณ์ และ รัชพล พะวงศ์รัตน์. 2555. การปรับสภาพผักตบชวา (Eichhornia crassipes(Mart.) Solms) และ จอก (Pistia stratiotes L.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับด่างและกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ เพื่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์. **Sakon nakon graduate studies Journal**,Vol.10 No. 45: 173-184.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศศิธร ไหรฤทธิชัย. 2553. **การแยกและการคัดกรองแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลส เพื่อการย่อยสลายใบไม้.** วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สุขใจ ชูจันทร์. 2554. **การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มวลชีวภาพ.** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อังคณา ทองคำ. 2552. **การผลิตไซลิทอลจากผลพลอยได้อุตสาหกรรมโดยการหมัก.**บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Alok Kumar Dubey, P.K. Gupta, Neelam Garg and Sanjay Naithani. 2011. Bioethanol production from waste paper acid pretreated hydrolyzate with xylose fermenting *Pichia stipites*. **Carbohydrate Polymers**. Volume 88, Issue 3, 15 April 2012, Pages 825-829

Altıntas, M.M., U lgen K.O., Kirdar, B. O., nsan, Z.I. and Oliver, S.G. 2002. Improvement ofethanol production from starch by recombinant yeast through manipulation ofenvironmental factors. **Enzyme Microb Technol** 31, pp. 640–647.

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

Boopathy, R. 1998. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reaction. **Bioresour. Technol.** 64:1-6

Bosch, P., Wallberg, O., Joelsson, E., Galbe, M. and G.Zacchi. (2010). Impact of dual temperatureprofilein dilute acid hydrolysis of spruce forethanol production. **Biotechnology for Biofuels** 3: 15.

Browing, B.L. 1963. Method in wood chemistry, pp.389-407. **Interscience Publishers,** New York,London.

Chen, B.Y., Chen, S.W. and Wang, H.T.,2012, Use of different alkalinepretreatments and enzyme models toimprove low-cost cellulosic biomassconversion, **Biom. Bioen.** 39: 182-191.

Cheng, K.K., J.A. Zhang., W.X. Ping., J.P. Ge., Y.J. Zhou., H.Z. Ling and J.M. Xu. 2008. SugarcaneBagasse Mild Alkaline/Oxidative Pretreatment for Ethanol Production by AlkalineRecycle Process. **Biochem Biotechnol.** 151:43-50.

Cheung, S.W. and Anderson, B.C. 1997. **Bioresour. Technol.** 59; 81–96.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deveries, L. J. and Reinhold, V. N. 1992. **Controlling dietary fiber in fiber in food products.**New York : Van Nostrand Reinhold.

Dewes, T. and Hunsche, E. 1998. Composition and Microbialdegradability in the soil of farmyard manure fromecologically-managed farms. **Biological Agricultural Horticulture.** 16, 251–268.

Dubois, M., K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers, and F. Smith. 1956. Calorimetric method for determination of sugars andrelated substances. **Anal. Chem.** 28: 350-356.

Eriksson, K.E.L., R.A. Blanchette. And P. Ander. 1990. Microbial and Enzymatic Degardation ofWod and Wood Component. **Springer Verlag**, Berlin. 407 p.

Faiqah Abd-Rahim, Helmi Wasoh, Mohd Rafein Zakaria, Arbakariya Ariff, Rizal Kapri, Nazaruddin Ramli, 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

Gupta, R. and Lee, Y.Y. (2010). Investigation of biomassdegradation mechanism in pretreatment ofswitchgrass by aqueous ammonia andsodium hydroxide. **Bioresource Technology**101: 8185–8191.

Jiacheng She, Foster A. Agblevor, (2008), Optimization of enzyme loading and hydrolytic time in the hydrolysis of mixtures of cotton gin waste and recycled paper sludge for the maximum profit rate. **Biochemical Engineering Journal.** 41, 241–250

Jung, Y.H., Kim, I.J., Kim, H.K. and Kim,K.H., 2013, Dilute acid pretreatment of lignocellulose for whole sluury ethanolfermentation, **Biores. Technol.** 132: 109-114.

Keshwani, D.R. 2009. **Microwave pretreatment of switchgrass for bioethanol production.** ThesisDissertation. North Carolina State University.

