การผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก

นางสาวชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547
ISBN 974-53-1681-4
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF SUGAR FROM MOLECULAR DEGRADATION OF AGRICULTURAL WASTE BY GAMMA-RAY IRRADIATION AND SULFURIC ACID

Miss Chompunoot Hannanthawiwat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1681-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก
โดย	นางสาวชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทรโยธา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์ : การผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก. (PRODUCTION OF SUGAR FROM MOLECULAR DEGRADATION OF AGRICULTURAL WASTE BY GAMMA-RAY IRRADIATION AND SULFURIC ACID) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล 63 หน้า. ISBN 974-53-1681-4.

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประกอบด้วยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส โดยโมเลกุลเหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาล (ไซโลส กลูโคส และอะราบิโนส) และน้ำตาลที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นสารไซลิทอล โดยสามารถนำไปใช้ในงานด้านอาหารและยา การไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว เพื่อให้เป็นน้ำตาลนั้นสามารถใช้ในการกำจัดกาก และเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อหาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก, อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตน้ำตาล และผลของการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว คือ 53.73%, 47.83% และ 49.83% ตามลำดับ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 100 kGy ร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 30 นาที พบว่าตัวอย่างชานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2% และเปลือกทุเรียนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ส่วนฟางข้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ที่ 75 kGy

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี……..……ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี……..ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...……...……..
ปีการศึกษา..2547……..

4470264321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: ACID HYDROLYSIS / REDUCING SUGAR / HEMICELLULOSE / CELLULOSE

CHOMPUNOOT HANNANTHAWIWAT : PRODUCTION OF SUGAR FROM MOLECULAR DEGRADATION OF AGRICULTURAL WASTE BY GAMMA-RAY IRRADIATION AND SULFURIC ACID. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SIRIWATTANA BANCHORNDHEVAKUL, 63 pp. ISBN 974-53-1681-4.

Agricultural wastes are mainly composed of cellulose and hemicellulose which can be converted to sugars (xylose, glucose and arabinose) and then further produce xylitol, with a potential application in food and medical areas. The hydrolysis of sugar cane bagasse, rice straw and durian fruit hull to obtain sugars have a double consequence, the elimination of a waste and the generation of a value-added product. The objective of the study was to determine the effects of H_2SO_4 concentration, temperature and reaction time on the production of sugars. The effect of gamma irradiation with H_2SO_4 were also investigated. The optimum H_2SO_4 concentration of 3% at 120 ^{o}C and reaction time of 30 min were found in three samples studied. Under these conditions, 53.73%, 47.83% and 49.83% of reducing sugar were obtained, for sugar cane bagasse, durian fruit hull and rice straw, respectively. Irradiation with 100 kGy gamma ray followed by hydrolysis with 3% H_2SO_4 at 120 ^{o}C for 30 min found that reducing sugar in sugar cane bagasse increase about 2% and durian fruit hull increase about 1% , while rice straw increase about 1% at 75 kGy. The amount of monosaccharide in three samples were also reported.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department…….Nuclear Technology……...…Student's ……..

Field of study…..Nuclear Technology……...Advisor's ….……

Academic year…2004……

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำในทุก ๆ ด้าน รวมถึงอาจารย์ทุกท่านในภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ต่าง ๆ มากมาย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาชีวเคมี คณะเภสัชศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณพี่และเพื่อนนิสิตที่ให้คำแนะนำในงานวิจัย และการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ คุณวารุณี พานิชผล หัวหน้ากองวิเคราะห์อาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในช่วงแรกของการทดลอง

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านในภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี โดยเฉพาะเพื่อนนิสิตที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด

ท้ายสุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ ๆ สำหรับคำอบรมสั่งสอน และความช่วยเหลือสนับสนุนในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย……... …. ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……... จ

กิตติกรรมประกาศ……... ฉ

สารบัญ……... ช

สารบัญตาราง……. ฌ

สารบัญภาพ…… ฎ

บทที่

1 บทนำ……... 1

1.1 ปัญหา ที่มา และเหตุผล……... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย……. 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย……..…… 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย……. 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย…….……... 2

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……..… 3

2 ทฤษฎี……..……..……..……..……..……..... 6

2.1 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร…….……..…. 6

2.2 ส่วนประกอบในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร…….……. 7

2.3 การไฮโดรไลท์โมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร……. 11

2.4 การวิเคราะห์หาเยื่อใยในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร…….. 15

2.5 เคมีรังสีของโพลิเมอร์……..…... 16

2.6 การใช้ประโยชน์จากการย่อยสลายโพลิเมอร์ (polymer degradation)……. 21

3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย……..……..……..…….. 23

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย……..……. 23

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย……..…….. 23

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย……..……..…….. 23

3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย……..…… 25

บทที่ หน้า

4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย……..……..……... 28
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในฟางข้าว ชานอ้อย และ เปลือกทุเรียน….. 28
4.2 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริก…..……...……. 29
4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส ด้วยเครื่อง HPLC …….…….... 48
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ……...…… 50
รายการอ้างอิง……..……... 51
บรรณานุกรม..... 53
ภาคผนวก……..……. 54
ภาคผนวก ก...……. 55
ภาคผนวก ข...……. 58
ภาคผนวก ค...……. 60
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์……..…….. 63

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

1.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วย 1% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 30 นาที และการไฮโดรไลซ์ด้วย 1% กรดซัลฟูริก ร่วมกับการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 500 kGy……..... 3

2.1 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยกรด……...…...……..... 14

2.2 โพลิเมอร์ที่เกิด cross-linking และ degradation ได้……..……..... 19

2.3 ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาขณะฉายรังสีโพลิเมอร์ (ต้นกำเนิดรังสีแกมมา หรือ fast electron, อุณหภูมิห้อง และไร้ออกซิเจน)……..... 20

3.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลท์ ด้วยเครื่อง HPLC..... 27

4.1 ปริมาณเยื่อใยในฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน…..……..... 28

4.2 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที…..... 29

4.3 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที…….……..... 31

4.4 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที …….…..... 32

4.5 ผลการย่อยสลายโมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที…….…..... 34

4.6 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ที่อุณหภูมิ110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที…..... 35

4.7 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที……...……..... 37

4.8 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที …….…..... 39

4.9 ผลการย่อยสลายโมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที …….…..... 40

ตาราง หน้า

4.10 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที……..... 42
4.11 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที……..……..... 43
4.12 ผลการไฮโดรไลท์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที …….…….....44
4.13 ผลการย่อยสลายโมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที……..……..... 46
4.14 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในโมเลกุลของฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน ที่ผ่านการไฮโดรไลท์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที……..... 47
4.15 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส ในโมเลกุลของชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว ที่ผ่านการไฮโดรไลท์ด้วยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที……..... 49
ค.1 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลกลูโคสมาตราฐาน..... 60
ค.2 พื้นที่ใต้พีคของน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส..... 61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

2.1 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส……..……..... 8

2.2 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส…….…….…..... 9

2.3 สูตรโครงสร้างของลิกนิน……..……..... 10

2.4 กลไกปฏิกิริยาการไฮโดรไลท์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก..……..... 12

2.5 ปฏิกิริยาของอัลโดสกับ Cu_2SO_4……..... 14

2.6 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อโพลิเมอร์ถูกฉายรังสี…….……...…….…..... 17

3.1 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร……..... 23

3.2 เครื่อง autoclave……..... 24

3.3 เครื่อง spectrophotometer……..... 24

4.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อย ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที……..... 30

4.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อย ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที……..... 32

4.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อย ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที……..... 33

4.4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อย ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที…..……..... 34

4.5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที…..……..... 36

4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที……..... 38

ภาพประกอบ หน้า

4.7 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของชานอ้อยโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที……..……..…..... 39
4.8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที…..……..……..... 41
4.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที……..... 42
4.10 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที..... 44
4.11 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที.....……..…..... 45
4.12 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลท์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที……..... 46
4.13 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในโมเลกุลของฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน ที่ผ่านการไฮโดรไลท์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที……..... 47
4.14 แสดงพีคของน้ำตาลไซโลส (1), น้ำตาลอะราบิโนส (2) และน้ำตาลกลูโคส (3) จากการไฮโดรไลท์โมเลกุล ชานอ้อย (ก), เปลือกทุเรียน (ข) และฟางข้าว (ค) ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที……..... 48
ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลกลูโคสมาตราฐานที่ 520 นาโนเมตร..... 60
ค.1 ความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีคกับปริมาณสารละลายมาตราฐาน..... 62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอยู่หลายชนิด เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ซังข้าวโพด เปลือกข้าวโพด กากปาล์ม เปลือกผลไม้ ฯลฯ เหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก ในการที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์นั้นยังมีข้อจำกัดอยู่ เนื่องจากโครงสร้างหลักของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประกอบด้วย เซลลูโลส 40-60% เฮมิเซลลูโลส 20-30% และลิกนิน 7-15% (1) ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้เป็นส่วนที่ถูกย่อยได้ยาก ดั้งนั้นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ก็คือ การย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งส่วนใหญ่แล้วน้ำตาลที่ได้จะเป็นน้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลไซโลส

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โดยปริมาณน้ำตาลที่ได้จะขึ้นกับสภาวะในการไฮโดรไลซ์ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อย อุณหภูมิและความดันระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และอีกวิธีหนึ่ง คือ การย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ด้วยรังสีก่อนจากนั้นจึงทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดต่อไป ซึ่งรังสีจะช่วยย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ด้วยกรด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยรังสีแกมมากับกรดในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นน้ำตาล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ ได้แก่ เปลือกทุเรียน ชานอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาล และฟางข้าว
2. ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในการฉายรังสี ได้แก่ Co-60
3. สารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ ได้แก่ กรดซัลฟูริก
4. หาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยโมเลกุลของเปลือกทุเรียน ชานอ้อย และฟางข้าว ให้เป็นน้ำตาล ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก อุณหภูมิ ระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด และปริมาณรังสี เปรียบเทียบกับ control โดยใช้กรด
5. วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลด้วยวิธีทางเคมี หรือเครื่องมือวิเคราะห์

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมตัวอย่าง โดยนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เปลือกทุเรียน ชานอ้อย และฟางข้าว มาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง แล้วนำมาบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร
3. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาค่า เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยใช้ค่า NDF ADF และADL
4. ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด และปริมาณรังสีแกมมา
5. วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาล
6. ใช้สภาวะที่เหมาะสมผลิตน้ำตาลจากเปลือกทุเรียน ชานอ้อย และฟางข้าว เพื่อเป็นตัวอย่างในการผลิต
7. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยโมเลกุลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในเปลือกทุเรียน ชานอ้อย และฟางข้าว เพื่อให้เป็นน้ำตาล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Dela Rosa และคณะ (2) ทำวิจัยเรื่อง Radiation pretreatment of cellulose for energy production เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยโมเลกุล เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ให้เป็นน้ำตาล โดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด และรังสีร่วมกับการไฮโดรไลซ์กรด ตัวอย่างที่ใช้ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ และเปลือกข้าวโพด ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณรังสีแกมมา 500 kGy 1% กรดซัลฟูริก และระยะเวลาที่ใช้ 30 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด และการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดร่วมกับการฉายรังสี 500 kGy แสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วย 1% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 30 นาที และการไฮโดรไลซ์ด้วย 1% กรดซัลฟูริก ร่วมกับการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 500 kGy

ตัวอย่าง	Reducing sugar (%)	
	ไฮโดรไลซ์ด้วยกรด	ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดร่วมกับการฉายรังสี ที่ 500 kGy
ฟางข้าว	9	42
แกลบ	4	13
เปลือกข้าวโพด	8	18

จากผลการวิจัย พบว่า การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดอย่างเดียวได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพียง 9%, 4% และ 8% ในตัวอย่างฟางข้าว แกลบ และเปลือกข้าวโพด ตามลำดับ แต่เมื่อใช้รังสีร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น กล่าวคือ มีค่า 42%, 13%, และ 18% ตามลำดับ

2. S. Ait Si Mamar และ A. Hadjadj (3) ทำวิจัยเรื่อง Radiation pretreatments of cellulose materials for the enhancement of enzymatic hydrolysis เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงฟางข้าวก่อนการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ cellulase โดยการฉายรังสี และฉายรังสีตัวอย่างที่แช่ด้วยกรดซัลฟูริก ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณรังสีที่ต่ำกว่า 0.5 MGy ไม่มีผลต่อปริมาณรีดิวซ์ที่ได้ ในทางตรงกันข้ามที่ปริมาณรังสี 0.5-2 MGy ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มมากขึ้น และการฉายรังสีในฟางข้าวแห้งได้ผลดีกว่าในฟางข้าวที่แช่ด้วยกรดซัลฟูริก สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ด้วย cellulase คือ pH 4.45 อุณหภูมิ 120 °C เวลา 24 ชั่วโมง

3. Neureiter, M. และคณะ (4) ทำวิจัยเรื่อง Dilute acid hydrolysis of softwood chips for the production of hemicellulose sugars เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส ในตัวอย่าง spruce chips ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการ hydrolysis คือ ที่อุณหภูมิ 170 °C ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 14 นาที และ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 0.4% ทำให้ได้น้ำตาลเพิ่มขึ้น 16.5% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดอย่างเดียว

4. C. Roberto และคณะ (5) ทำวิจัยเรื่อง Dilute-acid hydrolysis for optimization of xylose recovery from rice straw in a semi-pilot reactor ทำการศึกษาผลของกรดซัลฟูริก และระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ให้เป็นน้ำตาลไซโลส ทำการวิจัยโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1.0, 1.3 และ 1.6% (w/v) ที่อุณหภูมิ 121 °C ระยะเวลาที่ใช้ 10, 20 และ 30 นาที ผลการวิจัยพบว่า สภาวะที่ให้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดคือ สภาวะที่ให้น้ำตาลไซโลสสูงสุด คือ 1.6% กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 30 นาที ได้น้ำตาลไซโลส และกลูโคส เท่ากับ 20.5 และ 6.3 g/l ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ปริมาณน้ำกลูโคสสูงมีผลต่อการเปลี่ยนน้ำตาลไซโลสให้เป็นสาร xylitol จึงพิจารณาอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำตาลไซโลสต่อปริมาณน้ำตาลกลูโคส ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวด้วยกรดซัลฟูริก คือ 1.0% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 121 °C เวลา 30 นาที

5. R. Aguilar และคณะ (6) ทำวิจัยเรื่อง Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริก ในการผลิตน้ำตาลไซโลส โดยใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 2%, 4% และ 6% ที่อุณหภูมิ 100, 122 และ 128 °C เวลาที่ใช้ 0-300 นาที จากผลการวิจัยพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ 2% กรดซัลฟูริก อุณหภูมิ 122 °C เวลา 24 นาที ผลที่ได้คือ ปริมาณน้ำตาลไซโลส 21.6 กรัมต่อลิตร, ปริมาณน้ำตาลกลูโคส 3 กรัมต่อลิตร, furfural 0.5 กรัมต่อลิตร และ acetic acid 3.65 กรัมต่อลิตร

6. ขวัญชนก จันทร์สว่าง (7) ทำวิจัยเรื่อง การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมา ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือยูเรีย เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว เถาถั่วลิสง กากอ้อย ไปฉายรังสีร่วมกับการหมักด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือยูเรีย และวิเคราะห์หาค่า NDF ADF และ ADL ผลการวิจัยพบว่า ที่ปริมาณรังสีแกมมา 15 kGy ร่วมกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณ NDF ADF และ ADL ลดลงได้มากกว่าการใช้รังสีร่วมกับยูเรีย ซึ่งผลของปริมาณ NDF ADF และ ADL ที่ลดลงใน

ฟางข้าว กากอ้อย และเถาถั่วลิสง เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 50-52%, 48-49% และ 46% ตามลำดับ และเมื่อใช้สารละลายยูเรียเท่ากับ 25 %, 9 % และ 14-17% ตามลำดับ

7. ระวีวรรณ แกล้วกล้า (8) ทำวิจัยเรื่อง การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเอทานอล จากฟางข้าว โดยการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยพบว่าวิธีการปรับสภาพวิธีที่ดีที่สุด คือ การแช่ฟางข้าวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที จากนั้นนำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสซีเตทบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่มีค่าสภาพความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.0 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการย่อย 16 ชั่วโมง ที่สภาวะดังกล่าวสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 557.07 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลลูโลส ซึ่งคิดเป็นค่าการเปลี่ยนเทียบ เท่ากับปริมาณเซลลูโลสเท่ากับ 49.58% สารละลายน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้หลังจากเติมสารอาหารที่จำเป็น และปรับค่าสภาพความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสมกับการเจริญของเชื้อยีสต์ (Saccharomyces cerevisiae) สายพันธุ์ TISTR 5013 แล้ว นำไปหมักที่อุณหภูมิห้อง ในสภาวะแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นเวลา 4 วัน จะได้เอทานอลเข้มข้น 1.3% โดยปริมาตร ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้นได้เมื่อนำไปกลั่น