Khim Hoong Chu and Xiao Feng. 2011. Enzymatic conversion of newspaper and office paper to fermentable sugars. **Process Safety and Environmental Protection**. Volume 91, Issues 1–2, January–March 2013, Pages 123-130

KurakakeM., Ide N., Komaki T. (2007) Biological pretreatment with two bacterial strains for enzymatic hydrolysis of office paper.**Current Microbiology.** Volume 54 Issue 6, June 2007, Pages 424-428

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lei Wang, Richard Templer, Richard J. Murphy, (2012), High-solids loading enzymatic hydrolysis of waste papers for biofuel production. **Applied Energy.** 99, 23–31

Maria Dyah Nur Meinita, Bintang Marhaenia, Tjahjo Winantoa, Dwi Setyaningsih, 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

Mark, H. F. 1985. **Encyclopedia of polymer science and engineering** (vol. 3) New York :John Wiley and sons.

Miller, G.L., 1959. Using dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Anal. Chem.** 31, 426–428.

Mishima, D., M. Tateda., M. Ike and M, Fujita. 2006. Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. **Bioresour. Technol.** 97(16): 2166-2172.

Norkrans, B. 1967. **Cellulose and cellulolysis.** Adv. Appl. Icrobail. 9 : 91-215

Ogbonna, J. C., H. Mashima and H. Tanaka. 2001. Scale up of fuel ethanol production fromsugar beet juice using loofa sponge immobilized bioreactor. **Bioresources Technology.**76:1-8.

Park E.Y., Ikeda Y., Okuda N. (2002) Empirical evaluation of cellulase on enzymatic hydrolysis of waste office paper. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**. Volume 7, Issue 5, 2002, Pages 268-274

Pasakorn Jutakridsadal, Chinakrit Ladadokl, Khanita Kamwilaisak. 2014.Acid hydrolysis sorghum straw for Bioethanol fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5596. **Advaiced Materials Research** Vol. 931-932

Ragg, P. L. and Fields, P. R., 1987. The development of a process for the hydroysis of lignocellulosic waste. **Phil Trans R Soc Lond** A321, 537-547

Reshamwala S, Shawky BT, Dule BE. 1995. **Appl Biochem Biotechnol** 51/52:43

Wang, Z., Keshwani, D.R., Redding, A.P. and Cheng J.J.(2010). Sodium hydroxide pretreatment andenzymatic hydrolysis of coastal Bermudagrass. **Bioresource Technology** 101: 3583–3585.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yachmenev, V., Condon, B., Klasson, T. and Lambert, A. 2009. Accerelation of enzymatichydrolysis of corn stover and sugar cane baggasse by low intensity uniformultrasound. J. **Biobased Mater. Bioenergy.** 3, 25-31.

Yudkin, M. and Offord, R. 1973. Comprehensible biochemistry. American ed, **Biochemistry Bibliography**: p. 547-550.

Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Wang, C., Yu, F., Jin, S., Ding, Y., Chi, R., Liao, J. and Zhang, Y. 2006.Comparition of three microwave / chemical pretreatment process for enzymatichydrolysis of rice straw. **Biosyt. Eng.** 93, 279-283.

กระบวนการปรับสภาพ. แหล่งที่มา : http://161.246.67.22/aganimal_v2/THeSiS-DoC/7481f15eb380ba12ac942c366bffdb04.pdf, 6 เมษายน 2559

การพองตัวของเซลลูโลส.แหล่งที่มา : http://webkc.dede.go.th/webmax/sites/default/files/, 23 มีนาคม 2559

โครงสร้างโมเลกุลเซลลูโลส. แหล่งที่มา : http://biomolecule.myreadyweb.com/article/topic-42796.html, 23 มีนาคม 2559

เซลลูโลส. แหล่งที่มา : http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php, 6 เมษายน 2559

ประวัติกระดาษ. แหล่งที่มา : http://www.supremeprint.net/index.php?lay=show&ac=article&Id=538770923 , 23 มีนาคม 2559

ประโยชน์กระดาษ.แหล่งที่มา : http://paperlovejung.blogspot.com/2014/07/blog-post_4.html , 23 มีนาคม 2559

ปริมาณเซลลูโลสในวัสดุอินทรีย์.แหล่งที่มา :file:///C:/Users/user/Downloads/35649-81917-1-PB%20(1).pdf , 23 มีนาคม 2559

พร้อมภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์. **กระดาษปรู๊ฟ.**แหล่งที่มา : http://promtpunpackaging.weebly.com/ , 23 มีนาคม 2559

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. **น้ำตาลรีดิวซ์.** แหล่งที่มา : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1056/reducing-sugar-, 7 เมษายน 2559

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. **ลิกนิน.** แหล่งที่มา : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3289/lignin-,6 เมษายน 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. ลิกนิน. แหล่งที่มา :
http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3154/hemicellulose-,
6 เมษายน 2559

รัชพล พะวงศ์รัตน์. กระบวนการปรับสภาพ. แหล่งที่มา :
file:///C:/Users/user/Downloads/35649-81917-1-PB%20(3).pdf, 6 เมษายน 2559

โรงพิมพ์ JR. **กระดาษอาร์ต.** แหล่งที่มา :
http://www.qghservice.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard_show&
WBntype=1&No=1386332, 23 มีนาคม 2559

สุภาวดี ผลประเสริฐ. **การปรับสภาพ.** แหล่งที่มา :
http://tujournals.tu.ac.th/tstj/detailart.aspx?ArticleID=15, 6 เมษายน 2559

biological pretreatment. แหล่งที่มา :
https://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_06/BioRes_06_4_5224_Isroi_MSNC
LT_Biolog_Pretreat_Ligno_WRF_Review_1754.pdf, สืบค้นวันที่ 7 เมษายน 2559

Parveen Kumar, Diane M. Barrett, Michael J. Delwiche, and Pieter Stroeve. **pretreatment.**แหล่งที่มา :http://ucanr.edu/datastoreFiles/234-1388.pdf,
7เมษายน 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 คิวเวตแก้ว

1.1.4 ปิเปต

1.1.5 ลูกยาง

1.1.6 หลอดทดลอง

1.2 สารเคมี

1.2.1 กรดซัลฟิวริก

1.2.2 ฟีนอลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งฟีนอล 5 กรัม แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

1.2.3 สารละลายกลูโคสมาตรฐาน เตรียมโดยชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายน้ำกลั่นปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 1000 มิลลิลิตร ได้สารละลายกลูโคสเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังตาราง ก.1

1.3 วิธีการวิเคราะห์

1.3.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายกลูโคสมาตรฐานปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายฟีนอลร้อยละ 5 ลงไป 1 มิลลิลิตร

1.3.2 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไปอย่างรวดเร็ว 5 มิลลิลิตร โดยปล่อยกรดลงไปที่ผิวหน้าของของเหลวในหลอดทดลองโดยตรง จะทำให้การผสมกันเกิดขึ้นได้ดีกว่าการปล่อยลงที่ข้างหลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ตั้งหลอดทดลองของสารผสมนี้ไว้เป็นเวลา 10 นาที

1.3.4 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร

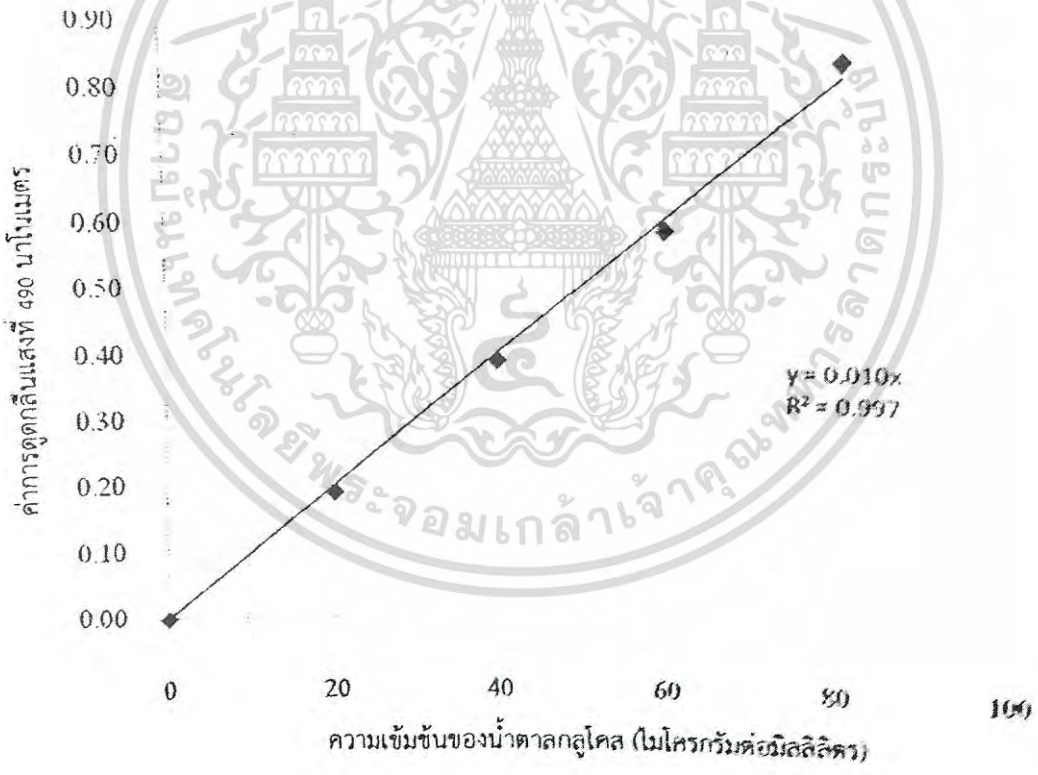
1.3.5 นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส (ภาพที่ ก.1) เพื่อหาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง หรือคำนวณได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 การเจือจางสารละลายกลูโคสด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