8. อำนวย ขวัญเมือง (9) ทำวิจัยเรื่อง การหมักแอลกอฮอล์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้ เซลลูเลสและ Saccharomyces cerevisiae เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับ การหมักเอทานอลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ซังข้าวโพด ชานอ้อย และต้นมันสำปะหลัง โดยใช้เอนไซม์จากเชื้อราย่อยสลายเซลลูโลสเป็น น้ำตาลกลูโคส และหมักน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอล การย่อยสลายฟางข้าว ซังข้าวโพด ชานอ้อย และต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพในด่าง ด้วยเอนไซม์เพื่อการค้าและเอนไซม์ที่ผลิตได้จากเชื้อรา T. reesei QM 6a การย่อยสลายด้วยเอนไซม์เพื่อการค้าให้ผลผลิตของน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 0.720 0.693 และ 0.525 กรัมต่อกรัมsubstrate ผลผลิตของน้ำตาลกลูโคส เท่ากับ 0.353 0.345 และ 0.276 กรัมต่อกรัม substrate ในฟางข้าว ซังข้าว-โพด และชานอ้อย ตามลำดับ การย่อยสลายด้วยเอนไซม์เซลลูเลส จากเชื้อรา T. reesei QM 6a ให้ผลผลิตของน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 0.328 0.289 และ 0.216 กรัมต่อกรัมsubstrate ผลผลิตของน้ำตาลกลูโคสเท่ากับ 0.170 0.132 และ 0.158 กรัมต่อกรัม substrate ในฟางข้าว ซังข้าวโพด และชานอ้อย ตามลำดับ ส่วนต้นมันสำปะหลังไม่เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเมื่อใช้ทั้ง 2 วิธี การหมักเอทานอลจากวัสดุที่ย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์เพื่อการค้า และเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อรา T. reesei QM 6a ผลผลิตของเอทานอลในฟางข้าว เท่ากับ 0.145 และ 0.133 กรัมต่อกรัม substrate ซังข้าวโพดเท่ากับ 0.251 และ 0.156 กรัมต่อกรัม substrate และชานอ้อยเท่ากับ 0.156 และ 0.172 กรัมต่อกรัม substrate จากการย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อการค้าและเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อรา T. reesei QM 6a ตามลำดับ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (7)

ฟางข้าว

ส่วนของต้นข้าวที่ตัดออกจากต้นพร้อมเมล็ด เรียกว่า “รวงข้าว” เมื่อแยกเอาเมล็ดออกแล้วที่เหลือเรียกกว่า “ฟางข้าว” ซึ่งประกอบด้วยส่วนยอดของลำต้นใน และกาบใบติดอยู่ด้วยฟางข้าวจะมีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พันธุ์ข้าว ความสมบูรณ์ของดิน การให้ปุ๋ย การเก็บเกี่ยว และการเก็บรักษา เป็นต้น

กากอ้อย

กากอ้อย เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากต้นอ้อย โดยต้นอ้อยจะต้องผ่านการทำความสะอาดและตัดใบทิ้งก่อนนำเข้าสู่โรงงานเพื่อหีบน้ำอ้อย หลังจากหีบน้ำอ้อยออกแล้วจะเหลือแต่ส่วนกากใยเรียกว่า กากอ้อย ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ด้วยกัน คือ

1. ส่วนกลางของต้นอ้อย (center portion) จะประกอบด้วย ขุยอ้อย หรือ parenchyma cell ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง (ไม่รวมน้ำอ้อย) ซึ่งขุยอ้อยนี้จะไม่มีลักษณะของเส้นใย ส่วนใหญ่อยู่ตรงกลางของลำต้นมีทิศทางขนานไปกับความยาวของลำต้น แต่ขุยอ้อยบางส่วนจะมี ทิศทางตามภาคตัดขวางของลำต้น โดยมีมัดเส้นใยเดี่ยวฝังอยู่ในส่วนขุยอ้อยนี้ บริเวณตรงกลางของ ต้นอ้อย มีมัดเส้นใยกระจายอยู่สูงถึง ร้อยละ 15 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง เส้นใยที่พบมีทั้งแบบผนังเซลล์บาง ลูเมนกว้าง และเส้นใยสั้นผนังหนา นอกจากนี้ยังพบ vessel element ที่มีผนังเซลล์หนาด้วย

2. ส่วนเนื้ออ้อยหรือแกนอ้อย ส่วนนี้ของต้นอ้อยประกอบด้วยส่วนที่เป็นมัดเส้นใยคุณภาพดีประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง ซึ่งรวมกันแน่นที่แกนของต้นอ้อย ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้น เพราะว่ามีโครงสร้างที่แข็งแรง มัดเส้นใยของต้นอ้อยนี้เรียงตัวขนานกับลำตันของอ้อย ยกเว้นมัดเส้นใยซึ่งอยู่ที่ส่วนข้อของต้นอ้อย เส้นใยในชั้นของแกนนี้มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยที่อยู่ในส่วนขุยอ้อย และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาเคมีดีกว่า จากการที่มัดเส้นใยนี้ขนานกับลำต้นทำให้สามารถแยกจากกันได้ง่ายเมื่อเทียบกับส่วนขุยอ้อย ที่ส่วนแกนของต้นอ้อยมีเส้นใยรวมกันอยู่อย่างหนาแน่น โดยเส้นใยแต่ละเส้นจะเชื่อมติดกันตามความยาวของเส้นใย

3. ส่วนเปลือกอ้อย เป็นส่วนที่อยู่นอกสุดของต้นอ้อย เป็นส่วนซึ่งบางที่สุด แต่มีความหนาแน่นสูงมากประกอบด้วยไขมันและวัสดุอื่น ๆ ส่วนเปลือกอ้อยนี้มีประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนัก

เปลือกทุเรียน (10)

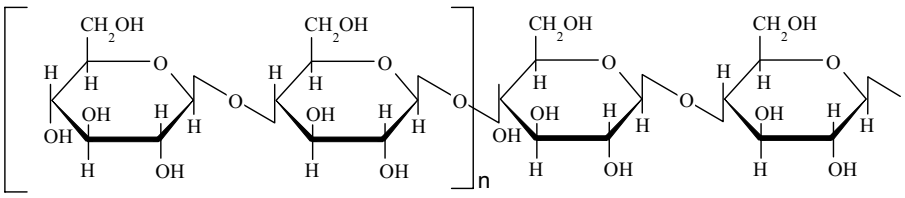
ทุเรียนเป็นพืชในวงศ์ (family) Bombacaceae อยู่ในสกุล (Genus) Durio มีชื่อทางพฤษศาสตร์ว่า Durio zibethinus Linn. การศึกษาเบื้องต้น พบว่ามีส่วนประกอบของสารคาร์โบไฮเดรตคล้ายพวก เพคติน ทุเรียนเป็นผลไม้ที่นิยมเพาะปลูกมากโดยเฉพาะในประเทศไทย ในแต่ละปีจะมีขยะเหลือทิ้งของเปลือกทุเรียนมากมาย

2.2 ส่วนประกอบในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสิก (lignocellulosic material) ชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ และสภาวะที่เจริญเติบโต

โครงสร้างเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช ช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่พืช โดยธรรมชาติจะไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระแต่มักรวมกับลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนโตแซน (pentosan) กัม (gum) แทนนิน (tannins) ไขมัน (lipid) และสารเกิดสี (colouring matter) เป็นต้น และมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ เนื่องจากประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสต่อกันโดย β-1,4-glycosidic linkage เป็นเส้นตรง ไม่มีแขนง เรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบ โดยระหว่างสายแต่ละสายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) โดยเกิดขึ้นระหว่าง hydroxyl group ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมต่อกับโมเลกุลของหน่วยย่อยของ เส้นสายเซลลูโลสอีกเส้นสายหนึ่ง พันธะไฮโดรเจนที่กล่าวมามีส่วนช่วยทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสซับซ้อนมั่นคง และยากต่อการย่อยสลายมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.1 เซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลท์ได้ในกรดแก่ ถ้าการย่อยเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

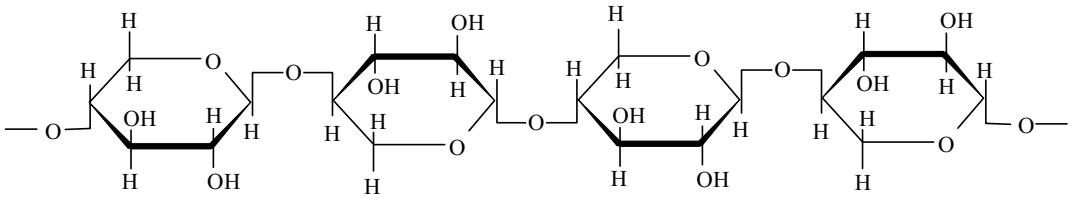
เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentose) ซึ่งส่วนมากเป็นดี-ไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (xylose) หลาย ๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะ β-1,4-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2 สายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (heterogenous) ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดปนกันคือ

- เพนโตแซน (pentosan) ส่วนใหญ่เป็นไซแลน (xylan) และอะราแบน (araban) เมื่อนำไปย่อย จะได้น้ำตาลไซโลส และอะราบิโนส (arabinose) ไซแลนเป็นสารที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าสารอื่น

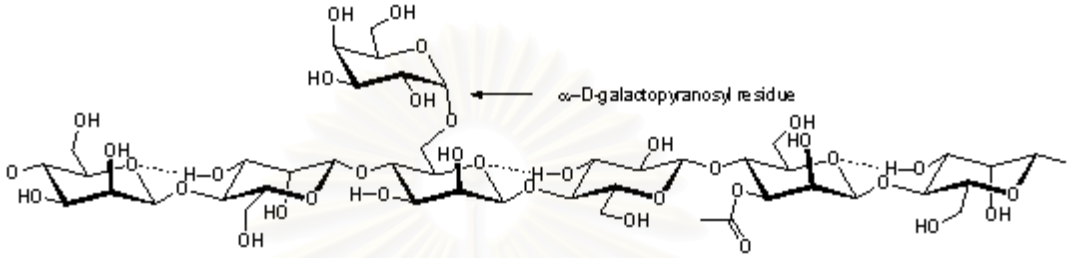
- เฮกโซแซน (hexosan) ส่วนใหญ่เป็น แมนแนน (mannan) กาแลคแทน (galactan) และกลูแคน (glucan) เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแลคโตส (galactose) และกลูโคส ตามลำดับ

- โพลียูโรไนด์ (polyuronides) ส่วนมากเป็นสารประกอบของกรดโพลียูโรนิค (polyuronic acid) และยังพบกรดยูโรนิค (uronic acid) ปนอยู่ด้วย ที่สำคัญ คือ เฮกซูโรนิค (hexuronic acid) เช่น เบตา-ดี-กลูคูโรนิค (β-D-glucuronic) เบตา-ดี-แมนมูโรนิค (β-D-mammuronic)

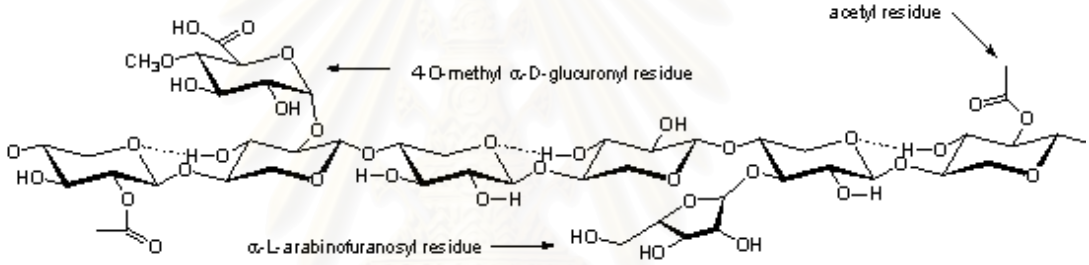
ข้อแตกต่างของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลท์ด้วยกรดเจือจาง ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้สายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขามากกว่า และมีความยาวของสายโพลีเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส



ก. hemicellulose (1)



ข. Graminaceous hemicellulose (11)

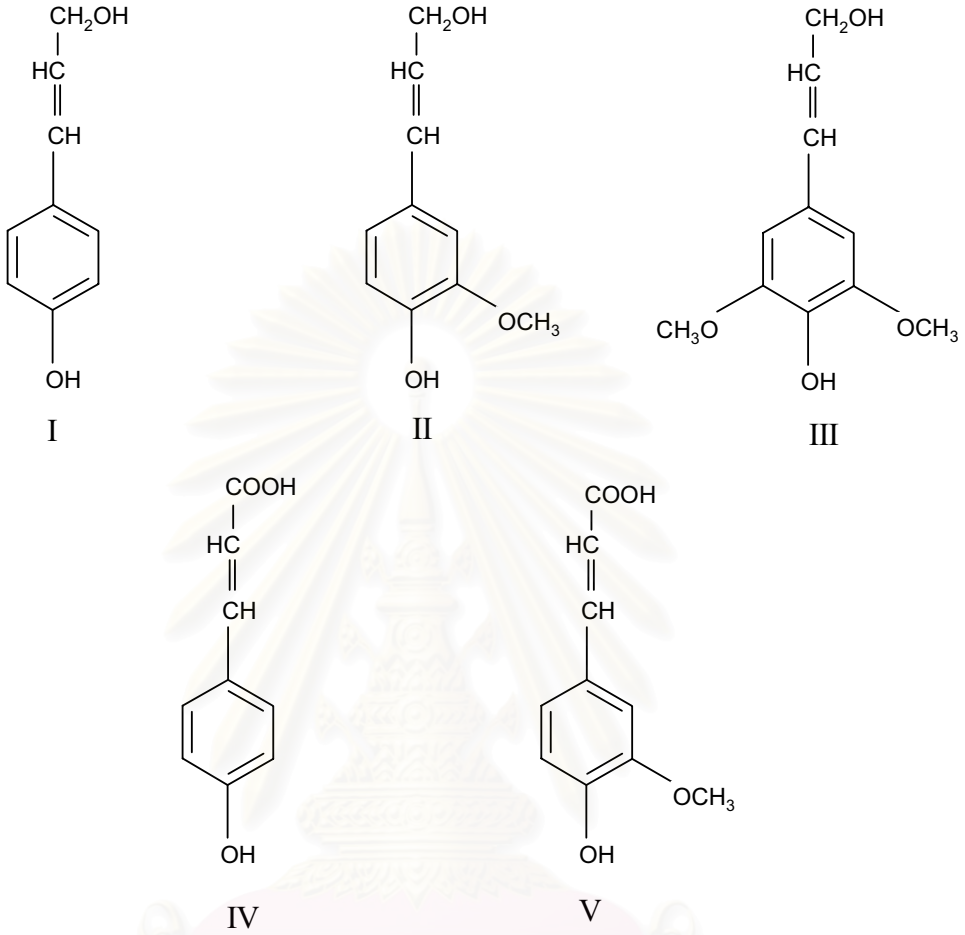


ค. Softwood hemicellulose (11)

รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

โครงสร้างลิกนิน

ลิกนินไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต แต่จะทำหน้าที่เคลือบผนังเซลล์พืช เป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) หรือเรียกว่าเป็น ฟีโนลิกโพลีเมอร์ (phenolic polymer) โดยมีหน่วย ฟีนิลโพรเพน (phenyl propane unit) เรียงต่อกันแบบสุ่ม (random) ที่หน่วยฟีนอล (phenol unit) อาจเป็น กัวอิเอซิล (guaiacyl) หรือ ไซรินกิล (syringyl) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ที่ตำแหน่งแอลฟา และเบตาของโมเลกุลลิกนิน อาจเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุล หรือคาร์บอนในหน่วยฟีนอล อาจเกิดพันธะกับคาร์บอนในอีกหน่วยหนึ่งภายในสายโพลีเมอร์ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลลิกนิน ทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น ในเอทานอล (ethanol) หรือเมทานอล (methanol) ที่ร้อน และในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปกติลิกนินจะอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืชบริเวณรอบ ๆ เซลลูโลส โดยเป็นตัวป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยอีกด้วย



I = p-coumary alcohol

II = coniferry alcohol

III = sinapyl alcohol

IV = p-coumaric acid

V = feuric acid

รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของลิกนิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การไฮโดรไลท์โมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (8)

การไฮโดรไลท์ด้วยสารเคมี (Chemical Hydrolysis)

เป็นการย่อยด้วยสารละลายกรดหรือสารละลายด่าง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการทำลายพันธะไกลโคสิดิก ระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจน (oxygen) เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาล เมื่อนำมาทำการย่อยจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ดังสมการ 2-1 และ 2-2 ถ้าเซลลูโลสถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ จะให้น้ำตาลกลูโคสเพียงอย่างเดียว ถ้าการย่อยไม่สมบูรณ์จะได้ทั้งกลูโคส เซลโลไบโอส (cellobiose) และโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) ปนกัน ส่วนเฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกย่อย จะให้น้ำตาลเพนโตสหลายชนิดปนกัน ขึ้นกับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

$$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \longrightarrow nC_6H_{12}O_6 \qquad (2\text{-}1)$$