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



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.1 อุปกรณ์

2.1.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

2.1.2 เครื่องผสมสารละลาย (vortex)

2.1.3 คิวเวตแก้ว

2.1.4 ปิเปต

2.1.5 ลูกยาง

2.1.6 หลอดทดลอง

2.2 สารเคมี

2.2.1 DNS เตรียมโดยการชั่ง 3,5-dinitrosalicylic acid 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ ทีละน้อย (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 16 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร) คนจนสารละลายใส แล้วเติมโพแทสเซียมโซเดียมทาร์เทต 300 กรัม ทีละน้อย จากนั้นทำการปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

2.2.2 สารละลายกลูโคสมาตรฐาน เตรียมโดยชั่งกลูโคส 0.1 กรัม ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 มิลลิลิตร ได้สารละลายกลูโคสเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรจากนั้นนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังตาราง ก.2

2.3 วิธีการวิเคราะห์

2.3.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายกลูโคสมาตรฐานปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก 3 มิลลิลิตร

2.3.2 นำไปต้มในน้ำเดือด 5 นาที

2.3.3 ทำให้เย็นทันที และเติมน้ำกลั่น 6 มิลลิลิตร

2.3.4 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร

2.3.5 นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส (ภาพที่ ก.2) เพื่อหาความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายตัวอย่าง หรือคำนวณได้จาก

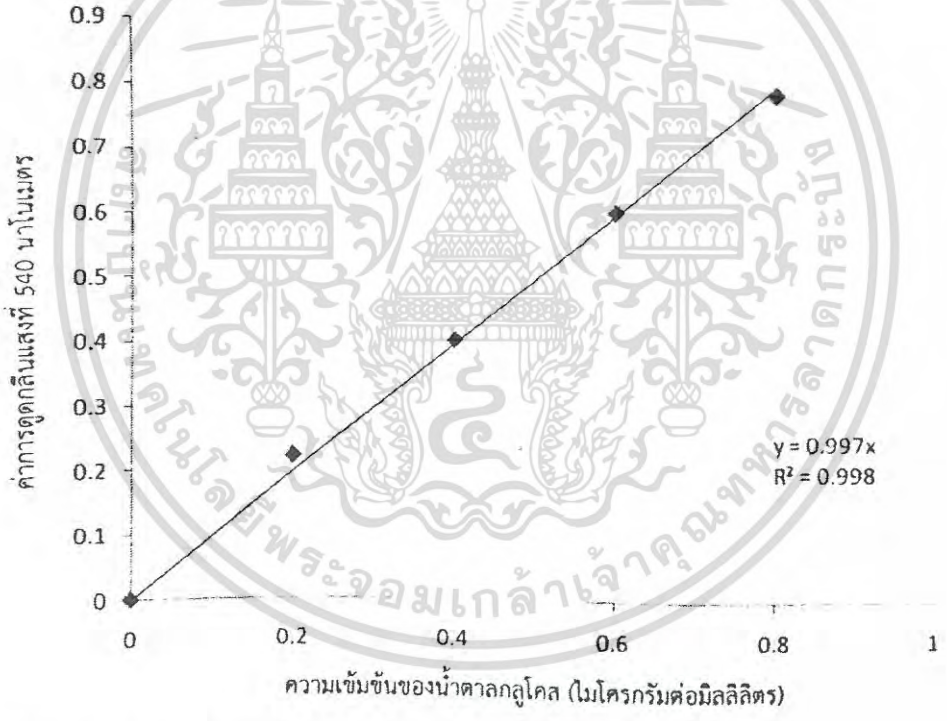
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 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



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิธีดีเอ็นเอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสง

ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของกระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร		
	1	2	3
300-500	0.402	0.510	0.481
500-850	0.599	0.256	0.471
>850	0.410	0.734	0.639

ตารางที่ ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของกระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร		
	1	2	3
300-500	0.287	0.271	0.298
500-850	0.221	0.343	0.262
>850	0.299	0.194	0.207

ตารางที่ ข.3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร		
	1	2	3
300-500	0.557	0.592	0532
500-850	0.552	0.472	0.899
>850	0.462	0.557	0.673

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร		
	1	2	3
300-500	0.303	0.438	0.449
500-850	0.374	0.401	0.498
>850	0.388	0.359	0.439

ตารางที่ ข.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร		
	1	2	3
300-500	0.538	0.482	0.519
500-850	0.882	0.798	0.693
>850	0.536	0.528	0.646

ตารางที่ ข.6 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษแต่ละขนาดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ขนาด	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร		
	1	2	3
300-500	0.293	0.312	0.324
500-850	0.482	0.504	0.478
>850	0.389	0.353	0.362

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 60 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 50, 300 และ 350 เท่า ตามลำดับ

ความเข้มข้น (นอร์มอล)	อัตราส่วน (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร		
		1	2	3
0.10	1:8	0.395	0.420	0.334
	1:10	0.223	0.221	0.245
	1:12	0.252	0.356	0.262
0.50	1:8	0.342	0.334	0.360
	1:10	0.301	0.347	0.315
	1:12	0.307	0.274	0.316
1.00	1:8	0.661	0.622	0.595
	1:10	0.487	0.504	0.514
	1:12	0.441	0.392	0.383

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 60 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 10 และ 30 เท่า ตามลำดับ

ความเข้มข้น (นอร์มอล)	อัตราส่วน (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร		
		1	2	3
0.10	1:8	0.438	0.411	0.391
	1:10	0.394	0.353	0.382
	1:12	0.443	0.432	0.397
0.50	1:8	0.445	0.429	0.460
	1:10	0.495	0.562	0.432
	1:12	0.428	0.520	0.530
1.00	1:8	0.463	0.507	0.495
	1:10	0.381	0.336	0.393
	1:12	0.394	0.357	0.357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 120 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 50, 300 และ 350 เท่า ตามลำดับ

ความเข้มข้น (นอร์มอล)	อัตราส่วน (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร		
		1	2	3
0.10	1:8	0.473	0.559	0.400
	1:10	0.326	0.327	0.341
	1:12	0.373	0.341	0.307
0.50	1:8	0.564	0.616	0.504
	1:10	0.511	0.569	0.503
	1:12	0.495	0.496	0.533
1.00	1:8	0.731	0.790	0.796
	1:10	0.755	0.761	0.661
	1:12	0.562	0.624	0.530

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 120 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 30 และ 30 เท่า ตามลำดับ

ความเข้มข้น (นอร์มอล)	อัตราส่วน (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร		
		1	2	3
0.10	1:8	0.471	0.584	0.571
	1:10	0.424	0.576	0.634
	1:12	0.456	0.453	0.523
0.50	1:8	0.419	0.427	0.393
	1:10	0.494	0.455	0.442
	1:12	0.436	0.440	0.452
1.00	1:8	0.664	0.747	0.735
	1:10	0.554	0.629	0.620
	1:12	0.496	0.494	0.514

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลทั้งหมด โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 180 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 10 และ 30 เท่า ตามลำดับ

ความเข้มข้น (นอร์มอล)	อัตราส่วน (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร		
		1	2	3
0.10	1:8	0.529	0.412	0.416
	1:10	0.387	0.466	0.386
	1:12	0.368	0.303	0.340
0.50	1:8	0.470	0.490	0.530
	1:10	0.481	0.490	0.348
	1:12	0.692	0.458	0.464
1.00	1:8	0.495	0.562	0.503
	1:10	0.433	0.478	0.441
	1:12	0.562	0.686	0.566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรของการไฮโดรไลซ์กระดาษสำนักงานที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยออกแบบแผนการทดลองแบบ 3x3x3 แฟคทอเรียลที่สภาวะ เวลา 180 นาที ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.10, 0.50 และ 1.0 นอร์มอล ใช้การเจือจาง 1, 20 และ 30 เท่า ตามลำดับ

ความเข้มข้น (นอร์มอล)	อัตราส่วน (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร		
		1	2	3
0.10	1:8	0.560	0.420	0.423
	1:10	0.367	0.428	0.418
	1:12	0.383	0.344	0.337
0.50	1:8	0.420	0.459	0.487
	1:10	0.433	0.410	0.359
	1:12	0.475	0.431	0.409
1.00	1:8	0.674	0.673	0.687
	1:10	0.473	0.506	0.507
	1:12	0.403	0.407	0.397

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้