เฮกโตแซน เฮกโซส

$$(C_5H_8O_4)_m + mH_2O \longrightarrow mC_5H_{10}O_5 \qquad (2\text{-}2)$$

เพนโตแซน เพนโตส

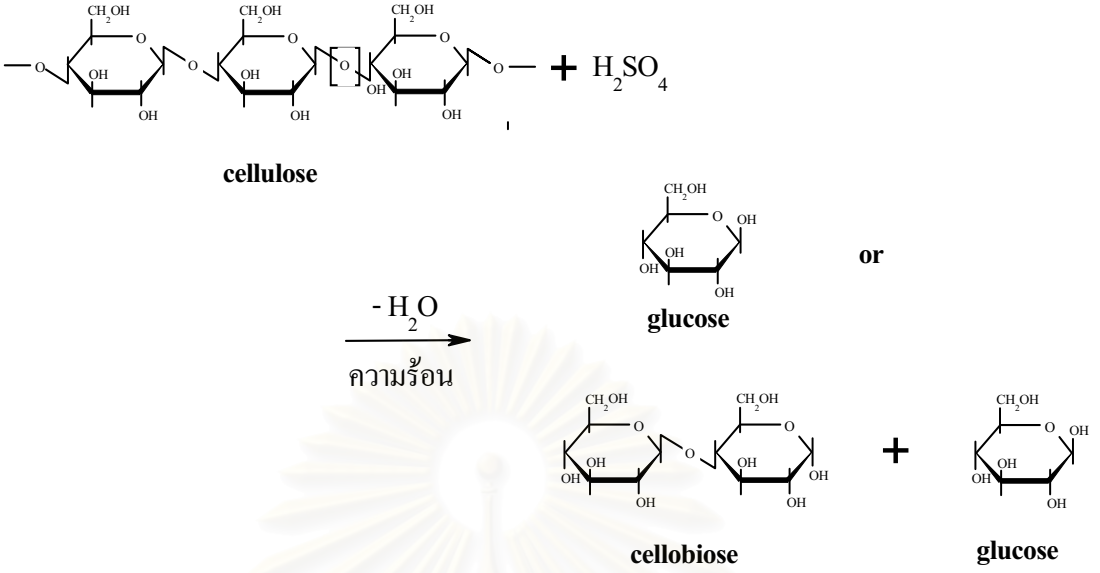
การย่อยด้วยสารเคมีแบ่งเป็น 2 วิธีคือ

1. การย่อยด้วยกรด (Acid Hydrolysis) แบ่งเป็น 2 กระบวนการคือ

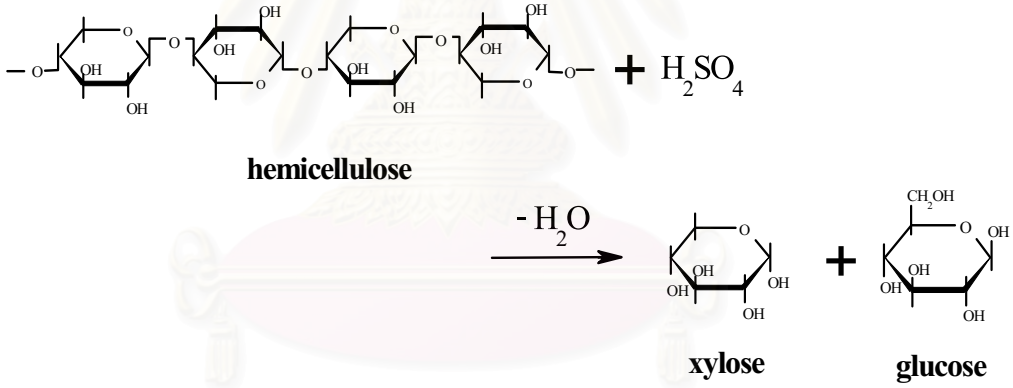
1.1 กระบวนการแบบโฮโมจีนีส (Homogeneous Process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริก (hydrocloric acid) หรือ กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ คือ น้ำตาลกลูโคส

1.2 กระบวนการแบบเฮเทอโรจีนีส (Heterogeneous Process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดอ่อนกว่า แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. การไฮโดรไลท์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลเซลลูโลส



ข. การไฮโดรไลท์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลเฮมิเซลลูโลส

รูปที่ 2.4 กลไกปฏิกิริยาการไฮโดรไลท์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก

การไฮโดรไลท์ด้วยกรดเจือจาง (5)

กรด (HCl, H_2SO_4, CH_3COOH หรือ HF) สามารถปลดปล่อยโปรตอนเพื่อมาทำลายพันธะ heterocyclic ether ระหว่างน้ำตาลโมโนเมอร์ ในรูปของสาย polymeric ของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ในการแตกของพันธะนี้ จะได้น้ำตาลไซโลส, กลูโคส, อะราบิโนส และสารอื่น ๆ เช่น oligomer, furfural และ acetic acid ในการไฮโดรไลท์ด้วยกรดเจือจางเกือบทั้งหมดจะเกิดใน

เฮมิเซลลูโลส เนื่องจากพันธะของเฮมิเซลลูโลสอ่อนแอกว่าเซลลูโลส กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ คือ เซลลูโลส และลิกนิน สามารถนำกากเหล่านี้ไปผลิตเป็นน้ำตาลกลูโคส หรือนำน้ำตาลกลูโคสที่ได้ไปผลิต lactic acid หรือเอทานอล ส่วนสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลท์ในตัวอย่างสามารถเปลี่ยนไปเป็นสาร xylitol หรือ single cell protein

ปฏิกิริยาการไฮโดรไลท์ของน้ำตาลโพลิเมอร์ด้วยกรดเจือจาง ในตัวอย่างที่ใช้มีสถานะเป็นของแข็ง และทำปฏิกิริยาในสถานะของเหลว มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

1. โปรตอนจากกรดเข้าไปจับกับ lignocellulosic matrix
2. เกิดการให้โปรตอน (H^+) ของออกซิเจน จากพันธะ heterocyclic ether ระหว่างน้ำตาลโมโนเมอร์
3. เกิดการแตกของพันธะ ether
4. เกิด carbocation intermediate
5. carbocation ถูกละลายด้วยน้ำ
6. มีการสร้างโปรตอน เพิ่มขึ้นมาใหม่ พร้อมกับเกิดน้ำตาลโมโนเมอร์, oligomer, หรือโพลิเมอร์ ขึ้นกับตำแหน่งการแตกของพันธะ ether

2. การย่อยด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis)

สารละลายที่นิยมใช้ คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง เอทีลีนไดอะมีน (ethylene diamine) และแอมโมเนีย (ammonia) เป็นต้น การใช้สารละลายด่างในการย่อย จะทำให้สายของโพลีแซคคาไรด์สั้นลง

การไฮโดรไลท์ด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis)

เอนไซม์เป็นโปรตีนหนึ่งที่สิ่งมีชีวิตสร้างขึ้น เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเร่ง (catalyst) ปฏิกิริยาภายในเซลล์ เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง ในสภาวะการทำงานที่เหมาะสมจะสามารถเร่งปฏิกิริยาได้เร็วถึง 10^8 ถึง 10^{11} เท่า เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง นอกจากนี้เอนไซม์ยังมีความเฉพาะ (specificity) ต่อปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ เท่านั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง แม้ว่าเอนไซม์จะถูกสร้างและอยู่ภายในเซลล์สิ่งมีชีวิต แต่สามารถสกัดออกมาใช้งานได้เช่นเดียวกับเมื่ออยู่ในเซลล์

เอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยเซลลูโลส คือ เอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งรา และแบคทีเรีย ที่นิยมนำมาใช้คือ เซลลูเลสที่ได้จาก T.reessi

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยกรด

ผลดี	ผลเสีย
1. ปฏิกิริยาเกิดเร็ว ง่าย และสั้น 2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีราคาถูก และหาง่าย 3. ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ (กรณีใช้กรดแก่) 4. ให้ผลิตภัณฑ์สูง (กรณีใช้กรดแก่)	1. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่เจาะจงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่บริสุทธิ์ 2. ต้องใช้อุณหภูมิสูง (กรณีใช้กรดอ่อน) 3. น้ำตาลที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสารอื่น เช่น เฟอฟูรัล และสารเคมีอื่น ๆ 4. ผลพลอยได้ของปฏิกิริยาการย่อยด้วยกรด เช่น เฟอฟูรัล เป็นพิษ

น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugars)

น้ำตาลรีดิวซ์ คือ น้ำตาลที่สามารถถูกออกซิไดส์ ไปเป็น carboxylic acids ได้แก่ โมโนแซคคาไรด์ประเภทอัลดีไฮด์ (aldehyde) เนื่องจากหมู่อัลดีไฮด์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิไดส์ เช่นน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อะราบิโนส และกาแลคโตส และไดแซคคาไรด์ที่เป็นน้ำตาลริดิวซ์ เช่น แลคโตส มอลโตส และเซลโลไบโอส

สารที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติของน้ำตาลรีดิวซ์ คือ Benedict's solution กับ Fehling's solution สารละลายทั้งสองชนิดนี้มีสภาพเป็นด่าง และมีสารออกซิไดส์ (oxidizing agent) ในรูปของเกลือทองแดง คือ Cu_2SO_4 ละลายอยู่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในปฏิกิริยานี้อัลโดส (aldose)จะรีดิวซ์ Cu^{2+} ให้กลายเป็น Cu^{+} ในรูปตะกอนสีแดงของ Cu_2O (cuprous oxide) ส่วนอัลโดสจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดน้ำตาล (aldonic acid) โมโนแซคคาไรด์ที่สามารถให้ตะกอนสีแดงกับสารที่ใช้ทดสอบทั้งสองชนิดนี้ จะเรียกว่าน้ำตาลรีดิวซ์ วิธีสามารถวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลาย ซึ่งไม่มีความจำเพาะว่าจะต้องเป็นน้ำตาลตัวใด

Aldose aldonic acid ตะกอนแดง

รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาของอัลโดสกับ Cu_2SO_4

โมโนแซคคาไรด์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) คือ โมโนแซคคาไรด์ชนิดอัลโดส คือ สามารถให้อิเลคตรอนได้เหมือนกับสารประกอบอัลดีไฮด์ทั่วไป โดยอัลโดสที่ละลายอยู่ในน้ำ วงแหวนจะเปิดออก เพื่อเปลี่ยนจากอะโนเมอร์หนึ่งไปเป็นอีกอะโนเมอร์หนึ่งโดยผ่านตัวกลางที่อยู่ในรูปโซ่เปิดที่มีหมู่อัลดีไฮด์อิสระ เช่น น้ำตาลกลูโคส ไซโลส อะราบิโนส กาแลคโตส และแมนโนส เป็นต้น

โมโนแซคคาไรด์ชนิดคีโตสสามารถทำปฏิกิริยากับสาร Benedict's solution และ Fehling's solution ได้ เนื่องจากในสารละลายที่เป็นด่างจะทำให้คีโตสถูกเปลี่ยนเป็นอัลโดสได้โดยปฏิกิริยา tautomerization ดังนั้นคีโตสจึงมีคุณสมบัติเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ด้วย

ในไดแซคคาไรด์บางตัวมีคุณสมบัติในการน้ำตาลรีดิวซ์ ถ้าหากหมู่ –OH ที่ต่อกับ anomeric carbon ของโมโนแซคคาไรด์ตัวหลังยังเป็นอิสระที่จะทำให้วงแหวนเปิดออกได้ เช่น แลคโตส, มอนโตส และเซลโลไบโอส

2.4 การวิเคราะห์หาเยื่อใยในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (12)

เยื่อใย (fiber) เป็นสารประกอบพวกอินทรีย์วัตถุที่ปราศจากไขมัน จัดอยู่ในพวกคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) มีอยู่ประมาณ 50-80% ของวัตถุแห้ง (dry matter) สูตรโครงสร้างประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยอัตราส่วนระหว่าง H:O เป็น 2:1 เท่ากับในโมเลกุลของน้ำ

คาร์โบไฮเดรตแบ่งตามลักษณะและหน้าที่ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Structural carbohydrate ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืช ทำให้พืชคงรูปร่างอยู่ได้ คาร์โบไฮเดรตประเภทนี้คือเยื่อใยชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน คิวติน ซิลิกา ฯลฯ โดยมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 95% เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ประมาณ 3% ของเยื่อใยทั้งหมด

2. Non-structural carbohydrate อยู่ในรูปเป็นอาหารสะสมของพืช ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล

พืชทุกชนิดจะมีคาร์โบไฮเดรตทั้ง 2 ประเภทนี้ประกอบอยู่ แต่จะมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เช่น เมล็ดจะมีปริมาณแป้งมาก แต่ใบหรือลำต้นจะมีเยื่อใยมาก เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น การสะสมเยื่อใยก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันปริมาณโปรตีนและการย่อยได้ของวัตถุแห้งจะลดต่ำลง

Van Soest ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์เยื่อใยในพืชอาหารสัตว์ เพื่อหาปริมาณของสารเยื่อใยที่มีอยู่ โดยแบ่งส่วนประกอบของพืชอาหารสัตว์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ กลุ่มแรกเป็นส่วนประกอบภายในเซลล์ (cell content) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์ได้มาก กลุ่มหลังเป็นพวกผนังเซลล์ (cell wall) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยสารเยื่อใยชนิดต่าง ๆ ที่สามารถวิเคราะห์แยกชนิดได้ตามความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งมีส่วนที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตปะปนอยู่ด้วย

หลักการในการวิเคราะห์ก็คือ เมื่อต้มพืชตัวอย่างด้วยสารละลาย detergent ที่เป็นกลาง (neutral detergent) ส่วนที่เป็นส่วนประกอบภายในเซลล์ และเพคติน จะละลายออกมาเรียกว่า neutral detergent soluble (NDS) ส่วนที่เหลืออยู่เป็นส่วนที่ไม่ละลาย คือ ผนังเซลล์ ที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เรียกว่า neutral detergent fiber (NDF) ต่อจากนั้นนำไปต้มในสารละลาย detergent ที่เป็นกรด (acid detergent) จะไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสที่อยู่เป็นอิสระ และที่อยู่รวมกับลิกนิน ออกมา เรียกส่วนนี้ว่า acid detergent soluble (ADS) ส่วนที่เหลืออยู่ คือ เซลลูโลสและลิกนิน เรียกว่า acid detergent fiber (ADF) โดยจะถูกนำไปย่อยด้วยกรดกำมะถัน ซึ่งจะละลายเซลลูโลสออกมา ส่วนที่เหลือคือลิกนินและเถ้า ซึ่งเมื่อนำไปเผาก็สามารถทราบค่าของลิกนิน ซึ่งเรียกว่า ADL (acid detergent lignin) ได้ จากหลักการข้างต้นนี้ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้

2.5 เคมีรังสีของโพลิเมอร์

ผลเบื้องต้นที่เกิดในโพลิเมอร์ที่ถูกฉายรังสี

โดยทั่วไปเมื่อมีการดูดกลืนพลังงานรังสีโดยสสาร จะเกิดอันตรกิริยาขึ้นทั้งในนิวเคลียสและอิเล็กตรอนในวงโคจร แต่ถ้าพลังงานรังสีนั้นมีค่าต่ำกว่า 10 MeV แล้วอันตรกิริยาที่เกิดในนิวเคลียสจะมีน้อยมาก และคิดว่าไม่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะกับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุที่มีอะตอมขนาดเล็ก เช่น H, C, N, O, S เป็นต้น เมื่อรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในวงโคจรจะมีกระบวนการ 3 รูปแบบ คือ ผลจากโฟโตอิเล็กตริก การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน และการเกิดคู่ของอิเล็กตรอนบวกและลบ การจะเกิดรูปแบบใดมากน้อยต่างกันขึ้นกับพลังงานของรังสีนั้น และเลขอะตอม (ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงโคจร) ของตัวกลางที่รังสีผ่าน ในทุก ๆ รูปแบบที่เกิดจะได้อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่มาจากอะตอมของตัวกลางนั้นเสมอ อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้จะมีพลังงานมากพอที่จะก่อให้โมเลกุลข้างเคียงเกิดเป็นไอออน อิเล็กตรอน และโมเลกุลในภาวะถูกกระตุ้น (excited molecule) ต่อไปได้ ในสารอินทรีย์ยังเกิดอนุมูลอิสระ เหล่านี้ทั้งหมดจะเป็นอนุภาคหรือหมู่ที่ว่องไว (active species) และชักนำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปเป็นลูกโซ่จนกว่าจะรวมกันเองกลายเป็นโมเลกุลเดิม หรือโมเลกุลใหม่ที่สเทิน

ตัวอย่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลิเมอร์เมื่อถูกฉายรังสี

กระบวนการที่ 1 รังสีจะถ่ายเทพลังงานให้แก่โมเลกุลของโพลิเมอร์ ทำให้โพลิเมอร์ที่อยู่ในภาวะกระตุ้น เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับรังสี และเกิดจากการรวมตัวของอนุมูลอิสระของโพลิเมอร์กับอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออนไนซ์ ผลที่ได้จะเป็นโมเลกุลสเทินในภาวะถูกกระตุ้นสูง

กระบวนการที่ 2 โมเลกุลสเทินในภาวะถูกกระตุ้นสูงจะแตกตัว (dissociate) ทำให้สายโซ่ขาดเกิดเป็นอนุมูลอิสระของโพลิเมอร์ 2 สายที่มีโมเลกุลเล็กลง

กระบวนการที่ 3 หรือแยกเป็นอนุมูลอิสระอัลคิล หรืออนุมูลอิสระไฮโดรเจน และถ้า R จับกับ H หรือ H จับกันเองจะได้ก๊าซเกิดขึ้น

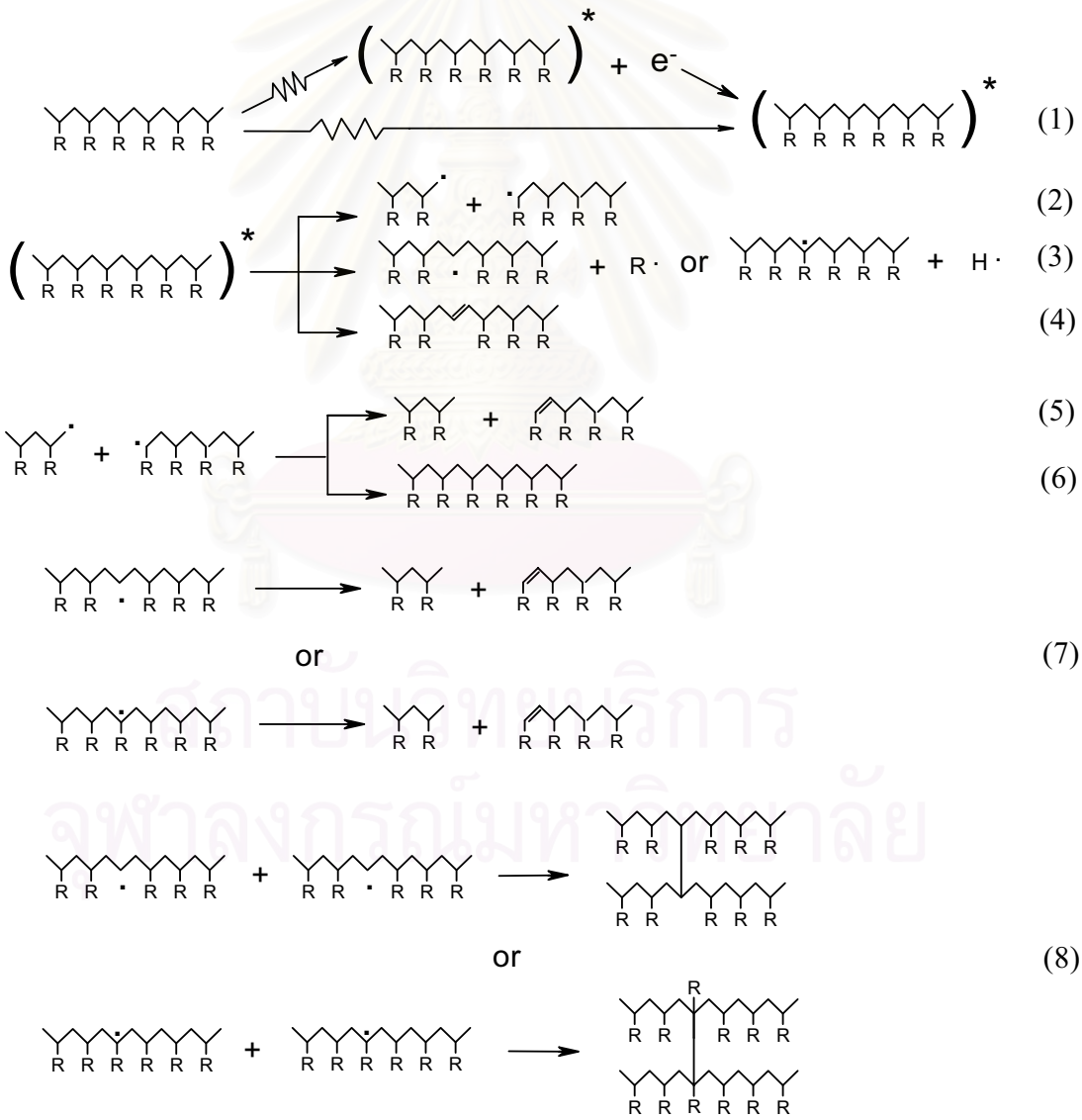
กระบวนการที่ 4 โมเลกุลสเทินในภาวะถูกกระตุ้นสูงอาจแตกตัวกลายเป็นหมู่ RH และ โพลิเมอร์ที่มีพันธะคู่ในสายโซ่ก็ได้

กระบวนการที่ 5 อนุมูลอิสระจากกระบวนการที่ 2 จะพยายามเข้าสู่ภาวะเสถียร โดยแยกออกเป็นโพลิเมอร์ขนาดเล็กลง 2 สายก็ได้

กระบวนการที่ 6 หรือรวมตัวกลายเป็นโพลิเมอร์เดิมที่สเทินก็ได้

กระบวนการที่ 7 เกิดการขาดที่สายโซ่

กระบวนการที่ 8 การเกิด cross-linking



รูปที่ 2.6 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อโพลิเมอร์ถูกฉายรังสี

ปริมาณที่บ่งถึงผลของรังสีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของสาร มักจะใช้ค่า G-value ซึ่งหมายถึงจำนวนของการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของสารโดยรังสีทำให้เกิดสารใหม่ (เกิดอนุมูลอิสระ เกิด species หรือการลดลงของสารเดิม) เมื่อมีการดูดกลืนพลังงาน 100 eV

การเกิด cross-linking และการเกิด degradation ของโพลิเมอร์โดยรังสี

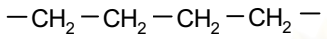
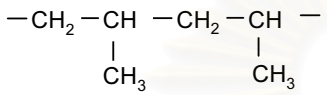
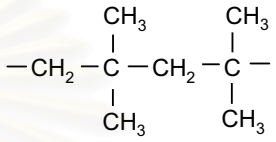
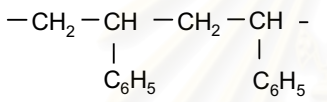
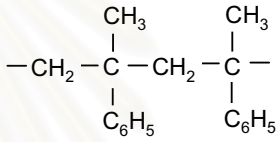
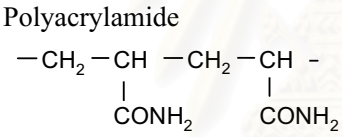
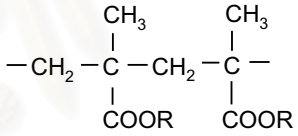
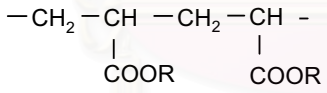
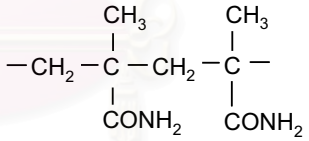
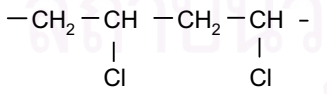
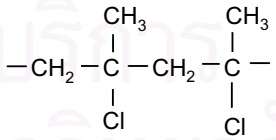
ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญที่ต้องการให้เกิดในโพลิเมอร์โดยรังสี ได้แก่ cross-linking การเกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติ หรือการทำให้สายโซ่โพลิเมอร์ขาดโดยรังสี ส่วนปฏิกิริยาอื่น ๆ เช่น การย่อยสลายโมเลกุล (degradation) โดยรังสีในโพลิเมอร์ ได้แก่ การเกิดก๊าซ เช่น H_2, CH_4, CO หรือการเกิดพันธะคู่ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยรังสีเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้คุณสมบัติของโพลิเมอร์นั้น เปลี่ยนแปลงไปได้มาก ซึ่งทำให้เกิดลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนไป และทำให้การใช้รังสีเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ โพลิเมอร์ได้ดีขึ้นไปได้ง่าย

การเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญเมื่อฉายรังสีโพลิเมอร์ ก็คือ การเกิด cross-linking และการ degradation การเกิด cross-linking โดยทั่วไปจะทำให้โมเลกุลของโพลิเมอร์แข็งแรงมากยิ่งขึ้น เช่น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความต้านแรงตึง โมดูลัสสูงขึ้น ทนทานต่อความร้อน ตัวทำละลายมากขึ้น เป็นต้น ในทางกลับกันการ degradation ของโพลิเมอร์จะมีผลในทางตรงกันข้าม

ปกติเมื่อโพลิเมอร์ถูกฉายรังสีจะเกิดการเกิด cross-linking และการ degradation ไปพร้อม ๆ กันขึ้นกับว่าโพลิเมอร์ชนิดใดจะเกิดปฏิกิริยา cross-linking หรือการ degradation มากกว่ากัน ผลเบื้องต้นที่เกิดในโพลิเมอร์ที่ถูกฉายรังสี ในปี 1954 Miller และคณะได้เสนอหลักเกณฑ์ที่จะทำนายว่าไวนิล โพลิเมอร์โครงสร้างแบบใดจะเกิด cross-linking หรือการ degradation ดังนี้ ถ้าโพลิเมอร์มีโครงสร้างในรูปแบบของ $(-CH_2-CHR-)_n$ จะเกิด cross-linking ขณะที่โพลิเมอร์มีโครงสร้างในรูปของ $(-CH_2-CR_1R_2-)_n$ จะมีโอกาสเกิดการ degradation สูงเมื่อฉายรังสี ตามตารางที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 โพลิเมอร์ที่เกิด cross-linking และ degradation ได้

Group 1 Cross-linking polymers	Group 2 Degrading polymers
Polymethylene (polyethylene) 	
Polypropylene 	Polyisobutylene 
Polystyrene 	Poly (α-methylstyrene) 
Polyacrylamide 	Polymethacrylates 
Polycrylamide 	Polymethacrylamide 
Poly (vinyl chloride) 	Poly(vinylidene chloride) 
Polyamides	Cellulose and derivatives
Polyesters	Polytetrafluoroethylene
Polyvinylpyrrolidone	Polytrifluorochloroethlene
Rubbers	
Polyacroleine	

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น

การปล่อยก๊าซ (evolution of gas)

ในระหว่างกรฉายรังสีโพลีเมอร์ จะมีก๊าซถูกปล่อยออกมา ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2.3 ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาขณะฉายรังสีโพลิเมอร์ (ต้นกำเนิดรังสีแกมมา หรือ fast electron, อุณหภูมิห้อง และไร้ออกซิเจน)

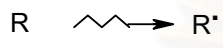
Polymer	Product
Polyethylene	H_2
Polyisopropylene	H_2
	CH_4
Polyisobutylene	H_2
	CH_4
Poly (vinyl chloride)	HCl
	H_2
	CH_4
Poly (vinyl acetate)	H_2
	CH_4
	CO
Poly (methyl methacrylete)	H_2
	CH_4
	CO
	CO_2
Polystyrene	H_2
	CH_4
Cellulose (from wood)	H_2
	CH_4
	CO
	CO_2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

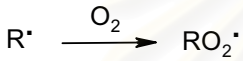
ผลของออกซิเจนขณะฉายรังสี

การฉายรังสีโพลิเมอร์ในอากาศจะทำให้การเสื่อมสลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุมูลอิสระของโพลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ กลายเป็นอนุมูลเปอร์ออกซี และเกิดการเสื่อมสลายแม้ในโพลิเมอร์ชนิดที่เกิดการเชื่อมโยงเมื่อถูกรังสี คือจะเกิด oxidative degradation ในสายโซ่หลักของโพลิเมอร์ดังนี้

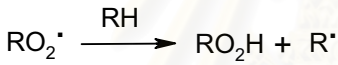
เมื่อโพลิเมอร์ถูกฉายรังสี เกิด radical ขึ้น



radical รวมตัวกับออกซิเจน



peroxy radicals รวมตัวกับอะตอมของไฮโดรเจนจากโมเลกุลของโพลิเมอร์อื่น



เกิดการรวมตัวของ peroxy radicals เกิดเป็น peroxide

ในภาวะอื่น ๆ เมื่อฉายรังสีเช่น dose rate อุณหภูมิ สารไวปฏิกิริยา (sensitizer) สารคงความเสถียร (stabilizer) เหล่านี้ล้วนมีผลต่อโพลิเมอร์เมื่อฉายรังสีทั้งสิ้น และจะต้องพิจารณาเป็นรายชนิดของโพลิเมอร์

2.6 การใช้ประโยชน์จากการย่อยสลายโพลิเมอร์ (polymer degradation)

มีการใช้ประโยชน์จากการย่อยสลายโพลิเมอร์มากมาย ที่สำคัญที่สุด คือการย่อยสลายกากจากการเกษตร และอุตสาหกรรม เพื่อนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ และสารปรุงแต่งอาหาร นอกจากนั้นก็ยังมีการพัฒนาในด้านอื่น ๆ อีก

อาหารสัตว์จากกากเซลลูโลส

กากจากการเกษตรและอุตสาหกรรม โดยมากจะประกอบด้วยเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว เปลือกเมล็ดฝ้าย เปลือกเมล็ดดอกทานตะวัน ซังข้าวโพด ขี้เลื่อย กากเหล่านี้จะประกอบด้วยสัดส่วน

ของโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) จำนวนมาก เช่น ฟางข้าว มีถึง 60–70% ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเซลลูโลส ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่ซับซ้อน โดยเฉพาะมีลิกนิน (lignin) ห่อหุ้มอยู่ ทำให้สัตว์ย่อยได้ลำบาก จึงมีการปรับปรุงความสามารถในการย่อยได้ด้วยการฉายรังสี ซึ่งพบว่า สามารถใช้ปริมาณรังสี 0.2–0.6 MGy เพื่อปรับปรุงฟางข้าว และใช้ทดแทนเป็นอาหารของวัว แกะ และสัตว์ปีก ได้ 5-10% โดยปราศจากผลกระทบต่อตัวสัตว์ จะเห็นได้ว่าปริมาณรังสีที่ใช้ปรับปรุงจะอยู่ในช่วง 0.1-1 MGy ซึ่งเป็นปริมาณรังสีที่สูง แต่อาจจะลดปริมาณรังสีลงได้ถ้ามีการใช้ความร้อนช่วยก่อนหรือหลังการฉายรังสี

การใช้ประโยชน์จากเยื่อกระดาษและกากเซลลูโลสชนิดอื่น

มีการผลิตกลูโคสจากการฉายรังสีเยื่อกระดาษและกากเซลลูโลส โดยใช้ปริมาณรังสี 10 kGy ร่วมกับการใช้กรด (acid hydrolysis) ที่อุณหภูมิสูง (232°C) ซึ่งปริมาณกลูโคสที่ได้จะสูงกว่าการไม่ใช้รังสี 10% และได้มีการทดลองใช้อิเล็กตรอนเป็นต้นกำเนิดรังสี เพื่อฉายรังสีกากเซลลูโลสจำพวกเนื้อไม้ พบว่าให้ปริมาณกลูโคสเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปบด พบว่าสามารถลดเวลาในการบดลงได้

การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของโพลิเมอร์

เป็นการยากที่จะกำหนดค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยการโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) วิธีหนึ่งที่ง่ายก็คือการใช้รังสีพลังงานสูงย่อยโพลิเมอร์ โดยมีการใช้กับ polyethylene และ cellulose

การย่อยสลาย polytetrafluoroethylene (Teflon)

มีการใช้รังสีเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวใน polytetrafluoroethylene เพื่อเปลี่ยนจากเศษวัสดุให้กลายเป็นฝุ่นผง และให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ เพื่อใช้ในการผลิตสารประกอบ perfluoro โดยปริมาณรังสีที่ใช้จะต้องมีค่าสูงกว่า 0.5 MGy เพื่อทำให้เกิดความร้อนสูงประมาณ 360 °C สำหรับคุณสมบัติของ Teflon คือสามารถรวมตัวเข้ากับวัสดุอื่นได้ดี และเป็นตัวหล่อลื่นที่ดี เพราะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และมีแรงตึงผิวต่ำ

การปรับปรุงเศษของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว

โดยทั่วไป butyl rubber ที่ถูกวัลคาไนซ์แล้วจะมีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น และเมื่อหมดอายุแล้ว คุณสมบัติของยางก็จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่เราสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการใช้รังสีเหนี่ยวนำให้เกิดการย่อยสลาย ซึ่งสายโซ่ที่ถูกตัดคือสายโซ่ของ isobutylene กระบวนการที่เกิดขึ้นประกอบด้วยการทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ถูกวัลคาไนซ์เสียรูปทรง แล้วนำไปฉายรังสี โดยปริมาณรังสีที่ใช้ประมาณ 0.1 MGy จากนั้นก็นำไปบด เพื่อนำไปใช้ในการผสมเพื่อผลิตยางชนิดอื่นได้

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. กรดซัลฟูริก (sulfuric acid, H_2SO_4)

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ชานอ้อย
2. เปลือกทุเรียน
3. ฟางข้าว

ก. ชานอ้อย ข. เปลือกทุเรียน ค. ฟางข้าว

รูปที่ 3.1 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องฉายรังสีแบบอุตสาหกรรมแบบอุตสาหกรรมของ Isotron (Thailand) Ltd. ความแรงรังสี 5 MCi
2. ตู้อบ (hot air oven) ของ Heraeus รุ่น VT 5042
3. เครื่องบด
4. ถุงซิป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. เครื่องชั่ง (analytical balance) ของ Sartorius Basic รุ่น BA 310s
6. เครื่อง autoclave ของ Hirayama รุ่น HA-300MD อุณหภูมิ 105 ^{o}C-121 ^{o}C แสดงในรูปที่ 3.2
7. ขวดสำหรับ autoclave ขนาด 100 มิลลิลิตร
8. เครื่อง water bath
9. เครื่อง spectrophotometer ของ Spectronic Instrucent รุ่น Genesy 5 แสดงในรูปที่ 3.3
10. เครื่อง HPLC
    - Pump และ Refractive Index Detector ของ LDC รุ่น 4100
    - Integrator ของ Shimadza รุ่น C-RIA

รูปที่ 3.2 เครื่อง autoclave

รูปที่ 3.3 เครื่อง spectrophotometer

3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

การเตรียมตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. นำวัสดุทั้งสามชนิดไปอบให้แห้ง
2. นำไปบดด้วยเครื่องบด โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 1 มิลลิเมตร
3. เก็บไว้ใน dessiccator ป้องกันความชื้น
4. วิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก
5. แบ่งตัวอย่างแต่ละชนิดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก กลุ่มที่ 2 ฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก

การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม ในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลของชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว

<u>ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก</u>

1. ทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

ชั่งตัวอย่างหนัก 2 กรัม บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave จำนวน 5 ขวด เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ตามลำดับ ลงในขวดแต่ละใบ โดยใช้ปริมาตร 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 10 นาที กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จากนั้นทำการไฮโดรไลซ์เช่นเดียวกับข้างต้น แต่ทำที่อุณหภูมิ 120°C

2. ทดลองหาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสม

ชั่งตัวอย่างหนัก 2 กรัม บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave จำนวน 17 ขวด เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1-5% โดยการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกทีละ 0.2% ตามลำดับ โดยใช้ปริมาตร 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 1 เป็นเวลา 10 นาที กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

3. ทดลองหาเวลาที่เหมาะสม

ชั่งตัวอย่างหนัก 2 กรัม บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave จำนวน 3 ขวด เติมกรดซัลฟูริกที่เหมาะสมจากข้อ 2 โดยใช้ปริมาตร 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 1 เป็นเวลา 10 นาที กรอง สารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จากนั้นทำการไฮโดรไลซ์เช่นเดียวกับข้างต้น แต่ทำที่ระยะเวลา 20 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ

4. ทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส โดยใช้ตัวอย่างที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1-3

<u>ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 : ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกร่วมกับฉายรังสีแกมมา</u>

ทำการฉายรังสีในตัวอย่างก่อนทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกที่สภาวะที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1 ชั่งตัวอย่างหนัก 10 กรัม ใส่ถุงซิป จำนวน 5 ตัวอย่าง

2 นำตัวอย่างไปฉายรังสีแกมมาด้วยเครื่อง Co-60 โดยใช้ปริมาณรังสี 25, 50, 75 และ 100 kGy

3 นำตัวอย่างฉายรังสีไปทำการไฮโดรไลซ์ โดยชั่งตัวอย่างหนัก 2 กรัม บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave เติมกรดซัลฟูริกปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในขวดโดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่ได้จากการทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสม คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ และเวลาที่ได้จากการทดลองหาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสม ตามลำดับ

4 กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. วิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van soest (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.) จากความสัมพันธ์ดังนี้

เซลลูโลส (%) = ADF - ADL

เฮมิเซลลูโลส (%) = NDF - ADF

ลิกนิน (%) = ADL

โดย NDF (neutral detergent fiber) คือ เยื่อใยทั้งหมด ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

ADF (acid detergent fiber) คือ เยื่อใยของเซลลูโลส กับลิกนิน

ADL (acid detergent lignin) คือ ปริมาณลิกนิน

โดยค่าทั้งหมดที่ได้ เป็นค่าจากตัวอย่างที่อยู่ในสภาพวัตถุแห้ง

2. วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้วิธีของ Somogyi & Nelson (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.)

3. วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลไซโลส กลูโคส และอะราบิโนส ด้วยเครื่อง HPLC ในการหาค่าปริมาณน้ำตาลไซโลส กลูโคส และอะราบิโนส จะหาค่าโดยการเปรียบเทียบกับค่ามาตราฐาน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.)

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเครื่อง HPLC

	Xylose, arabinose และ glucose
Column	Lichrocart – NH_2 ขนาด 250 x 4 mm
Mobile phase	90% ACN in H_2O (v/v)
Flow rate	1.8 ml/min
Temperature	25
Injection volume	20 μl
Detector	RID

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว

ตารางที่ 4.1 ปริมาณเยื่อใยในชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว

	ชานอ้อย	เปลือกทุเรียน	ฟางข้าว
NDF (%)	85.49	47.38	67.45
ADF (%)	49.30	34.62	38.04
เซลลูโลส (%)	41.10	26.82	33.27
เฮมิเซลลูโลส (%)	36.19	12.76	29.41
ลิกนิน (%)	8.20	7.80	4.77

หมายเหตุ : ปริมาณเยื่อใยเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างแห้ง

NDF คือ เยื่อใยทั้งหมด ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางทำให้เฮมิเซลลูโลสถูกย่อยสลายไป ส่วนที่เหลืออยู่คือ ADF ซึ่งประกอบด้วยเยื่อใยของเซลลูโลส กับลิกนิน ผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว ดังตารางที่ 4.1 พบว่าชานอ้อยมีค่า NDF สูงสุด คือ 85.49% รองลงมาคือฟางข้าว และเปลือกทุเรียน มีค่า 67.45% และ 47.38% ตามลำดับ ตัวอย่างที่มีค่า ADF สูงสุด คือ ชานอ้อย มีค่าเท่ากับ 49.30% รองลงมาคือ ฟางข้าว และเปลือกทุเรียนมีค่า 38.04% และ 34.62% ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส พบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสูงสุด คือ ชานอ้อย มีค่าเท่ากับ 41.10% และ 36.19% ตามลำดับ

4.2 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริก

ตัวอย่างแต่ละชนิดถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก กลุ่มที่ 2 ฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก

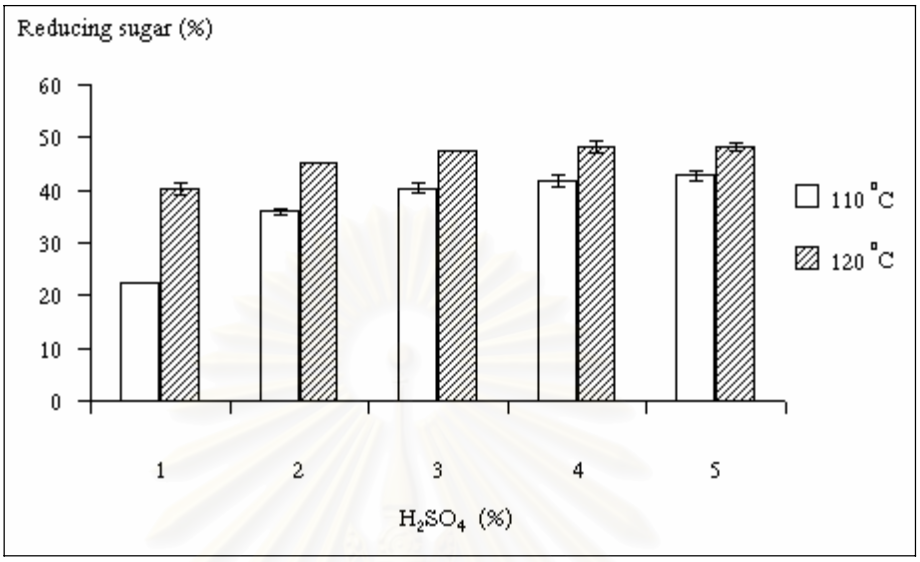
ตัวอย่างชานอ้อย

ตัวอย่างชานอ้อยกลุ่มที่ 1 นำชานอ้อยมาทำปฏิกริยากับกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในการไฮโดรไลซ์ โดยใช้อัตราส่วนชานอ้อยต่อกรดซัลฟูริก เท่ากับ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Autoclave ทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 110 ^{o}C กับ 120 ^{o}C โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% เป็นเวลา 10 นาที พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 110 ^{o}C มีค่าน้อยกว่าที่ 120 ^{o}C ประมาณ 5-15% ที่ความเข้มข้นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก พบว่า ที่อุณหภูมิ 110 ^{o}C และ 120 ^{o}C ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่ 3% กรดซัลฟูริก และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 48.17% ที่อุณหภูมิ 120 ^{o}C, 5% กรดซัลฟูริก ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 ดังนั้นในการทดลองต่อไป จึงเลือกทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 120 ^{o}C

ตารางที่ 4.2 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 ^{o}C และ 120 ^{o}C เป็นเวลา 10 นาที

H_2SO_4 (%)	Reducing sugar (%)	
	110 ^{o}C	120 ^{o}C
1	22.44 ± 0.15	40.22 ± 1.02
2	35.91 ± 0.72	45.03 ± 0.02
3	40.41 ± 0.96	47.59 ± 0.02
4	41.78 ± 1.24	48.13 ± 1.19
5	42.91 ± 0.95	48.17 ± 0.70

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักชานอ้อยแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, และ 5 % ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

การทดลองหาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสม โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1-5% โดยการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกทีละ 0.2% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น และจะเริ่มคงที่ที่ 3% กรดซัลฟูริก ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะใช้ค่าที่ 3% กรดซัลฟูริก

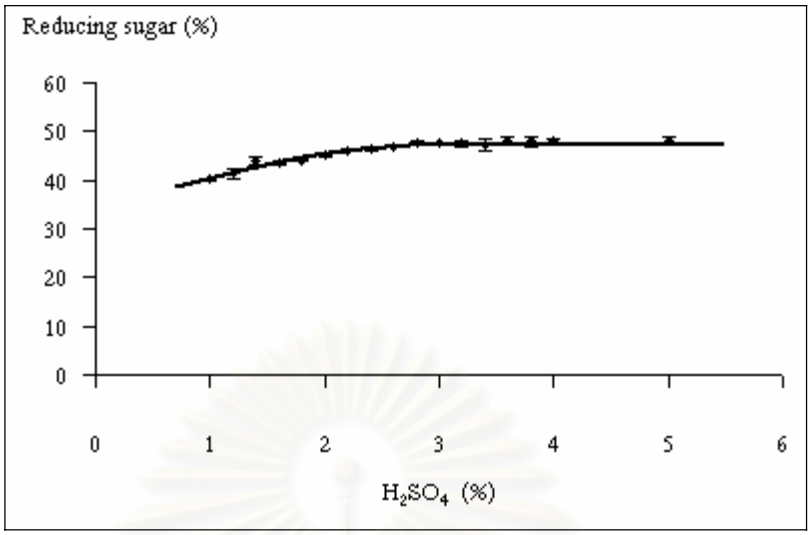
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

H_2SO_4 (%)	Reducing sugar (%)
1.0	40.22 ± 0.23
1.2	41.31 ± 0.94
1.4	43.94 ± 0.66
1.6	43.38 ± 0.33
1.8	44.16 ± 0.08
2.0	45.03 ± 0.18
2.2	46.19 ± 0.15
2.4	46.38 ± 0.15
2.6	47.03 ± 0.23
2.8	47.78 ± 0.13
3.0	47.59 ± 0.02
3.2	47.47 ± 0.48
3.4	47.38 ± 1.24
3.6	48.19 ± 0.75
3.8	48.06 ± 1.03
4.0	48.13 ± 0.32
5.0	48.17 ± 0.69

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักชานอ้อยแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



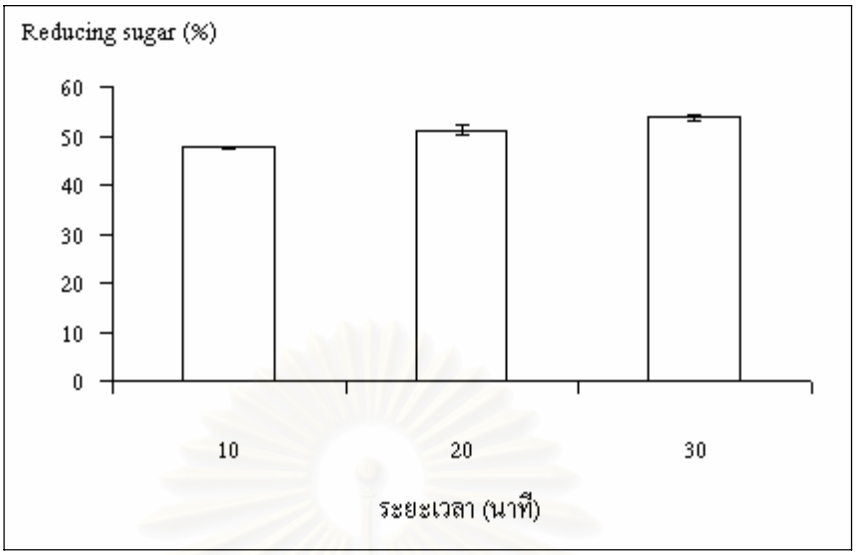
รูปที่ 4.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

หลังจากนั้นทำการหาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที ที่ 3% กรดซัลฟูริก อุณหภูมิ 120 °C พบว่า ที่เวลา 10 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีค่าน้อยที่สุด คือ 47.59% เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 20 นาที และ 30 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้นโดยมีค่า 51.22% และ 53.73% ตามลำดับ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซ์ คือ 30 นาที ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที

ระยะเวลา (นาที)	Reducing sugar (%)
10	47.59 ± 0.02
20	51.22 ± 0.32
30	53.73 ± 0.49

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักชานอ้อยแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อย ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C ที่เวลาต่าง ๆ

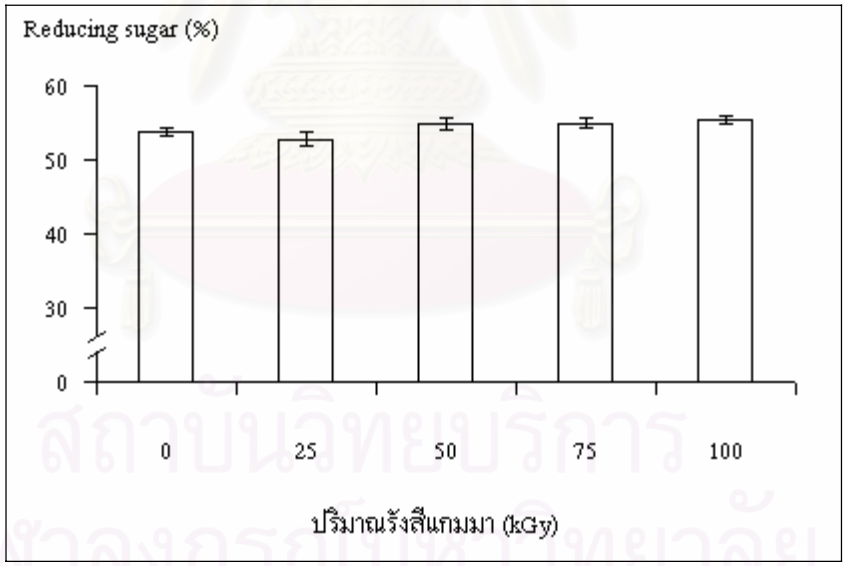
ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 30 นาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aguilar (6) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ชานอ้อย โดยนำชานอ้อยมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2%, 3% และ 4% ที่อุณหภูมิ 100, 122 และ 128 °C เป็นระยะเวลา 0-300 นาที จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ 2% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 122 °C เวลา 24 นาที ปริมาณน้ำตาลไซโลส กลูโคส และอะราบิโนสที่ได้ มีค่า 21.6 กรัมต่อลิตร, 3 กรัมต่อลิตร และ 3.65 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตัวอย่างชานอ้อยกลุ่มที่ 2 นำชานอ้อยที่ไม่ได้ฉายรังสี และชานอ้อยที่ฉายรังสีแกมมา 25, 50, 75 และ 100 kGy มาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสม คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 30 นาที ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 พบว่า ชานอ้อยที่ไม่ได้ฉายรังสีมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 53.73% ส่วนชานอ้อยที่ฉายรังสี 25, 50, 75 และ 100 kGy มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 52.75%, 54.88%, 54.92% และ 55.32% ตามลำดับ ในตัวอย่างชานอ้อยที่ฉายรังสี 100 kGy มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นประมาณ 2% เมื่อเทียบกับตัวอย่างชานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกอย่างเดียว

ตารางที่ 4.5 ผลการย่อยสลายโมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณรังสีแกมมา (kGy)	Reducing sugar (%)
0	53.73 ± 0.49
25	52.75 ± 0.91
50	54.88 ± 0.92
75	54.92 ± 0.72
100	55.32 ± 0.51

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักชานอ้อยแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อย ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของชานอ้อย โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

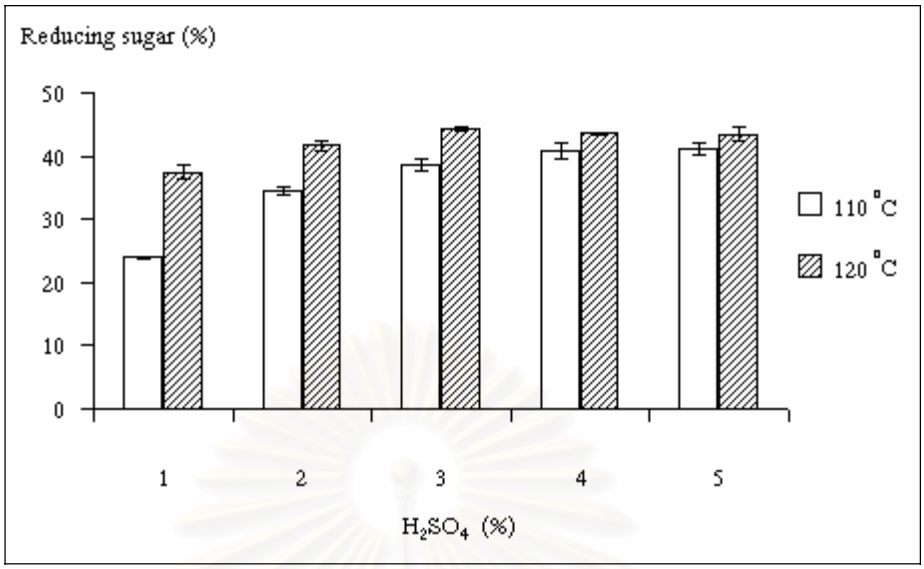
ตัวอย่างเปลือกทุเรียน

ตัวอย่างเปลือกทุเรียนกลุ่มที่ 1 นำเปลือกทุเรียนมาทำปฏิกริยากับกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในการไฮโดรไลซ์ โดยใช้อัตราส่วนเปลือกทุเรียนต่อกรดซัลฟูริก เท่ากับ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Autoclave ทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 110 °C กับ 120 °C โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% เป็นเวลา 10 นาที พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 110 °C มีค่าน้อยกว่าที่ 120 °C ประมาณ 2-14% ที่ความเข้มข้นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก พบว่า ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่ 3% กรดซัลฟูริก และปริมาณรีดิวซ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 44.28% ที่อุณหภูมิ 120 °C 3% กรดซัลฟูริก ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 ดังนั้นในการทดลองต่อไป จึงเลือกทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 120 °C

ตารางที่ 4.6 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

H_2SO_4 (%)	Reducing sugar (%)	
	110 °C	120 °C
1	23.97 ± 0.15	37.45 ± 1.21
2	34.50 ± 0.72	41.66 ± 0.75
3	38.75 ± 0.96	44.28 ± 0.28
4	40.88 ± 1.24	43.59 ± 0.13
5	41.06 ± 0.95	43.44 ± 1.04

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักเปลือกทุเรียนแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเปลือกทุเรียนโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, และ 5 % ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

การทดลองหาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสม โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1-5% โดยการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกทีละ 0.2% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น และจะเริ่มคงที่ที่ 3% กรดซัลฟูริก ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะใช้ค่าที่ 3% กรดซัลฟูริก

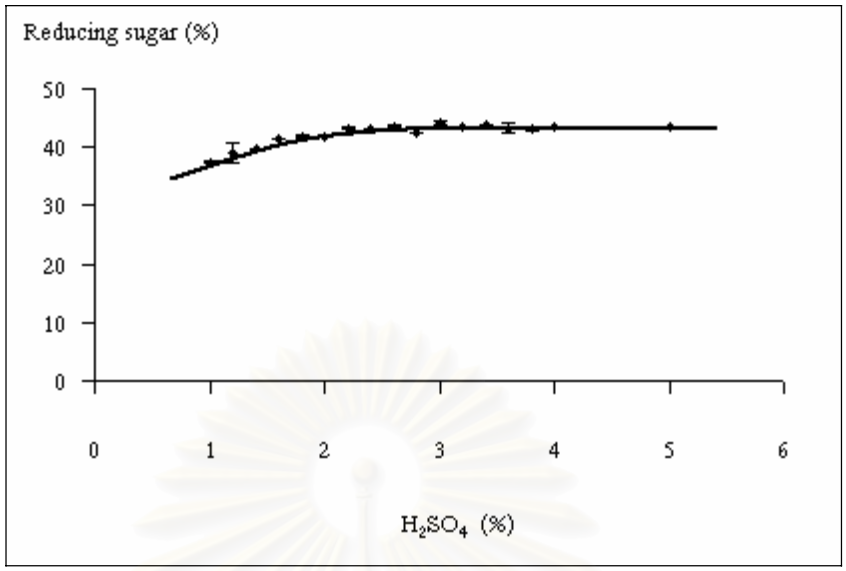
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

H_2SO_4 (%)	Reducing sugar (%)
1.0	37.45 ± 0.15
1.2	39.00 ± 1.60
1.4	39.77 ± 0.09
1.6	41.44 ± 0.13
1.8	41.91 ± 0.07
2.0	41.66 ± 0.05
2.2	43.31 ± 0.04
2.4	43.13 ± 0.03
2.6	43.66 ± 0.01
2.8	42.50 ± 0.01
3.0	44.28 ± 0.28
3.2	43.56 ± 0.04
3.4	43.72 ± 0.05
3.6	43.31 ± 0.75
3.8	43.03 ± 0.08
4.0	43.59 ± 0.04
5.0	43.44 ± 0.14

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักเปลือกทุเรียนแห้ง แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

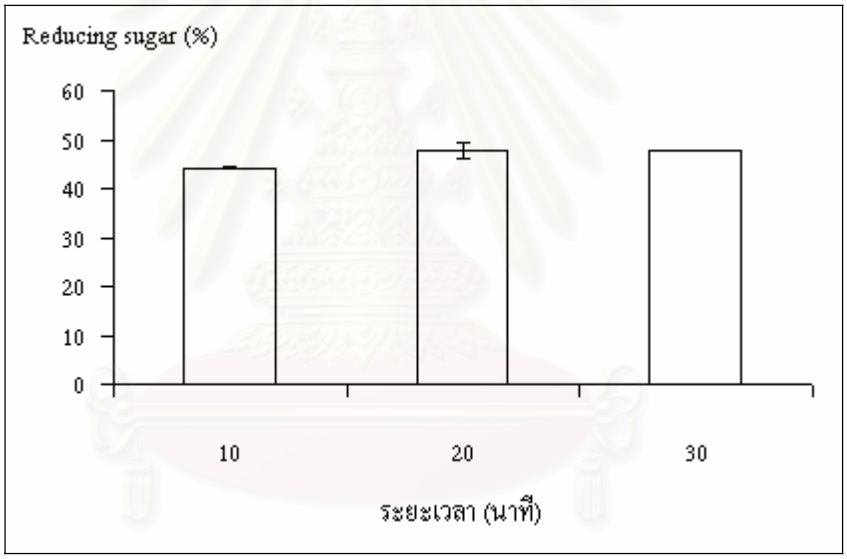
หลังจากนั้นทำการหาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที ที่ 3% กรดซัลฟูริก อุณหภูมิ 120 °C พบว่า ที่เวลา 10 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีค่าน้อยที่สุด คือ 47.59% เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 20 นาที และ 30 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้น โดยมีค่า 51.22% และ 53.73% ตามลำดับ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซ์ คือ 30 นาที ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 ° และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที

ระยะเวลา (นาที)	Reducing sugar (%)
10	44.28 ± 0.28
20	47.73 ± 0.42
30	47.83 ± 0.35

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักเปลือกทุเรียนแห้ง แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.7 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C ที่เวลาต่าง ๆ

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเปลือกทุเรียน คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 30 นาที

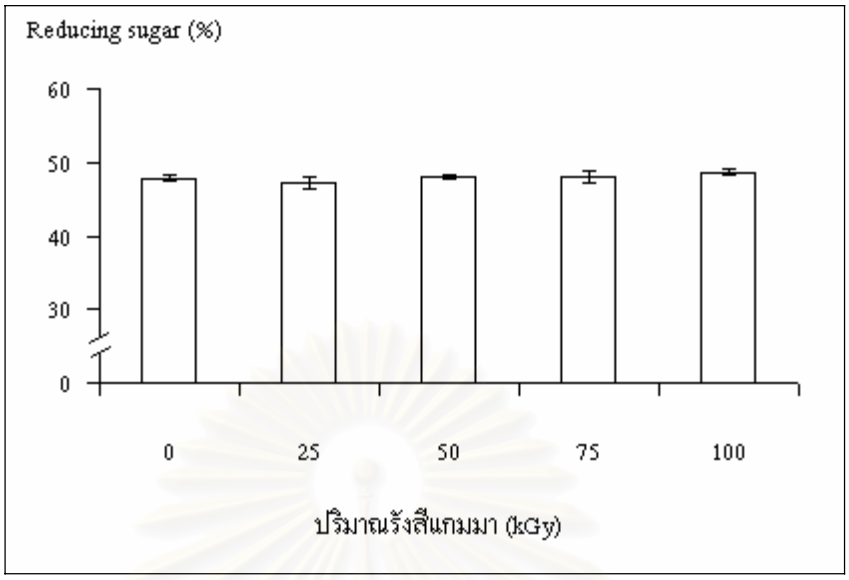
ตัวอย่างเปลือกทุเรียนกลุ่มที่ 2 นำเปลือกทุเรียนที่ไม่ได้ฉายรังสี และเปลือกทุเรียนที่ฉายรังสีแกมมา 25, 50, 75 และ 100 kGy มาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสม คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 30 นาที ผลการทดลองดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.8 พบว่า เปลือกทุเรียนที่ไม่ได้ฉายรังสีมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 47.83% ส่วนเปลือกทุเรียนที่ฉายรังสี 25, 50, 75 และ 100 kGy มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 47.25%, 48.11%, 48.05% และ 48.64% ตามลำดับ ในตัวอย่างเปลือกทุเรียนที่ฉายรังสี 100 kGy มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นประมาณ 1% เมื่อเทียบกับตัวอย่างเปลือกทุเรียนที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกอย่างเดียว

ตารางที่ 4.9 ผลการย่อยสลายโมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณรังสีแกมมา (kGy)	Reducing sugar (%)
0	47.83 ± 0.35
25	47.25 ± 0.84
50	48.11 ± 0.29
75	48.05 ± 0.86
100	48.64 ± 0.44

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักเปลือกทุเรียนแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเปลือกทุเรียน ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของเปลือกทุเรียน โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

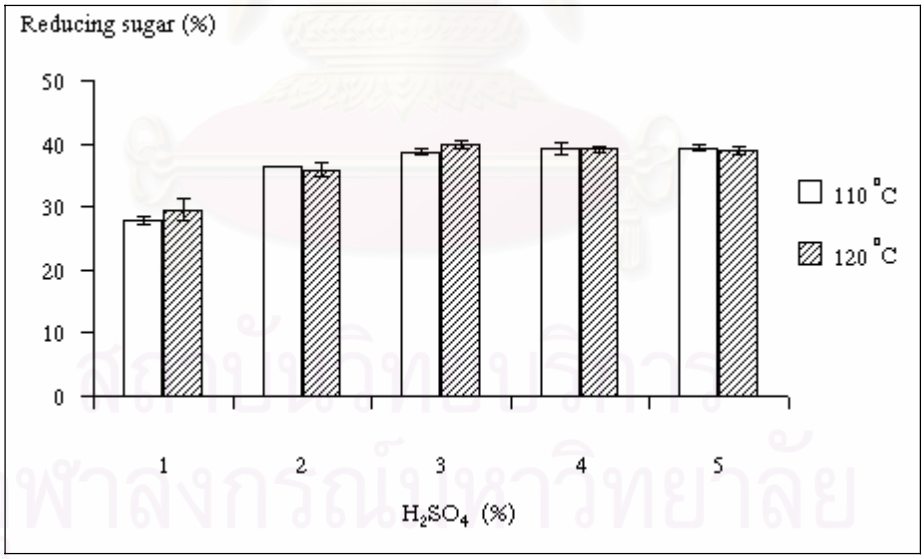
ตัวอย่างฟางข้าว

ตัวอย่างฟางข้าวกลุ่มที่ 1 นำฟางข้าวมาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ โดยใช้อัตราส่วน ฟางข้าวต่อกรดซัลฟูริก เท่ากับ 1 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Autoclave การไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 110 °C กับ 120 °Cโดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% เป็นเวลา 10 นาที พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 110 °C กับ 120 °C ที่ความเข้มข้นเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก พบว่า ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่ 3% กรดซัลฟูริก และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 39.94% ที่อุณหภูมิ 120 °C, 3% กรดซัลฟูริก ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.9 ประกอบกับผลการวิจัยของ Roberto (5) และ Rosa (1) ซึ่งทำการทดลองในตัวอย่างฟางข้าว โดยทำการไฮโดรไลท์ที่อุณหภูมิ 121 °C และงานวิจัยของ Shan (13) ทำการทดลองในตัวอย่างฟางข้าว โดยทำการไฮโดรไลท์ที่อุณหภูมิ 100 °C-140 °C พบว่า ที่อุณหภูมิ 140 °C ได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสสูงสุด จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น และจากการทดลองในตัวอย่างชานอ้อย และเปลือกทุเรียน พบว่า การไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิสูงดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบกับเครื่อง Autoclave สามารถตั้งอุณหภูมิสูงสุดที่ 121 °C ดังนั้น ในการทดลองต่อไป จึงเลือกทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 120 °C

ตารางที่ 4.10 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

H_2SO_4 (%)	Reducing sugar (%)	
	110 °C	120 °C
1	27.88 ± 0.68	29.57 ± 1.77
2	36.34 ± 0.01	35.91 ± 1.14
3	38.69 ± 0.43	39.94 ± 0.58
4	39.31 ± 0.87	39.14 ± 0.38
5	39.31 ± 0.41	38.92 ± 0.72

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักฟางข้าวแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% ที่อุณหภูมิ 110 °C และ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

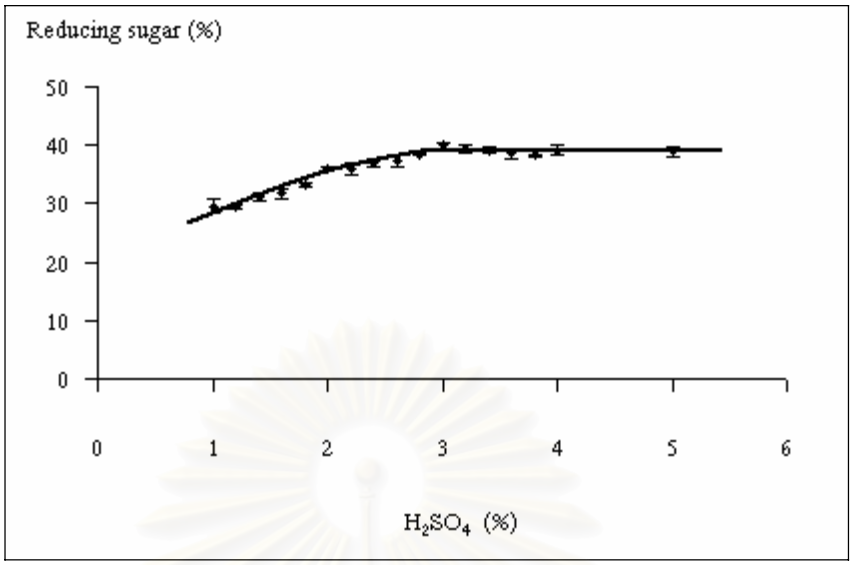
การทดลองหาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสม โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1-5% โดยการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกทีละ 0.2% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้น และจะเริ่มคงที่ที่ 3% กรดซัลฟูริก ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.10 ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะใช้ค่าที่ 3% กรดซัลฟูริก

ตารางที่ 4.11 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

H_2SO_4 (%)	Reducing sugar (%)
1.0	29.57 ± 1.19
1.2	29.38 ± 0.29
1.4	31.14 ± 0.61
1.6	31.76 ± 0.83
1.8	33.31 ± 0.35
2.0	35.91 ± 0.28
2.2	35.91 ± 1.14
2.4	36.82 ± 0.65
2.6	37.36 ± 1.04
2.8	38.49 ± 0.23
3.0	39.94 ± 0.58
3.2	39.34 ± 0.73
3.4	39.2 ± 0.56
3.6	38.58 ± 0.91
3.8	38.24 ± 0.28
4.0	39.14 ± 0.88
5.0	38.92 ± 0.86

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักฟางข้าวแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



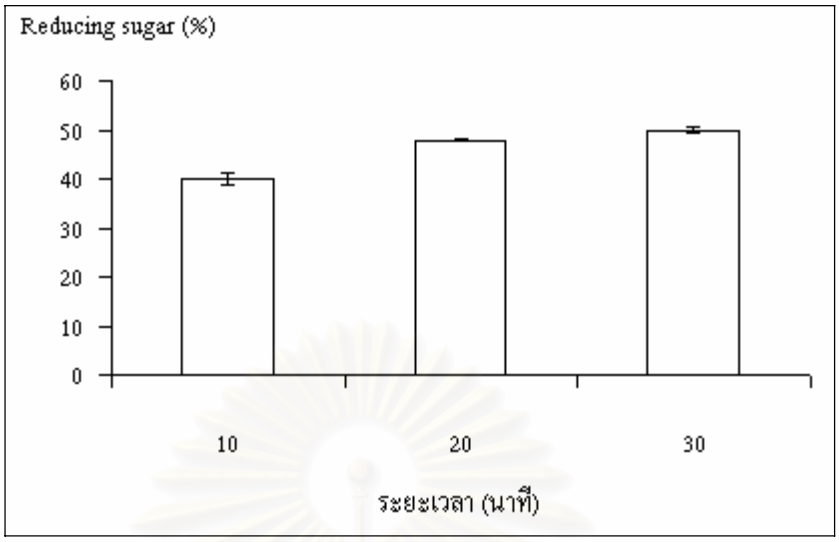
รูปที่ 4.10 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

หลังจากนั้นทำการหาระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที ที่ 3% กรดซัลฟูริก อุณหภูมิ 120 °C พบว่า ที่เวลา 10 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีค่าน้อยที่สุด คือ 39.94% เมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 20 นาที และ 30 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้น โดยมีค่า 47.90% และ 49.83% ตามลำดับ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซ์ คือ 30 นาที ดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.12 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที

ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)	Reducing sugar (%)
10	39.94 ± 0.58
20	47.90 ± 0.88
30	49.83 ± 0.10

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักฟางข้าวแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.11 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที

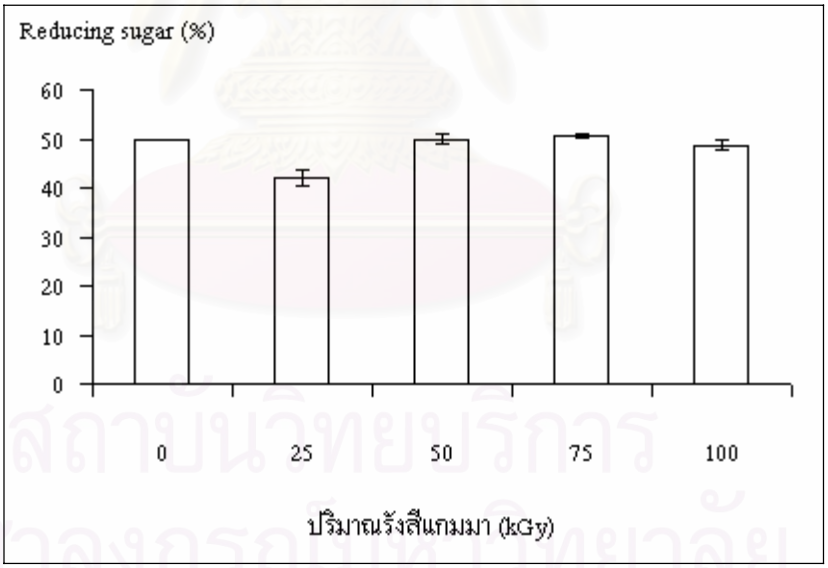
ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าว คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 30 นาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Roberto (5) ที่ได้ทำการทดลองหา สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสสูงสุด โดยนำฟางข้าวมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก เข้มข้น 1.0, 1.3 และ1.6% (w/v) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที จากผลการทดลอง พบว่า สภาวะที่ให้น้ำตาลไซโลสสูงสุด คือ 1.6% กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 30 นาที ได้น้ำตาลไซโลส และกลูโคส เท่ากับ 20.5 และ 6.3 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตัวอย่างฟางข้าวกลุ่มที่ 2 นำฟางข้าวที่ไม่ได้ฉายรังสี และฟางข้าวที่ฉายรังสีแกมมา 25, 50, 75 และ 100 kGy มาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก โดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสม คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 30 นาที ผลการทดลองดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.12 พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ได้ฉายรังสีมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 49.83% ส่วนฟางข้าวที่ฉายรังสี 25, 50, 75 และ 100 kGy มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 42.10%, 49.90%, 50.54% และ 48.75% ตามลำดับ ในตัวอย่างฟางข้าวที่ฉายรังสี 75 kGy มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นประมาณ 1% เมื่อเทียบกับตัวอย่างฟางข้าวที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกอย่างเดียว

ตารางที่ 4.13 ผลการย่อยสลายโมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณรังสีแกมมา (kGy)	Reducing sugar (%)
0	49.83 ± 0.10
25	42.10 ± 1.68
50	49.90 ± 0.98
75	50.54 ± 0.41
100	48.75 ± 1.12

หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักฟางข้าวแห้ง แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



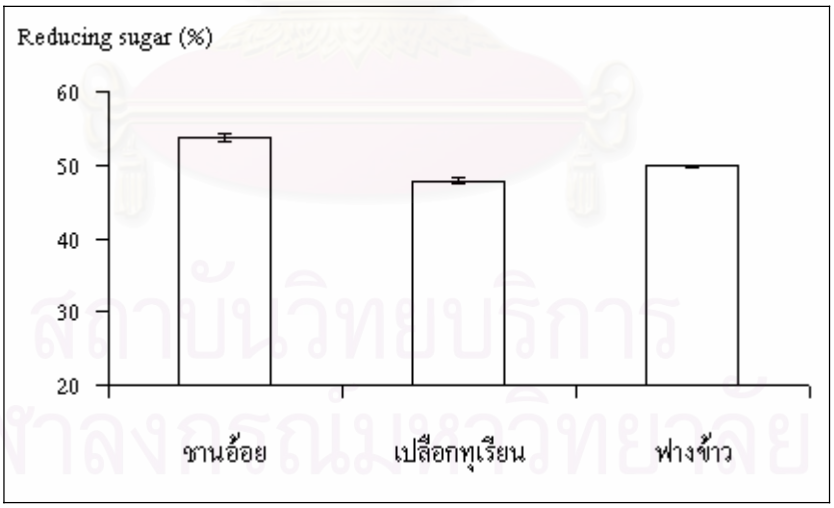
รูปที่ 4.12 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของฟางข้าว โดยใช้รังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที ในฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน พบว่า ชานอ้อยมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด คือ 53.73% รองลงมาคือ ฟางข้าว และเปลือกทุเรียน มีค่า 49.83% และ 47.83% ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.14 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในโมเลกุลของฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

ตัวอย่าง	Reducing sugar (%)
ชานอ้อย	53.73 ± 0.49
เปลือกทุเรียน	47.83 ± 0.35
ฟางข้าว	49.83 ± 0.10

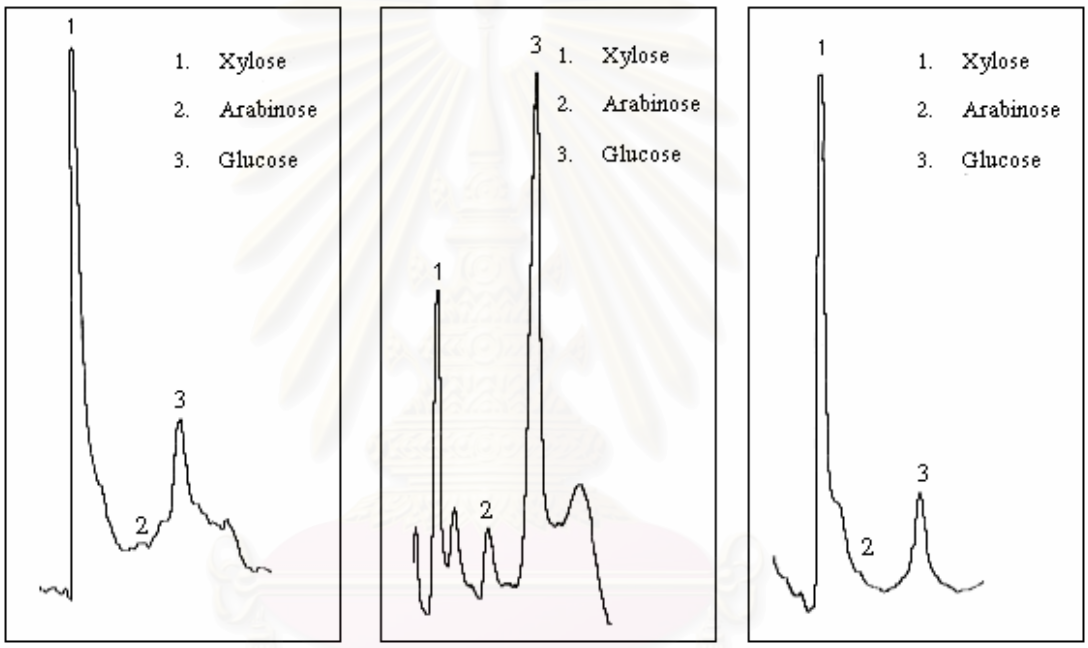
หมายเหตุ : ปริมาณ reducing sugar คิดเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างแห้ง
แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.13 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในโมเลกุลของฟางข้าว ชานอ้อย และเปลือกทุเรียน ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส ด้วยเครื่อง HPLC

นำตัวอย่างชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว แต่ละชนิด มาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนสด้วยเครื่อง HPLC (column : Lichrocart – NH_2 ขนาด 250 x 4 mm, mobile phase 90% ACN in H_2O (v/v), volumn inject 20 µl, Flow rate 0.18 ml/min) พบว่า พีคที่ 1 คือ น้ำตาลไซโลส พีคที่ 2 คือ น้ำตาลอะราบิโนส และพีคที่ 3 คือ น้ำตาลกลูโคส ดังรูปที่ 4.14



ก. ชานอ้อย ข. เปลือกทุเรียน ค. ฟางข้าว

รูปที่ 4.14 แสดงพีคของน้ำตาลไซโลส (1), น้ำตาลอะราบิโนส (2) และน้ำตาลกลูโคส (3) จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลชานอ้อย (ก), เปลือกทุเรียน (ข) และฟางข้าว (ค) ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

การหาปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส โดยการคำนวณหาพื้นที่ใต้พีคของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส เทียบกับสารมาตราฐานของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส ดังแสดงในภาคผนวก ค.

เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโพลีแซคคาไรท์หลายชนิดปนกัน คือ เพนโตแซน (ส่วนใหญ่เป็นไซแลน และอะราแบน เมื่อนำไปไฮโดรไลซ์ จะได้น้ำตาลไซโลส และอะราบิโนส) และเฮกโซแซน (ส่วนใหญ่เป็น แมนแนน กาแลคแทน และกลูแคน เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส กาแลคโตส และกลูโคส ตามลำดับ) โดยไซโลสเป็นสารที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าสารอื่น และจากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจางทำให้เฮมิเซลลูโลสถูกย่อยสลายไปเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นน้ำตาลที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลไซโลส รองลงมาคือ กลูโคส และอะราบิโนส จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.15 พบว่า ตัวอย่างชานอ้อยมีปริมาณน้ำตาลไซโลสสูงสุด คือ 25.75 กรัมต่อลิตร รองลงมา ได้แก่ ฟางข้าว 22.09 กรัมต่อลิตร ส่วนเปลือกทุเรียนมีปริมาณน้ำตาลไซโลส 6.67 กรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณน้ำตาลไซโลสแปรผันตามปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง (ดังตาราง 4.1)

ตารางที่ 4.15 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส ในโมเลกุลของชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3 % ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที

ตัวอย่าง	Glucose (g/l)	Xylose (g/l)	Arabinose (g/l)
ชานอ้อย	9.72	25.76	3.38
เปลือกทุเรียน	10.41	6.67	2.12
ฟางข้าว	3.53	22.09	2.79

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการนำชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ด้วยการนำมาผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักของตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ด้วยกรดซัลฟูริก และการใช้รังสีแกมมามาร่วมกับกรด ซัลฟูริกในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว ด้วยกรดซัลฟูริก ในตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด คือ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที เป็นสภาวะที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด พบว่า ตัวอย่างที่ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด คือ ชานอ้อย มีค่า 53.73% รองลงมา คือ ฟางข้าว และเปลือกทุเรียน มีค่า 49.83% และ 47.83% ตามลำดับ เนื่องจากการฉายรังสีในปริมาณสูงมาก ๆ ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้น ในการทดลองจึงเลือกฉายรังสีไม่เกิน 100 kGy ร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด และจากการทดลองฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 25, 50, 75 และ 100 kGy ร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่ 3% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในชานอ้อยเพิ่มขึ้นประมาณ 2% ส่วนเปลือกทุเรียนเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ที่ปริมาณรังสี 100 kGy ส่วนฟางข้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ที่ปริมาณรังสี 100 kGy เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดอย่างเดียว และทำการหาปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวแต่ละชนิด ในตัวอย่างทั้ง 3 พบว่า ตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดน้ำตาลที่มีปริมาณสูงสุด คือ น้ำตาลไซโลส รองลงมา คือ กลูโคส และอะราบิโนส เนื่องจากการกรดเจือจางสามารถไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสได้ดีกว่าโมเลกุลของเซลลูโลส และในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นน้ำตาลไซโลสจึงมีปริมาณสูงสุด เมื่อพิจารณาทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ชานอ้อยมีปริมาณน้ำตาลไซโลส มีค่า 25.76 กรัมต่อลิตร รองลงมา คือ ฟางข้าว และเปลือกทุเรียน มีค่า 22.09 กรัมต่อลิตร และ 6.67 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. การไฮโดรไลซ์โดยใช้อุณหภูมิสูง และเวลานาน เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้น
2. การฉายรังสีแกมมาในปริมาณสูงมาก ๆ เพื่อเพิ่มการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสให้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

1. เมธา วรรณพัฒน์. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. กรุงเทพมหานคร : ฟันนี่พับบลิชชิ่ง, 2529.
2. Dela Rosa, A.M., และคณะ. Radiation pretreatment of cellulose for energy production. Radiation Physics and Chemistry 22 (1983) :861-867
3. Mamar, S. Ait Si and Hadjadj, A. Radiation pretreatments of cellulose materials for the enhancement of enzymatic. Radiation Physics and Chemistry 35 (1990) : 451-455
4. Roberto, Ines C., และคณะ. Dilute-acid hydrolysis for optimization of xylose recovery from rice straw in a semi-pilot reactor. Industrail Crops and Products. 17 (2003) : 171-176
5. Aguilar, R., และคณะ. Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse. Journal of Engineering 55 (2002):309-318
6. Neureiter, M., Danner, H., Thornasser, C., and Braun, R. เรื่อง Dilute acid hydrolysis of softwood chips for the production of hemicellulose sugars. http://bioproducts-bioenergy.gov/pdfs /bcota/abstracts/12/z386.pdf
7. ขวัญชนก จันทร์สว่าง. การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.
8. ระวีวรรณ แก้วกล้า. Ethanol production from rice straw. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1995.
9. อำนวย ขวัญเมือง. Alcoholic fermentation of crop using cellulose and saccharomyces cerevisiae. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาพฤกษาศาสตร์ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1995.
10. สุนันท์ พงษ์สามารถ และคณะ. การพัฒนาสารโพลีแซคคาไรด์จากเปลือกของผลทุเรียนเพื่อใช้ทางเภสัชกรรม. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.
11. Sinnott, Michael. Synthesis of trifluoroethyl xylooligosaccharide glycosides as probes of binding to carbohydrate binding modules. http://www.hud.ac.uk/schools/applied_sciences/research /bmsrc/sinnott.htm
12. วารุณี พานิชผล. การวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชอาหารสัตว์. กรุงเทพมหานคร : กลุ่มงานวิเคราะห์อาหารสัตว์ กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์, 2541.

13. Sang Heum Shin และ คณะ. Dilute-Acid Hydrolysis of Hemicellulose from Agricultural Renewable Biomass. http://www.nrel.gov/biotechsymp25/docs/abst6a-17.doc.

14. Chaptin, M.F., and Kennedy, J.F. Carbohydrate analysis and Analytical, 1987

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

ขวัญชนก จันทร์สว่าง. การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมา ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.

เมธา วรรณพัฒน์. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. กรุงเทพมหานคร : ฟันนี่พับบลิชชิ่ง, 2529.

ระวีวรรณ แก้วกล้า. Ethanol production from rice straw. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1995.

รัชฎา แก่นสาร์. ชีวเคมี. กรุงเทพมหานคร : ประชุมช่าง จำกัด, 2542

วารุณี พานิชผล. การวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชอาหารสัตว์. กรุงเทพมหานคร : กลุ่มงานวิเคราะห์อาหารสัตว์ กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์, 2541.

Garrett, Reginald H., Grisham, Charles M. Biochemistry New York

Abatzoglou, Nicolas, Chornet, Esteban. Acid hydrolysis of hemicellulose and cellulose : theory and application. Polysaccharides. 1007-1045. USA : Marcel Dekker, Inc., 1998

Abatzoglou, Nicolas, Chornet, Esteban. Polysaccharides 1998 , Marcel Dekker, Inc. , USA

Aguilar, R., และคณะ. Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse. Journal of Engineering 55 (2002):309-318

Chaptin, M.F., and Kennedy, J.F. Carbohydrate analysis and Analytical, 1987

Lehniger, A.L. Biochemistry. 2nd ed., New York : Worth Publisher, 1975

Spinks, J.W.T. and Woods, R.J. An introduction to radiation chemistry. 3rd ed., New York : John Weiley & Sons, Inc., 1990

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van soest (12)

สารละลาย Neutral detergent (NDF)

<u>สารเคมีที่ใช้</u>

1. โซเดียมมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate, USP.)
2. ไดโซเดียมเอทธิลีนไดอะมีนเตตระอะซีเตท (E.D.T.A) ไดไฮเดรต (cryatal , reagent grade)
3. โซเดียมบอเรต ($Na_2B_4O_7 . 10H_2O$, reagent grade)
4. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4, anhydrous , reagent grade)
5. 2-เอทธอกซี่ เอทธานอล (2-Ethoxyethanol , purified grade)
6. น้ำกลั่น

<u>วิธีเตรียมสารเคมี</u>

1. ชั่ง E.D.T.A 18.61 g (9.305 g สำหรับ 500 ml) และ $Na_2B_4O_7 . 10H_2O$ 6.81 g (3.405 g) ใส่ในบีกเกอร์เติมน้ำกลั่นที่ต้มร้อนแล้ว (90-100 $^{\circ}C$) ลงไปพอประมาณ คนให้ทั่วจนละลายหมด ถ้าละลายไม่หมดให้ใช้ความร้อนช่วย
2. นำมาผสมกับสารละลายของโซเดียมลอริลซัลเฟต 30 g (15g) กับ 2-เอทธอกซี่ เอทธานอล 10 ml (5 ml)
3. ชั่ง Na_2HPO_4 4.56 g (2.28 g) ใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นที่ต้มร้อนแล้ว (90-100 $^{\circ}C$) ลงไปพอประมาณ คนให้ทั่วจนละลายหมด ถ้าละลายไม่หมดให้ใช้ความร้อนช่วย นำมาผสมกับสารละลายข้างต้น คนให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาณ 1 ลิตร (500 ml)

การวิเคราะห์หาปริมาณ NDF

1. นำ Crucible ที่ล้างสะอาดแล้วไปอบในตู้อบแห้ง (over) อุณหภูมิ 100 °C นาน 1 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถอบแห้ง (Desiccator) ทิ้งให้เย็นแล้ว ชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 g ใส่ในบีกเกอร์ทรงสูง สำหรับวิเคราะห์หาเยื่อใยขนาด 600 ml
3. เติมสารละลาย Neutral detergent 100 ml และ Na_2SO_3 0.5 g
4. นำบีกเกอร์ไปตั้งบนเครื่องต้ม ต้มให้เดือดแล้ว ย่อยต่อไปอีก 60 นาที นับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือด
5. นำบีกเกอร์ออกจากเครื่องต้ม กรองเอาตัวอย่างโดยใช้ผ้าขาวบาง แล้วล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ให้หมดโดยใช้น้ำร้อน (90-100 °C) จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 1200 ml แล้วถ่ายตะกอนลง Crucible ที่วางบนขวดกรอง
6. แช่ตะกอนด้วยอะซีโตนประมาณ 30 นาที กรองอะซิโตนออก แล้วล้างตะกอนด้วยอะซีโตนจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 6 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ออกมาใส่ในโถอบแห้ง ทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักของ Crucible คือ ปริมาณ NDF

วิธีคำนวณ

% NDF = [(น.น. Crucible & น.น.เยื่อใย) - น.น. Crucible] x100 / น.น. ตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลาย Acid detergent (ADF)

สารเคมีที่ใช้

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4 , A.R. , percent assay เท่ากับ 100)
2. ซิลติลไตรเมทชิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethyl ammoniumbromide , tech. grade)
3. น้ำกลั่น

วิธีเตรียมสารเคมี

1. ชั่งกรดซัลฟูริก 49.04 g (27 ml) ใส่ในขวด Volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่พอประมาณ ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ให้เย็น
2. เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
3. เติมซิติลไตรเมทธิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 20 g เขย่าให้เข้ากัน

การวิเคราะหาปริมาณ ADF

1. นำ Crucible ที่ล้างสะอาดแล้วไปอบในตู้อบแห้ง (over) อุณหภูมิ 100 °C นาน 1 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถอบแห้ง (Desiccator) ทิ้งให้เย็นแล้ว ชั่งน้ำหนัก
2. นำตะกอนที่ได้จากการหา NDF นำมาถ่ายใส่บีกเกอร์ทรงสูง สำหรับวิเคราะห์หาเยื่อใย ขนาด 600 ml
3. เติมสารละลาย Acid detergent 100 ml
4. นำบีกเกอร์ไปตั้งบนเครื่องต้ม ต้มให้เดือดแล้ว ย่อยต่อไปอีก 60 นาที นับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือด
5. นำบีกเกอร์ออกจากเครื่องต้ม กรองเอาตัวอย่างโดยใช้ผ้าขาวบาง แล้วล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ให้หมดโดยใช้น้ำร้อน (90-100°C) จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 1200 ml แล้วถ่ายตะกอนลง Crucible ที่วางบนขวดกรอง
6. แช่ตะกอนด้วยอะซีโตนประมาณ 30 นาที กรองอะซิโตนออก แล้วล้างตะกอนด้วยอะซีโตนอีกครั้งจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 6 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ออกมาใส่ในโถอบแห้ง ทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักของ Crucible คือ ปริมาณ ADF

วิธีคำนวณ % ADF = [(น.น. Crucible & น.น.เยื่อใย) - น.น. Crucible] x100 / น.น. ตัวอย่าง

วิธีคำนวณ % Hemicellulose = % NDF - % ADF

สารละลายกรดซัลฟูริคเข้มข้น 72 % (ADL)

สารเคมีที่ใช้

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4)
2. น้ำกลั่น

วิธีเตรียมสารเคมี

ตวงน้ำกลั่น 440 ml ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ชั่งกรดซัลฟูริค 1200 g (560 ml) ค่อย ๆ ใส่ลงในบีกเกอร์ คนให้เข้ากัน ตั้งขวดไว้ในน้ำที่เย็น เติมกรดซัลฟูริกจนครบ วัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายให้ได้เท่ากับ 1.634

การวิเคราะห์หาปริมาณ Lignin

1. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา ADF เรียบร้อยแล้ววางในถาดที่มีน้ำกลั่นอยู่ ระวังอย่าให้เยื่อใยใน Crucible เปียกน้ำ
2. เติมกรดซัลฟูริคเข้มข้น 72 % ลงไปประมาณครึ่ง Crucible ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่ว เพื่อให้เยื่อใยแยกจากกัน ไม่จับกันเป็นก้อน คอยเติมกรดเมื่อกรดแห้ง และต้องคนบ่อย ๆ
3. หลังจากนั้น 2 ชั่วโมง กรองกรดออก ล้างด้วยน้ำร้อน (90-100°) ประมาณ 1200 ml หรือ จนหมดกรด
4. นำ Crucible ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 8 ชั่วโมง เอาออกใส่โถอบแห้ง ปล่อยให้เย็น นำมาชั่งน้ำหนัก
5. นำ Crucible ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่โถอบแห้งทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่หายไป คือ ปริมาณลิกนิน

วิธีคำนวณ

% ลิกนิน = (น.น. เยื่อใยหลังการอบ - น.น เยื่อใยหลังการเผา) x100 / น.น. ตัวอย่าง

วิธีคำนวณ

% cellulose = (น.น. ADF-น.น. เยื่อใยหลังย่อยด้วยกรดและอบแห้ง) x 100 / น.น. ตัวอย่าง

ภาคผนวก ข

วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้วิธีของ Somogyi & Nelson (14)

สารละลายสำหรับการวัดหาค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

สารละลาย Somogyi

Somogyi I : ละลาย Na_2SO_4 จำนวน 72 กรัม ในน้ำกลั่น ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่ผ่านการต้มให้เดือด เติมโปแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรต จำนวน 6 กรัม, Na_2CO_3 จำนวน 12 กรัม และ $NaHCO_3$ จำนวน 8 กรัม ผสมลงไป เจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มแล้ว ให้ได้ปริมาตรให้เป็น 400 มิลลิลิตร

Somogyi II : ละลาย Na_2SO_4 จำนวน 18 กรัม ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือดแล้วในปริมาตร 75 cm^3 เติม $CuSO_4.5H_2O$ จำนวน 2 กรัม ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือดแล้ว เก็บไว้ในขวดสีชาผสม Somogyi I และ Somogyi II ในอัตราส่วน 4:1 โดยปริมาตรก่อนใช้ในแต่ละครั้ง

สารละลาย Nelson

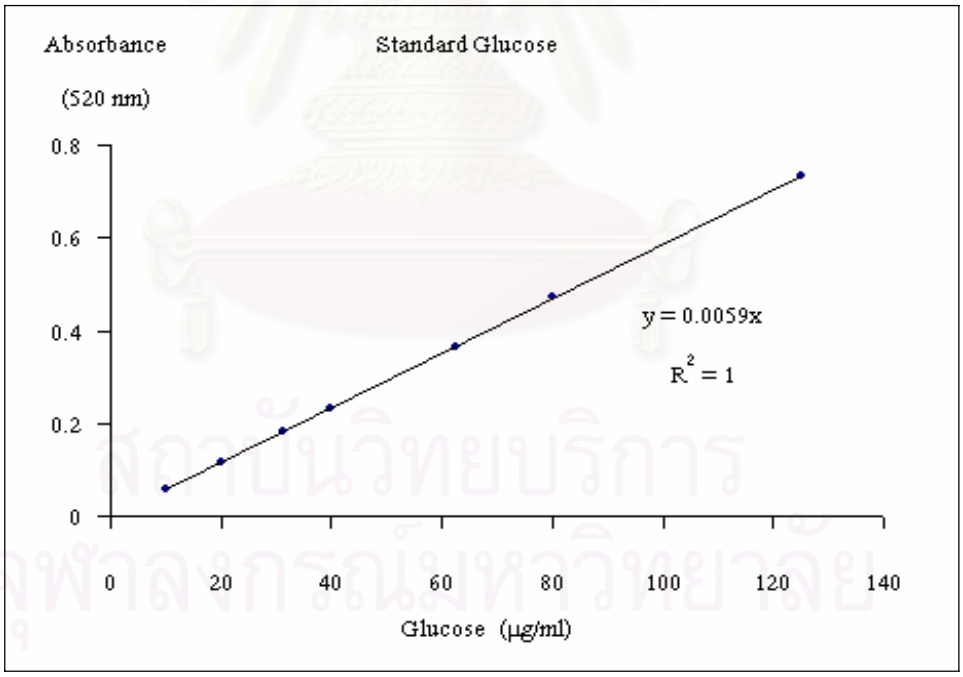
ละลายแอมโมเนียโมดิเลท จำนวน 25 กรัม ในน้ำกลั่น 450 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริคเข้มข้นในปริมาตร 21 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมสารละลายของโซเดียมไฮโดรเจนอาซิเนท ($Na_2HAsO_4.7H_2O$) จำนวน 3 g ที่ละลายในน้ำ 25 มิลลิลิตร ลงไป ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชาเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ก่อนการนำไปใช้

วิธีการทดลองหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

1. ดูดสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลาย Somogyi ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 15 นาที
2. ทำให้เย็นโดยแช่ในน้ำเย็น เติมสารละลาย Nelson 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วเติมน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร โดยการเทียบกับ blank ซึ่งใช้น้ำกลั่นแทนสารตัวอย่าง
3. อ่านค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสจากค่ามาตรฐาน ซึ่งได้จากการทดสอบโดยวิธีเดียวกัน

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลกลูโคสมาตราฐาน

glucose (μg/ml)	ค่า Absorbance
250.0	1.489
160.0	0.976
125.0	0.734
80.0	0.472
62.5	0.366
40.0	0.234
31.3	0.182
20.0	0.118
10.0	0.057



รูปที่ ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตาลกลูโคสมาตราฐานที่ 520 นาโนเมตร

คำนวณหาความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จากสมการ y = 0.0059x

โดย y คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 520 นาโนเมตร

x คือ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ภาคผนวก ค

High performance Liquid Chromatograhpy (HPLC)

High performance Liquid Chromatography หรือ HPLC เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาสารเคมีจากตัวอย่าง เพื่อจะได้ทราบถึงส่วนประกอบของสารตัวอย่าง Qualitative Analysis และ Quantitative Analysis

ในหลักการของ HPLC จะทำหน้าที่แยกสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ออกเป็นสารเคมีอิสระเพื่อที่จะได้ทราบถึงชนิด และปริมาณขององค์ประกอบ

วิธีการหาปริมาณของสารประกอบโดยใช้ HPLC

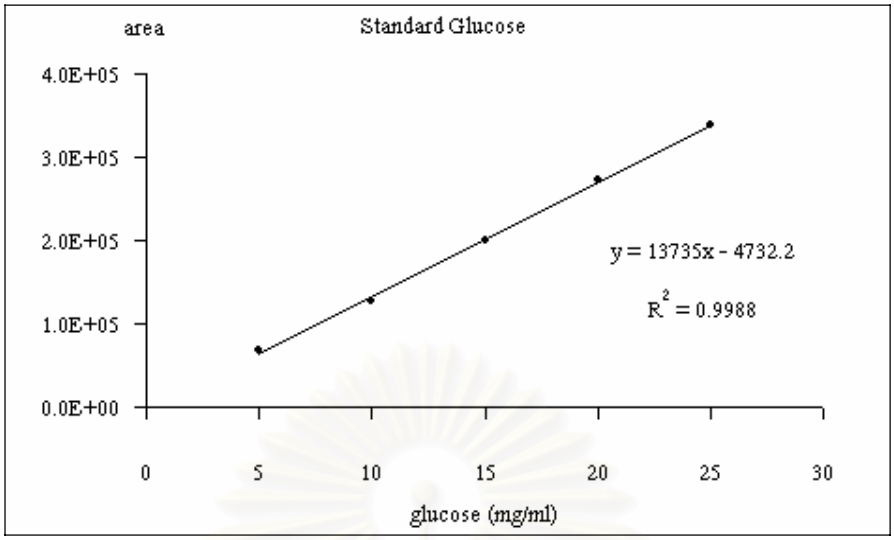
เป็นกระบวนการเปรียบเทียบสารประกอบที่ไม่ทราบความเข้มข้น กับสารละลายที่ทราบความเข้มข้น มีวิธีทำคือ

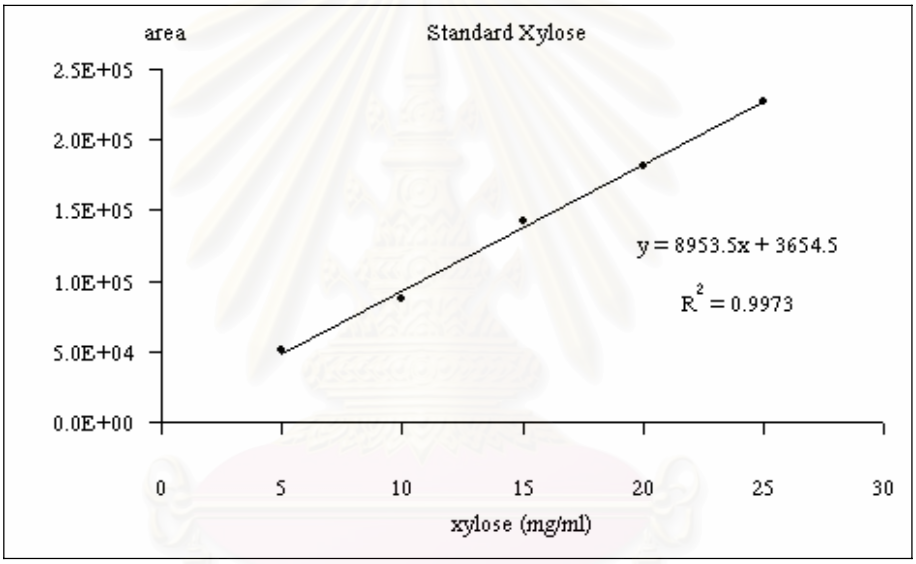
1. ฉีดชุดของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นเข้าไปใน HPLC เพื่อทำการตรวจสอบ Chromatograph จะแสดงพีคของชุดข้อมูลที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายที่ฉีดเข้าไป

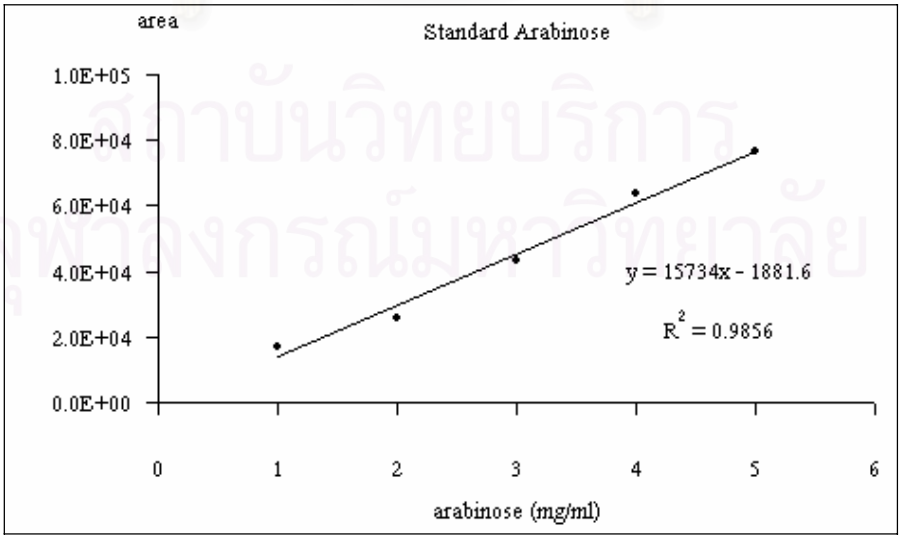
2. หาพื้นที่ใต้พีค แต่ละพีคนำข้อมูลมาทำเป็น calibration curve โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่ใต้กราฟกับความเข้มข้นของสารละลายมาตราฐาน

ตารางที่ ค.1 แสดงพื้นที่ใต้พีคของน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส

Glucose (mg/ml)	Area	Xylose (mg/ml)	Area	Arabinose (mg/ml)	area
5	68044	5	50790	1	17111
10	126837	10	87583	2	25585
15	200555	15	142066	3	43547
20	272381	20	181854	4	63571
25	338647	25	227492	5	76788







รูปที่ ค.1 แสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีคกับปริมาณสารละลายมาตราฐาน

3. ทำการฉีดชุดของสารละลายที่ต้องการทราบความเข้มข้นเข้าไปใน HPLC เพื่อทำการตรวจสอบ หาพื้นที่ใต้พีคของน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส

4. คำนวณหาปริมาณน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส จากสมการดังนี้

สมการของน้ำตาลกลูโคส คือ $y = 13735x - 4732.2$

สมการของน้ำตาลไซโลส คือ $y = 8953.5x + 3654.5$

สมการของน้ำตาลอะราบิโนส คือ $y = 15734x - 1881.6$

โดย y คือ พื้นที่ใต้พีคของน้ำตาล

x คือ ปริมาณน้ำตาล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน 2522 สถานที่เกิด กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ จากมหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปี พ.ศ. 2543 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย