

การผลิตน้ำตาจากการย่อยสลายโมเลกุลหญ้ากีนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่าและหญ้ารูซี่  
โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก



นางสาวสุภัทรา ภัทรกิจโสภณ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF SUGAR FROM MOLECULAR DEGRADATION OF PURPLE GUINEA GRASS,  
KING GRASS, PANGOLA GRASS AND RUZI GRASS BY USING SULFURIC ACID  
AND GAMMA IRRADIATION WITH SULFURIC ACID



Miss Supat Pattarakitsopon

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วง  
หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่ โดยใช้กรด  
ซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก

โดย

นางสาวสุภัทร ภัทรกิจโสภณ


สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

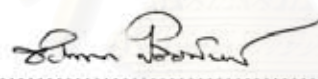
อาจารย์ที่ปรึกษา

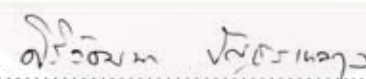
รองศาสตราจารย์ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

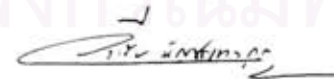
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทร์โยธา)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.วีระชัย บัญชรเทวกุล)

สุภัทรา ภักธกิจโสภณ: การผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่าและหญ้ารูซี่โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก. (PRODUCTION OF SUGAR FROM MOLECULAR DEGRADATION OF PURPLE GUINEA GRASS, KING GRASS, PANGOLA GRASS AND RUZI GRASS BY USING SULFURIC ACID AND GAMMA IRRADIATION WITH SULFURIC ACID) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล, 118 หน้า.

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในหญ้า ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้เป็น น้ำตาลไซโลส น้ำตาลอะราบิโนส น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลกลูโคส สำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลซึ่งเป็นที่ต้องการอย่างมากในปัจจุบัน วัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญังกินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่าให้เป็นน้ำตาล โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก ผลการวิจัยพบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ ขนาดของหญ้า 710  $\mu\text{m}$ , อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที, ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5%-10% (อัตราส่วนหญ้าต่อกรดซัลฟูริก 1:10 w/v) และปริมาณรังสี 500-1100 kGy ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญังกินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก ปริมาณน้ำตาลที่ได้ คิดเป็น 54.28%, 58.37%, 74.15% และ 65.95% (w/w) ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรดย่อยสลายโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันโดยไม่ฉายรังสี พบว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโดยใช้รังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก มีค่าสูงกว่าการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว 8%, 9%, 12% และ 8% (w/w) ในหญังกินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า ตามลำดับ

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อนิสิต.....สุภัทรา ภักธกิจโสภณ  
 สาขาวิชา...นิวเคลียร์เทคโนโลยี...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล  
 ปีการศึกษา.....2551.....



## 4970650321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORDS: Molecular Degradation / Purple Guinea Grass / King Grass / Pangola Grass / Ruzi Grass / Cellulose / Hemicellulose / Acid Hydrolysis / Gamma Irradiation

SUPAT PATTARAKITSOPON: PRODUCTION OF SUGAR FROM MOLECULAR DEGRADATION OF PURPLE GUINEA GRASS, KING GRASS, PANGOLA GRASS AND RUZI GRASS BY USING SULFURIC ACID AND GAMMA IRRADIATION WITH SULFURIC ACID. ADVISOR: ASSOC. PROF. SIRIWATTANA BANCHORNDHEVAKUL, 118 pp.

Cellulose and hemicellulose, the main composition of grass, can be converted to mono-sugars (xylose, arabinose, fructose and glucose) and then further produce ethanol by fermentation. The objective of this research is to investigate the optimal condition for cellulosic and hemicellulosic degradation to sugar as a product by both acid hydrolysis and by gamma irradiation followed by acid hydrolysis. The results indicate that the optimal conditions for cellulose and hemicellulose degradation are: 710  $\mu\text{m}$  sample particle size, digested by 5%-10% sulfuric acid (1:10 sample to acid ratio (w/v)) at 121 $^{\circ}\text{C}$  for 10 min and gamma irradiated at 500 kGy to 1100 kGy. These conditions produce sugar at a conversion yield of 54.28%, 58.37%, 74.15% and 65.95% (w/w) from Purple Guinea Grass, Ruzi Grass, King Grass and Pangola Grass respectively. Compared to the acid hydrolysis under the same condition with no gamma irradiation, the gamma irradiation of grasses followed by acid hydrolysis produce larger conversion yields of sugar which increased by 8%, 9%, 12% and 8% (w/w) from Purple Guinea Grass, Ruzi Grass, King Grass and Pangola Grass, respectively.

Department.....Nuclear Technology..... Student's signature Supat Pattarakitsopon  
 Field of study.....Nuclear Technology..... Advisor's signature ศิริวัฒน์ บันชอร์นเดวกุล  
 Academic year....2008.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล อาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับความรู้ทางวิชาการ คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย คำแนะนำในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ตลอดจนถึงความช่วยเหลือต่างๆ ที่อาจารย์มีให้เสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน สำหรับการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางวิชาการต่างๆ คำแนะนำสั่งสอน ความช่วยเหลือ ความเมตตา ความปรารถนาดี ความเอาใจใส่ และกำลังใจทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิตที่มีให้กับลูกศิษย์ทุกคนเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณวีระชัย จุนขุนทด เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา จ.นครราชสีมา ในความอนุเคราะห์ตัวอย่างหญ้าทั้ง 4 ชนิด ตลอดจนความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างหญ้าบดแห้งทั้งหมดที่นำมาใช้ในการวิจัย และเจ้าหน้าที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณสุนันท์ รังษีกาญจน์ส่อง ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC และคำแนะนำอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย

ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนนิสิต สำหรับคำแนะนำในการทำงาน มิตรภาพ กำลังใจ และความปรารถนาดีที่มีให้กันเสมอมา รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาชีวเคสียร์เทคโนโลยีสำหรับมิตรภาพ ความช่วยเหลือ ทั้งยังเป็นธุระคอยแจ้งเรื่องสำคัญให้ทราบอยู่เสมอ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินทุนสนับสนุนในการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาชีวเคสียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาหาความรู้ ได้เรียนรู้ในสิ่งใหม่ๆ ได้รับการศึกษาและปลูกฝังในสิ่งที่ดีและมีคุณค่าจากคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รู้จักเพื่อนใหม่ ก่อให้เกิดเป็นมิตรภาพและความประทับใจที่ได้มีโอกาสร่วมเป็นส่วนหนึ่งของภาควิชาชีวเคสียร์เทคโนโลยีแห่งนี้

ท้ายสุด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัวภัทรกิจโสภณ สำหรับความรัก ความห่วงใย กำลังใจ ความช่วยเหลือสนับสนุนในทุกด้าน และคอยอยู่เคียงข้างข้าพเจ้าเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 พันธุ์หญ้า (Grass Species).....	6
2.1.1.1 หญ้ากินนีสีม่วง (Purple Guinea Grass).....	7
2.1.1.2 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (King Grass).....	8
2.1.1.3 หญ้าแพนโกล่า (Pangola Grass).....	9
2.1.1.4 หญ้ารูซี (Ruzi Grass).....	10
2.1.2 องค์ประกอบในหญ้า.....	12
2.1.2.1 โครงสร้างเซลลูโลส.....	12
2.1.2.2 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส.....	13
2.1.2.3 โครงสร้างลิกนิน.....	15
2.1.3 การย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าด้วยสารเคมี.....	17
2.1.3.1 การย่อยสลายด้วยกรด (Acid Degradation).....	17
2.1.3.2 การย่อยสลายด้วยด่าง (Alkaline Degradation).....	19

บทที่	ช หน้า
2.1.3.3 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Degradation).....	19
2.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในหญ้า.....	21
2.1.5 เคมีรังสีของโพลีเมอร์.....	25
2.1.6 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น.....	29
2.1.7 การใช้ประโยชน์จากการย่อยสลายโพลีเมอร์ (Polymer degradation).....	31
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในหญ้า.....	45
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสใน หญ้าด้วยกรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	47
4.2.1 หญ้ากินนีสีม่วง.....	47
4.2.2 หญ้าลูซี่.....	72
4.2.3 หญ้าเนเปียร์ยักษ์.....	79
4.2.4 หญ้าแพนโกล่า.....	83
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	108
ภาคผนวก ค.....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	118



## สารบัญตาราง

	หน้า
1.1 พันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่แนะนำให้ใช้เพาะปลูกในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย.....	6
2.1 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยกรด.....	19
2.2 โพลีเมอร์ที่เกิด Cross-linking และ Degradation ได้.....	28
2.3 ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาขณะฉายรังสีโพลีเมอร์.....	29
3.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเครื่อง HPLC.....	44
4.1 ปริมาณเยื่อใยในหญ้า.....	45
4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	48
4.3 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด (ก.) 300 $\mu\text{m}$ และ (ข.) 710 $\mu\text{m}$ ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	50
4.4 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด 710 $\mu\text{m}$ ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (ก.) ที่อุณหภูมิ 100°C และ (ข.) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	53
4.5 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	56
4.6 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที.....	59
4.7 ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที.....	64
4.8 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	68
4.9 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วง โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	71

ตาราง	หน้า
4.10 สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ารัฐี โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	72
4.11 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ารัฐีที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	73
4.12 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ารัฐีที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	75
4.13 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้ารัฐี โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	78
4.14 สภาวะเหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	79
4.15 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้าเนเปียร์ยักษ์ที่ฉายรังสี 300, 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	80
4.16 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้า เนเปียร์ยักษ์โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	82
4.17 สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าแพนโกล่า โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	83
4.19 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้าแพนโกล่าที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 3%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	86
5.1 สภาวะเหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้า โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	88
5.2 สภาวะเหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้านินีสีม่วง หญ้ารัฐี หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่าโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสี แกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก.....	89

ตาราง	หน้า
5.3 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมา ร่วมกับกรดซัลฟูริก.....	92
5.4 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลสในหญ้าซีโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก...	93
5.5 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลสในหญ้าเนเปียร์ยักษ์โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมา ร่วมกับกรดซัลฟูริก.....	93
5.6 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลสในหญ้าแพนโกล่าโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมา ร่วมกับกรดซัลฟูริก.....	94
5.7 ต้นทุนในการผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าโดยใช้ กรดซัลฟูริกเปรียบเทียบกับการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก.....	96
ข.1 พื้นที่ได้ฟีดของน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส.....	111

## สารบัญภาพ

	หน้า
1.1 พื้นที่สำหรับผลิตเสบียงสัตว์เพื่อจำหน่าย.....	3
2.1 หญ้ากินนีสีม่วง .....	11
2.2 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ .....	11
2.3 หญ้าแพนโกล่า .....	11
2.4 หญ้ารูซี่ .....	11
2.5 สายโซ่ตรงของกลุโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีต้าไกลโคสิติกประกอบเป็นโครงสร้าง ของเซลลูโลส.....	12
2.6 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลส.....	14
2.7 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....	14
2.8 สูตรโครงสร้างของลิกนิน.....	16
2.9 กลไกปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก.....	20
2.10 การวิเคราะห์เยื่อใยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธีของ Van Soest.....	24
2.11 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสี.....	26
3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้า.....	41
4.1 องศาบิกจากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญังกินนีสีม่วงที่มีขนาด (ก.) 300 $\mu\text{m}$ และ (ข.) 710 $\mu\text{m}$ ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	51
4.2 องศาบิกจากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญังกินนีสีม่วงที่มีขนาด 710 $\mu\text{m}$ ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (ก.) ที่อุณหภูมิ 100°C และ (ข.) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	54
4.3 องศาบิกจากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญังกินนีสีม่วง ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	57
4.4 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญังกินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที.....	60

ภาพประกอบ	หน้า	
4.5	ฟีดของน้ำตาลไซโลส น้ำตาลอะราบิโนส น้ำตาลฟรุคโตส น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลแมนโนส จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	62
4.6	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที.....	65
4.7	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	69
4.8	ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้าที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที.....	74
4.9	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้าที่ฉายรังสี 300, 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	76
4.10	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้าเนเปียร์ยักษ์ที่ฉายรังสี 300, 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	81
4.11	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหญ้าแพนโกล่าที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 3%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที.....	85
ข.1	ความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้พีคกับปริมาณสารละลายมาตรฐาน.....	112
ข.2	แผนภาพการทำงานของเครื่อง High performance Liquid Chromatography.....	113
ข.3	ชุดอุปกรณ์ของเครื่อง High performance Liquid Chromatography.....	113
ค.1	ปรากฏการณ์การหักเหของแสง.....	115
ค.2	การหักเหของแสงผ่าน Refractometer.....	116
ค.3	เครื่องวัดความหวาน Brix Refractometer ที่ใช้ในงานวิจัย.....	116



## สัญลักษณ์และคำย่อ

ACN	=	Acetonitrile
ADF	=	Acid Detergent Fiber
ADL	=	Acid Detergent Lignin
ADS	=	Acid Detergent Soluble
AIA	=	Acid Insoluble Ash
A.R.	=	Analytical Reagent
CC	=	Cell content
CF	=	Crude Fiber
CP	=	Crude Protein
cm	=	Centimeter
Conc.	=	Concentration
DM	=	Dry Matter
DMRT	=	Duncan's New Multiple's Range Test
E.D.T.A	=	Ethylenediaminetetraacetic Acid
eV, MeV	=	Electron Volt, Mega Electron Volt
H, C, N, O, S	=	Hydrogen, Carbon, Nitrogen, Oxygen, Sulfur
HPLC	=	High Performance Liquid Chromatography
kGy, MGy	=	Kilo Grey, Mega Grey
NDF	=	Neutral Detergent Fiber
NDS	=	Neutral Detergent Soluble
NFE	=	Nitrogen Free Extracts
OM	=	Organic Matter
OMD	=	Organic Matter Digestibility
P	=	Probability
R, H	=	อนุมูลอิสระแอลคิล, อนุมูลอิสระไฮโดรเจน
RID	=	Refractive Index Detectors
USP	=	The United States Pharmacopeia

Min	=	minute
mm	=	Millimeter
mg/ml	=	milligram/milliliter
ml/min	=	milliliter/minute
v/v	=	volume/volume
w/v	=	weight/volume
w/w	=	weight/weight
g, kg	=	Gram, Kilogram
pg	=	Pictogram
$\mu\text{g}$	=	Microgram
$\mu\text{m}$	=	Micrometer
$\mu\text{L}$	=	Micro liter
$^{\circ}\text{C}$	=	Degree Celsius
wt %	=	The number of grams of solute in 100 grams of solution

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีแหล่งทรัพยากรธรรมชาติด้านพลังงานอยู่น้อย ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ จึงจำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศทำให้ต้องสูญเสียเงินตราเป็นจำนวนมาก และในปัจจุบันรัฐบาลได้ให้ความสำคัญในการวิจัยและพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานจากชีวมวล เช่น เอทานอลและไบโอดีเซล ซึ่งเอทานอลเป็นผลผลิตที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตร สามารถนำมาทดแทนสาร MTBE ในน้ำมันเบนซิน 95 ที่เรียกว่าแก๊สโซฮอล์ได้

สำหรับการผลิตเอทานอลนั้นโดยทั่วไปนิยมนำผลผลิตทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด ต้นอ้อยและข้าว ซึ่งกระบวนการผลิตจะต้องใช้วัตถุดิบเหล่านี้เป็นปริมาณมาก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นอาหารเลี้ยงประชากรมากกว่า ดังนั้นการหาแหล่งวัตถุดิบอื่นที่มีอยู่ในประเทศที่สามารถนำมาผลิตเอทานอลให้เพียงพอต่อความต้องการในปัจจุบันจึงเป็นประเด็นที่ควรจะศึกษาวิจัย

จากข้อมูลของศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์ รายงานว่า ปี พ.ศ. 2549 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหญ้าและพืชอาหารสัตว์ทั้งหมด 1,873,373 ไร่ และพื้นที่ทุ่งหญ้าสาธารณะมีทั้งหมด 3,152,715 ไร่ (ที่มา: สำนักงานปศุสัตว์จังหวัด) จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีพื้นที่ที่ใช้ในการเพาะปลูกหญ้ามากพอสมควร

เมื่อพิจารณาในปีงบประมาณ พ.ศ. 2548 กองอาหารสัตว์ได้ทำโครงการผลิตกล้าพันธุ์และท่อนพันธุ์พืชอาหารสัตว์เพื่อทดแทนการขาดแคลนเมล็ดพันธุ์ โดยสนับสนุนให้เกษตรกรผลิตกล้าพันธุ์และท่อนพันธุ์จำหน่ายเป็นอาชีพเสริม ขณะนี้มีเกษตรกรเข้าร่วมโครงการแล้วจำนวน 1,162 ราย 63 จังหวัด มีพื้นที่การผลิตรวม 3,915 ไร่ ผลผลิต 6,800 ต้นต่อปี

พิจารณาในปีงบประมาณ พ.ศ. 2549 มีพื้นที่ที่ผลิตเสบียงสัตว์เพื่อจำหน่ายเพิ่มขึ้นเป็น 32,945 ไร่ ผลผลิตเสบียงสัตว์ก็จกรรมนาหญ้าตั้งแต่เดือนตุลาคม 2548 ถึงเดือนกันยายน 2549

ผลิตได้ 96,615,832 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 96,615 ตัน มีเกษตรกรให้ความสนใจและขยายผลไปทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย ซึ่งพิจารณาข้อมูลดังรูปที่ 1.1

หญ้าเป็นพืชอาหารสัตว์ที่มีการสนับสนุนให้เกษตรกรเพาะปลูกกันมากในปัจจุบันเพราะเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ง่าย ขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว ให้ผลผลิตดี ไม่ต้องการการดูแลรักษาเหมือนพืชอื่นๆ และสามารถปลูกได้ทั่วไป ดังจะเห็นได้จากโครงการนาหญ้าซึ่งเป็นโครงการในพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวที่สนับสนุนให้เกษตรกรขยายการเพาะปลูกหญ้าออกไปทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย และมีแนวโน้มเพิ่มการผลิตขึ้นทุกปี

โครงสร้างหลักของหญ้าประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส คิดเป็น 60-70% และเมื่อนำมาคิดเทียบกับปริมาณการผลิตหญ้าในปี พ.ศ. 2549 ผลิตได้ 96,615,832 กิโลกรัม พบว่ามีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสคิดเป็น 57,969,499-67,631,082 กิโลกรัม ซึ่งนับว่ามีปริมาณการผลิตที่มาก ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากหญ้า คือ การย่อยสลายโครงสร้างเหล่านี้ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายเซลลูโลสจะเป็นน้ำตาลกลูโคส สำหรับเฮมิเซลลูโลสเมื่อนำมาย่อยสลายจะได้น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลอะราบิโนส และหากคิดประสิทธิภาพของการผลิตน้ำตาลที่ 80% จะได้ปริมาณน้ำตาลมากถึง 46,375,599-54,104,865 กิโลกรัม หญ้าจึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจตัวอย่างหนึ่ง ที่จะนำมาใช้ผลิตน้ำตาลเพื่อเป็นสารตั้งต้นไปสู่การผลิตเอทานอลต่อไป

จากโครงสร้างที่กล่าวมานี้เป็นโครงสร้างที่ย่อยได้ยาก การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โดยปริมาณน้ำตาลที่ได้จะขึ้นกับสภาวะในการไฮโดรไลซ์ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด ระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ อุณหภูมิและความดันระหว่างเกิดการปฏิกิริยา และอีกวิธีหนึ่งคือการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสด้วยรังสีก่อนจากนั้นจึงทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดต่อไป ซึ่งรังสีจะช่วยย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาของการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด โดยวิธีการใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดนี้จะสามารถให้ผลการผลิตที่ดีและสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าการใช้เอนไซม์ซึ่งมีราคาแพงและทำให้ต้นทุนการผลิตสูง





## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่าและหญ้ารูซี่ให้เป็นน้ำตาล โดยใช้กรดซัลฟูริกและรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่
- 1.3.2 หาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าให้เป็นน้ำตาลโดยใช้กรดซัลฟูริกและรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ ระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดและปริมาณรังสีแกมมา
- 1.3.3 วิเคราะห์หาค่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยใช้ค่า NDF, ADF และ ADL
- 1.3.4 วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลด้วยวิธีทางเคมีและ/หรือใช้เครื่องมือวิเคราะห์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ หญ้าแพนโกล่าและหญ้ารูซี่ เพื่อให้เป็นน้ำตาลเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอล

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้า และรวบรวมเอกสาร ข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 เตรียมตัวอย่างโดยนำหญ้าแห้ง 4 ชนิด คือ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่ มาอบแห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C นำมาบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นร่อนด้วย Test sieve ที่มี Mesh size 710  $\mu\text{m}$  และ 300  $\mu\text{m}$
- 1.5.3 นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาค่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยใช้ค่า NDF ADF และ ADL
- 1.5.4 หาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ ระยะเวลาในการย่อยสลายด้วยกรด และปริมาณรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก
- 1.5.5 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลโดยใช้เครื่องมือทางเคมีมาช่วยวิเคราะห์
- 1.5.6 นำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัยเบื้องต้นมาเป็นตัวอย่างในการผลิตน้ำตาลจากหญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่ ในขั้นต่อไป
- 1.5.7 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 2.1.1 พันธุ์หญ้า (Grass Species)

ประมาณกันว่าในโลกมีพืชตระกูลหญ้าทั้งหมดกว่า 10,000 ชนิด (Species) แต่ที่มีการนำมาใช้ในการปลูกสร้างทุ่งหญ้ามีประมาณ 40 ชนิด (Humphreys, 1993) สำหรับในเขตร้อนอย่างประเทศไทยมีการใช้เพื่อทำทุ่งหญ้าเพียง 15-20 ชนิด เท่านั้น และสำหรับพันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่แนะนำให้ใช้เพาะปลูกในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย เป็นดังตาราง 1.1

ตาราง 1.1 พันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่แนะนำให้ใช้เพาะปลูกในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย

ภูมิภาค	พันธุ์พืชอาหารสัตว์ที่แนะนำ
ที่ลุ่มภาคกลางและภาคเหนือ	หญ้าแพนโกล่า หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ หญ้ารูซี่
ที่ดอนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือและภาคตะวันออก	หญ้ากินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ ถั่วคาวาลเคด หญ้าบาน่า
ที่ลุ่มภาคใต้	หญ้าแพนโกล่า หญ้ากินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าอะตราตัม หญ้าพลีแคทูลัม
ที่ดอนภาคใต้บริเวณพื้นที่ว่างระหว่าง ต้นยาง	หญ้ากินนีสีม่วง หญ้ารูซี่

หมายเหตุ: สำหรับงานวิจัยนี้ใช้หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่

### 2.1.1.1 หญ้ากินนีสีม่วง (Purple Guinea Grass) *Panicum maximum* TD58

หญ้ากินนีสีม่วง เป็นหญ้าที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศร้อนชื้นเจริญเติบโตแบบกอตั้ง ลำต้นแตกแขนงเป็นกอคล้ายกอตะไคร้ มีความสูง 2-3 เมตร มีใบขนาดใหญ่ ดอก อ่อนนุ่ม ส่วนของข้อปล้อง ข้อดอกและเมล็ดมีสีม่วงอมเขียว ต่างจากหญ้ากินนีพันธุ์อื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่มีสีเขียวอย่างเด่นชัด ขนาดของเมล็ดใหญ่กว่ากินนีธรรมดา

มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนและร้อนชื้นของทวีปแอฟริกา อเมริกากลางและอเมริกาใต้ ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยเป็นครั้งแรกโดยเจ้าพระยาสุรวงศ์ เมื่อปี พ.ศ. 2444 โดยนำเข้ามาจากประเทศมาเลเซีย (ตรีพล, 2527) และต่อมาในปี พ.ศ. 2472 Mr. R.P. Jones ก็ได้นำเข้ามาปลูกเป็นพืชอาหารสัตว์อีกครั้ง

หญ้ากินนีสีม่วงมีลักษณะทั่วไปเหมือนหญ้ากินนีธรรมดา แต่มีลำต้นสูงใหญ่ ใบใหญ่ ดอกและอ่อนนุ่ม ผลผลิตสูงกว่า ติดเมล็ดง่าย การเจริญเติบโตแบบอายุหลายปี และมีลักษณะที่โดดเด่นคือ ทนต่อความแห้งแล้ง ให้ผลผลิตสูงและสัตว์ชอบกิน ทนต่อการเหยียบย่ำ ทนต่อการเผาไหม้ ตอปล้องต่อกรน้ำและปุ๋ยไนโตรเจนได้ดี เหมาะสำหรั้นำมาทำหญ้าแห้งหรือหญ้าหมักหญ้ากินนีสีม่วง สามารถปลูกได้เกือบทุกสภาพพื้นที่ ซึ่งเป็นที่ดอนตั้งแต่ดินเหนียว จนถึงดินทรายที่มีการระบายน้ำดี ทนทานต่อสภาพดินที่ค่อนข้างเค็มได้ดี ทนร่มเงา และเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 900 มิลลิเมตรต่อปี มีอัตราการติดเมล็ดดีมาก ซึ่งสามารถผลิตเมล็ดได้มากถึง 1.7-3.1 ล้านเมล็ดต่อกิโลกรัม เมล็ดที่ผลิตได้มีความงอกดีกว่ากินนีทั่วไป

การปลูกใช้เมล็ดพันธุ์หว่านหรือโรยเป็นแถวในอัตรา 0.5-1.0 กิโลกรัมต่อไร่ หรือปลูกโดยการแยกกอ นำไปปักดำที่ระยะปลูก 1-2 เมตร สามารถให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งได้สูงถึง 6.0-8.0 ตันต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีน 8-10% หญ้ากินนีสีม่วงสามารถปลูกร่วมกับถั่วลาย และกระถินได้ดี

การตัดหญ้ากินนีสีม่วงไปใช้เลี้ยงสัตว์ ควรตัดครั้งแรก 60 วันหลังปลูกและตัดครั้งต่อไปทุกๆ 30-40 วัน ในช่วงฤดูฝนหญ้าโตเร็วสามารถตัดได้ทุก 20-30 วัน โดยตัดสูงจากพื้นดิน 10-15 เซนติเมตร หญ้ากินนีสีม่วงเหมาะสำหรัใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสด หญ้าแห้งหรือจะปล่อยสัตว์เข้าแทะเล็มก็ได้

### 2.1.1.2 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (King Grass)

*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum gluacum*

หญ้าเนเปียร์มีหลายสายพันธุ์ คือ หญ้าเนเปียร์ธรรมดา (*Pennisetum purpureum*) หญ้าเนเปียร์แคระ หรือ Mott Dwarf Elephant Grass (*P. purpureum* cv. Mott) และหญ้าเนเปียร์ลูกผสม (*P. purpureum* x *P. americanum*) ซึ่งมี 2 สายพันธุ์ คือ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (King Grass) และหญ้านานา (Bana Grass)

หญ้าเนเปียร์เป็นพืชดั้งเดิมของแอฟริกันเขตร้อน นำเข้ามาประเทศไทยในปี พ.ศ. 2472 โดย นายอาร์.พี.โจนส์ หญ้าเนเปียร์แคระนำเข้ามาจากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดย นายวิฑูรย์ กำเนิดเพชร เมื่อเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2532 และหญ้าเนเปียร์ยักษ์นำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย โดย นายชาญชัย มณีดุลย์ เมื่อเดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2533 (ทิพา และคณะ, 2533)

หญ้าเนเปียร์ยักษ์เป็นหญ้าเขตร้อนที่มีอายุหลายปี มีลักษณะเป็นทรงต้น กอตั้งตรงคล้ายอ้อย และมีต้นสูง 2-3 เมตร เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่สูงประมาณ 3-4 เมตร ขยายพันธุ์ด้วยท่อนพันธุ์ สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนปนทรายถึงดินเหนียว และในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงและมีการให้น้ำชลประทานดี

หญ้าเนเปียร์ยักษ์มีศักยภาพในการให้ผลผลิตสูงกว่าหญ้าชนิดอื่นๆ จากผลงานวิจัยที่มีรายงานในประเทศไทย พบว่าให้ผลผลิตสูงกว่า 4,000 กิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อไร่ต่อปี ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับเกษตรกรที่มีพื้นที่จำกัด แต่ต้องการผลผลิตหญ้าในปริมาณมาก และจากรายงานการวิจัยศูนย์วิจัยอาหารสัตว์ปากช่อง พบว่าในสภาพที่มีการจัดการที่ดีจะสามารถให้ผลผลิตสูงถึง 3,380 กิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อไร่ ในช่วงระยะเวลา 6 เดือน (ศุภชัย, 2545)

การปลูกใช้ท่อนพันธุ์ 300-500 กิโลกรัม และในสภาพที่มีการจัดการที่ดีสามารถให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งสูงถึง 1.0-10.0 ตันต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีน 8-10%

การตัดหญ้าเนเปียร์ไปใช้เลี้ยงสัตว์ ควรตัดครั้งแรก 60-70 วันหลังปลูก และตัดครั้งต่อไปทุกๆ 30-45 วัน ในช่วงฤดูฝนหญ้าโตเร็วอาจตัดได้อายุน้อยกว่า 30 วัน โดยตัดชิดดินหญ้าเนเปียร์เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสดหรือหญ้าหมัก



### 2.1.1.3 หญ้าแพนโกล่า (Pangola Grass) *Digitaria eriantha*

หญ้าแพนโกล่า มีใบดก อ่อนนุ่มสัตว์ชอบกิน เหมาะสำหรับทำหญ้าแห้ง เป็นหญ้าค้ำปี มีลำต้นทอดนอนไปตามพื้นดิน แตกรากและหน่อตามข้อต้นอ่อนตั้งตรง เมื่ออายุมากขึ้นลำต้นจะทอดนอนไปตามผิวดิน ลักษณะของลำต้นเล็กไม่มีขน ยาว 40-64 เซนติเมตร มีปล้องจำนวน 4-13 ปล้อง ปล้องยาว 3-8 เซนติเมตร ตัวยาวมีลักษณะเรียว เล็ก ยาว 12-19 เซนติเมตร กว้างประมาณ 4 มิลลิเมตร กาบใบยาว 2-6 เซนติเมตร ขยายพันธุ์ด้วยท่อนพันธุ์

หญ้าแพนโกล่า เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ฝนตกเฉลี่ยมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี อุณหภูมิอยู่ในช่วง 19-35 องศาเซลเซียส ขึ้นได้ในดินหลายชนิดตั้งแต่ดินทรายจนถึงดินเหนียว ทนแล้งได้ดีแต่ก็สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ชื้นแฉะ ที่ชุ่มน้ำ หนองน้ำขัง เหมาะสำหรับปลูกในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง และสามารถควบคุมการให้น้ำได้ตลอดทั้งปี ดังนั้นการปลูกหญ้าแพนโกล่า จึงสามารถปลูกได้ทั้งในพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอน

การปลูกใช้ท่อนพันธุ์ อัตรา 250-300 กิโลกรัมต่อไร่ ในพื้นที่ลุ่มทำเทือกแบบนาหว่านน้ำตม ปรับระดับให้สูง 10-15 เซนติเมตร หว่านท่อนพันธุ์ให้ทั่วแปลง แล้วนาบกดท่อนพันธุ์ให้จมน้ำ แช่ทิ้งไว้ 1 สัปดาห์แล้วระบายน้ำออก สำหรับพื้นที่ดอน หลังจากไถพรวนแล้ว ชักร่องห่างกัน 30 เซนติเมตร ลึกประมาณ 30 เซนติเมตร วางท่อนพันธุ์ 3-5 ท่อนพันธุ์ เรียงต่อกันเป็นแถว ใช้ดินกลบเล็กน้อยและเหยียบให้แน่น

หญ้าแพนโกล่าสามารถให้ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 5.0-7.0 ตันต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีน 3-5%

การตัดหญ้าแพนโกล่า ไปใช้เลี้ยงสัตว์ ควรตัดครั้งแรก 60 วันหลังปลูก และตัดครั้งต่อไปทุก 40 วัน โดยตัดสูงจากพื้นดิน 5-10 เซนติเมตร หญ้าแพนโกล่าเหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสด หญ้าแห้งหรือหญ้าหมัก

#### 2.1.1.4 หญ้ารูซี (Ruzi Grass หรือ Congo Grass) *Brachiaria ruziziensis*

หญ้ารูซี เป็นหญ้าเขตร้อนประเภทค้างปี มีลักษณะการเจริญเติบโตแบบกึ่งตั้งกึ่งเลื้อย สูง 60-100 เซนติเมตร ลำต้นกลม แข็งเรียวยาว ไม่มีขน มีรากซึ่งแตกแขนงบริเวณโคนต้น ใบสีเขียวอ่อน อ่อนนุ่ม มีขนละเอียดคลุมทั้งด้านหน้าและหลังใบ ใบยาว 13-15 เซนติเมตร กว้าง 0.8-2.5 เซนติเมตร เจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่ดอนที่มีฝนตกมากกว่า 1,000 มิลลิเมตร และในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ ถ้าดินมีความอุดมสมบูรณ์ดี หญ้ารูซีจะตั้งตัว และแผ่คลุมผิวดินได้รวดเร็วใน 2-3 เดือน และหญ้ารูซีสามารถเจริญเติบโตในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำได้ โดยเฉพาะในดินร่วนปนทรายหรือดินเหนียวที่มีการระบายน้ำดี ทนแล้งพอสมควร ขึ้นได้ดีในพื้นที่ดอน ดินมีการระบายน้ำดี ไม่ทนต่อสภาพชื้นแฉะหรือน้ำท่วมขัง และสามารถทนต่อการเหยียบย่ำของสัตว์ มีคุณค่าทางอาหารสูง

แหล่งดั้งเดิมมีในประเทศคองโก ทวีปแอฟริกา นำเข้ามายังประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2511 โดยองค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย (อ.ส.ค.) (ตรีพล, 2527)

หญ้ารูซี มีลักษณะการเจริญเติบโตแบบอายุหลายปี และมีลักษณะที่โดดเด่นคือ สามารถผลิตเมล็ดได้มาก โดยผลิตเมล็ดขนาดกลางได้ประมาณ 270,000 เมล็ดต่อกิโลกรัม และเมล็ดมีความงอกสูง ทำให้สะดวกต่อการขยายพันธุ์ เป็นผลให้เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์นิยมปลูกหญ้ารูซีอย่างแพร่หลายทั่วประเทศ หญ้ารูซีออกดอกกราวเดือนพฤศจิกายนถึงกลางเดือนธันวาคม

การปลูกใช้เมล็ดพันธุ์หว่านหรือโรยเป็นแถว ในอัตรา 1.0-2.0 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถให้ผลผลิตน้ำหนักรวม 2.0-6.0 ตันต่อไร่ต่อปี มีปริมาณโปรตีน 7-10% หญ้ารูซีสามารถปลูกร่วมกับถั่วลาย ถั่วเพอโร และถั่วเวอร์นาโนได้ดี

การตัดหญ้ารูซีไปใช้เลี้ยงสัตว์ ควรตัดครั้งแรก 60-70 วันหลังปลูก โดยตัดสูงจากพื้นดิน 10-15 เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงทำการตัดหมุนเวียนทุก 30-45 วัน ในช่วงฤดูฝน หญ้าโตเร็วอาจตัดได้ที่อายุน้อยกว่า 30 วัน ถ้ามีการตัดหรือแทะเล็มบ่อยครั้ง หญ้ารูซีจะเลื้อยปกคลุมผิวดินได้หนาแน่น หญ้ารูซีเหมาะสำหรับใช้เลี้ยงโค กระบือ ในรูปหญ้าสด หญ้าแห้งหรือหญ้าหมัก ปัจจุบันเป็นพันธุ์หญ้าที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายที่สุด



รูปที่ 2.1 หญ้ากินนีสีม่วง (Purple Guinea Grass)



รูปที่ 2.2 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (King Grass)



รูปที่ 2.3 หญ้าแพนโกล่า (Pangola Grass)



รูปที่ 2.4 หญ้ารูซี (Ruzi Grass)

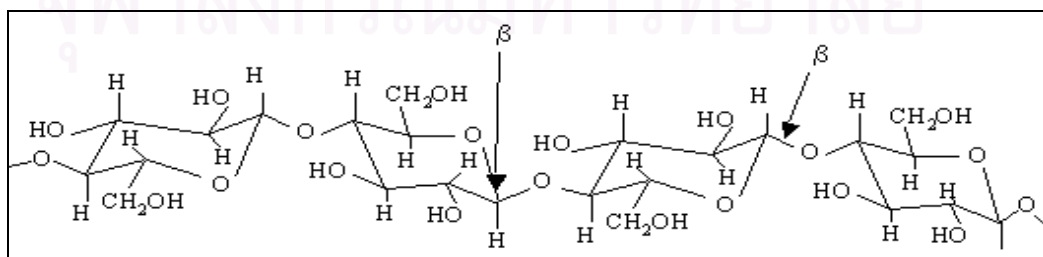
## 2.1.2 องค์ประกอบในหญ้า

หญ้า มีส่วนประกอบหลัก คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และภาวะที่เจริญเติบโตของหญ้า

### 2.1.2.1 โครงสร้างเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของผนังเซลล์พืช ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่พืช ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นโซ่ยาวของกลูโคส มีสูตรเคมี  $(C_6H_{10}O_5)_n$  พบว่าสาร Organic carbon ในโลกนี้มากกว่าครึ่งหนึ่งเป็นสารพวกเซลลูโลส เมื่อเซลลูโลสถูกย่อยจะแตกตัวออกให้น้ำตาลกลูโคส สัตว์ที่กินหญ้าจะสามารถย่อยเซลลูโลสได้โดยอาศัยแบคทีเรียในกระเพาะอาหารเป็นตัวย่อย เมื่อย่อยแล้วจะได้น้ำตาลกลูโคส แต่ถ้าสลายไม่สมบูรณ์จะได้เป็นน้ำตาลเซลโลไบโอส เซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ เพราะมีโมเลกุลใหญ่มาก ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,250-12,500 โมเลกุล

โดยธรรมชาติจะไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระ แต่มักรวมกับลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนโตแซน (pentose) กัม (gum) แทนนิน (tannins) ไขมัน (lipid) และสารเกิดสี (coloring matter) เป็นต้น และมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ เนื่องจากประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสต่อกันโดย  $\beta$ -1, 4-glycosidic linkage เป็นเส้นตรง ไม่มีแขน เรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบ โดยระหว่างสายแต่ละสายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) โดยเกิดขึ้นระหว่าง hydroxyl group ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมต่อกับโมเลกุลของหน่วยย่อยของเส้นสายเซลลูโลสอีกเส้นสายหนึ่ง พันธะไฮโดรเจนที่กล่าวมามีส่วนช่วยทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสซับซ้อน มันคงและยากต่อการย่อยสลายมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.5 เซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ในกรดแก่ ถ้าการย่อยเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว



รูปที่ 2.5 สายโซ่ตรงของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีต้าไกลโคสิติกประกอบเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส (ที่มา: U.S. Department of energy, 2004)



### 2.1.2.2 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

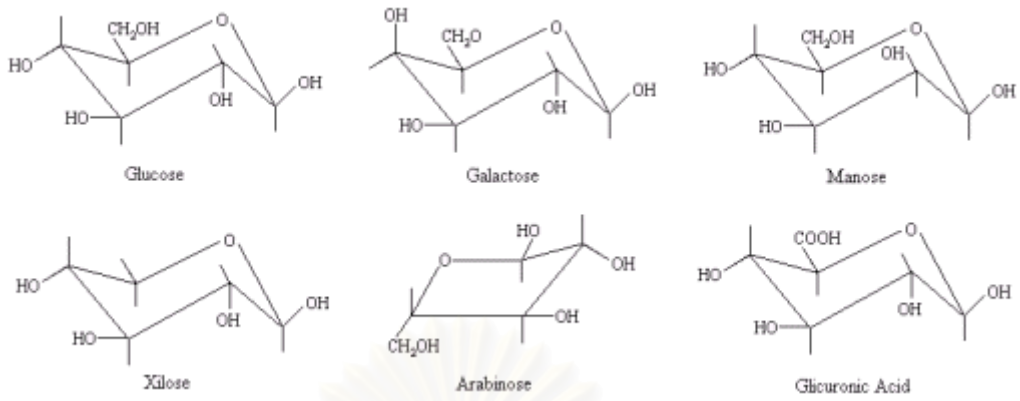
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลส แต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลคโตส แมนโนส ไซโลส อะราบิโนส รวมทั้งกรดกลูคูโรนิกและกาแลกทูโรนิก เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารอื่นๆ เช่น ลิกนินและเซลลูโลส ซึ่งเฮมิเซลลูโลสนั้นเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ พบมากในเมล็ด ชั่งข้าวโพด หน่ำรฐี หน่ำ มีสูตรทางเคมีคือ  $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$

เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ซึ่งส่วนมากเป็น ดี-ไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (xylose) หลายๆ โมเลกุลมาต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1, 4-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็น เฮเทอโรจีนัส (heterogeneous) ประกอบด้วยโพลีแซ็กคาไรด์หลายชนิดปนกัน คือ

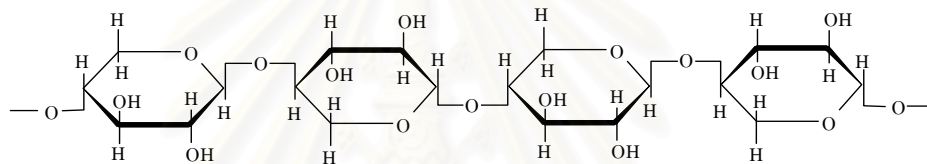
- เพนโตแซน(pentose) ส่วนใหญ่เป็นไซแลน(xylan) และอะราแบน(araban) เมื่อนำไปย่อยจะได้น้ำตาลไซโลส และอะราบิโนส (arabinose) ไซแลนเป็นสารที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าสารอื่น
- เฮกโซแซน(hexosan) ส่วนใหญ่เป็นแมนแนน(mannan) กาแลคแทน(galactan) และกลูแคน(glucan) เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส(mannose) กาแลคโตส (galactose) และกลูโคส ตามลำดับ
- โพลียูโรไนด์ (polyuronides) ส่วนมากเป็นสารประกอบของกรดโพลียูโรนิก (polyuronic acid) และยังพบกรดยูโรนิก (uronic acid) ปนอยู่ด้วย ที่สำคัญคือ เฮกซูโรนิก (hexuronic acid) เช่น เบตา-ดี-กลูคูโรนิก ( $\beta$ -D-glucuronic) เบตา-ดี-แมนนูโรนิก ( $\beta$ -D-mannuronic)

ข้อแตกต่างของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้สายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็น กิ่งก้านสาขามากกว่าและมีความยาวของสายโพลีเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส

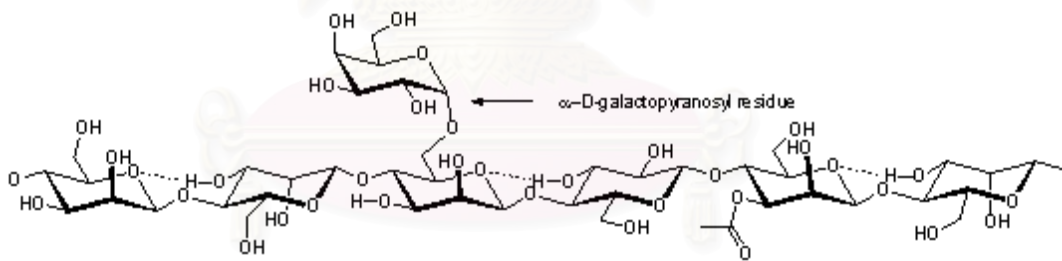




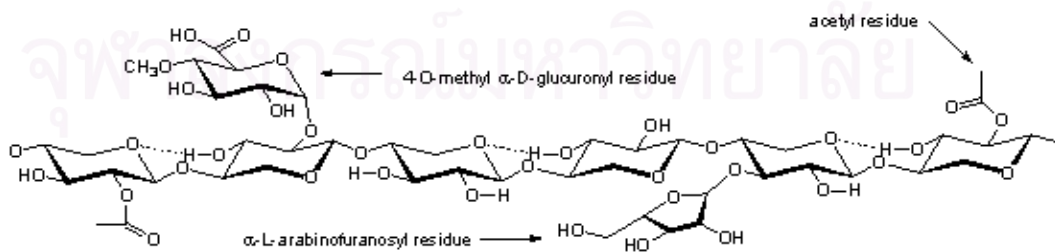
รูปที่ 2.6 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลส



ก. Hemicellulose



ข. Gramineaceous hemicellulose



ค. Softwood hemicellulose

รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

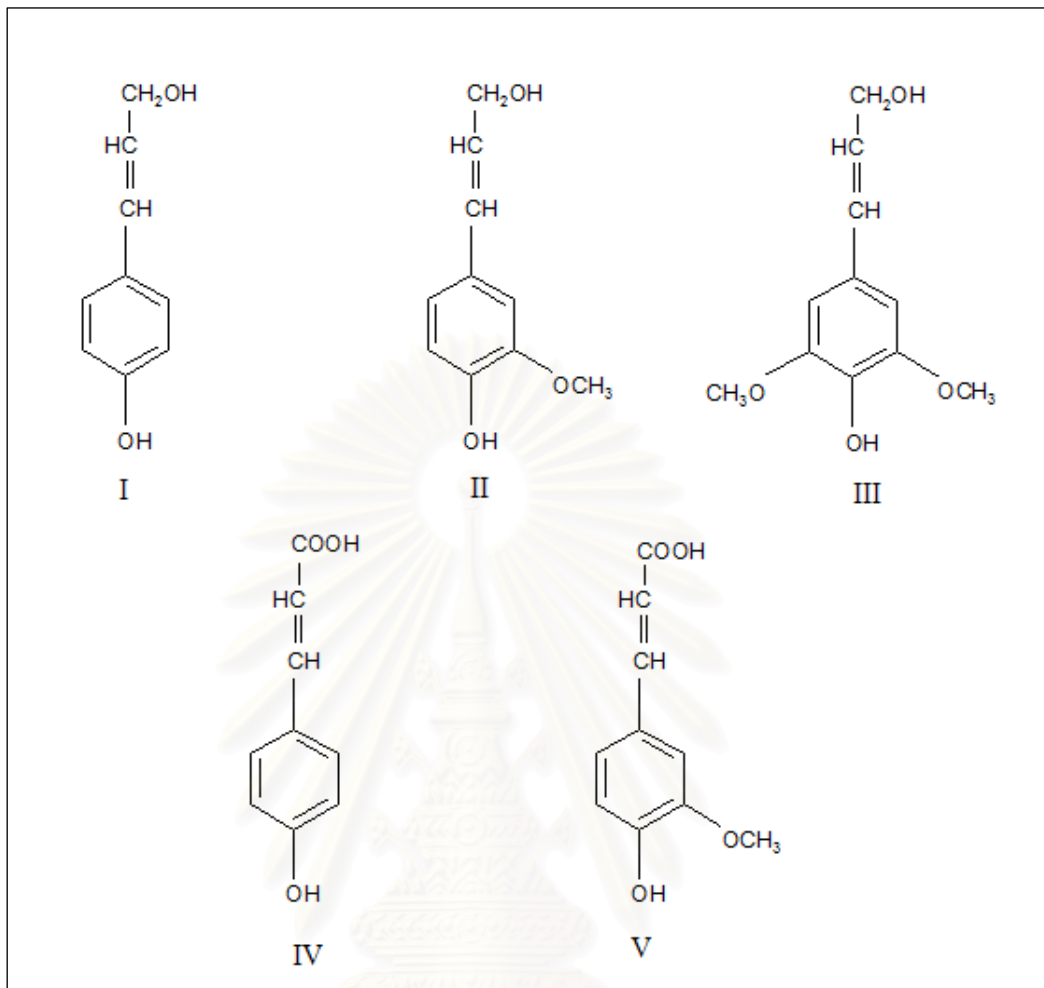
### 2.1.2.3 โครงสร้างลิกนิน

ลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของพืชในไม้เนื้อแข็ง มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 17–25 ในไม้เนื้ออ่อนจะมีสัดส่วนประมาณ ร้อยละ 24–32 ในเส้นใยเปลือกลำต้น (bast fibres) เช่น ป่านลินิน ป่านมนิลา และปอ มีอยู่เล็กน้อยและแทบจะไม่มีเลยในเส้นใยฝ้าย ไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ โดยไม้ที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง และในไม้ชนิดเดียวกันนี้ที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินมากด้วยเช่นกัน

ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่ไม่มีรูปผลึก เกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใย (Middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน และมีบางส่วนผสมอยู่ในเส้นใยด้วย โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ phenylpropane หรือสารประกอบ hydrocarbon ที่มี carbon 9 อะตอม ประมาณร้อยละ 65–67 มีสูตรเคมี  $C_9H_{8.83}O_{2.37} (OCH_3)_{0.96}$  โดยมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 3,000–30,000 (กิติ, 2544)

ลิกนิน เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น เพราะฉะนั้นจึงทำให้พืชที่มีลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน ลิกนินสามารถย่อยด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา

ลิกนินไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตแต่จะทำหน้าที่เคลือบผนังเซลล์พืช เป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) หรือเรียกว่าเป็น ฟีนอลิกโพลีเมอร์ (phenolic polymer) โดยมีหน่วยฟีนิลโพรเพน (phenyl propane unit) เรียงต่อกันแบบสุ่ม (random) ที่หน่วยฟีนอล (phenol unit) อาจเป็นกัวอิคิล (guaiacyl) หรือไซริงกิล (syringyl) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่ตำแหน่งแอลฟาและเบตาของโมเลกุลลิกนิน อาจเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลหรือคาร์บอนในหน่วยฟีนอลอาจเกิดพันธะกับคาร์บอนในอีกหน่วยหนึ่งภายในสายโพลีเมอร์ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลลิกนิน ทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น ในเอทานอล (ethanol) หรือเมทานอล (methanol) ที่ร้อนและในสารละลายไฮเดรอกไซด์ ปกติลิกนินจะอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืชบริเวณรอบๆ เซลลูโลส โดยเป็นตัวป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยอีกด้วย



I = p-cumaril alcohol

II = coniferil alcohol

III = sinapil alcohol

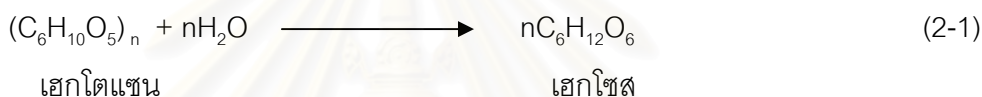
IV = p-cumaric acid

V = ferulic acid

รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของลิกนิน

### 2.1.3 การย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าด้วยสารเคมี

การไฮโดรไลซ์ด้วยสารเคมี (Chemical Degradation) เป็นการย่อยด้วยสารละลายกรดหรือสารละลายต่าง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการทำลายพันธะไกลโคสิติกระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจน (oxygen) เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเมื่อนำมาทำการย่อยจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ดังสมการ (2-1) และ (2-2) ถ้าเซลลูโลสถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ จะให้น้ำตาลกลูโคสเพียงอย่างเดียว ถ้าการย่อยไม่สมบูรณ์จะได้ทั้งกลูโคส เซลโลไบโอส (cellobiose) และโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) ปนกัน ส่วนเฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกย่อย จะให้น้ำตาลเพนโตสหลายชนิดปนกัน ขึ้นกับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส



การย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าด้วยสารเคมี แบ่งเป็น 2 วิธีคือ

#### 2.1.3.1 การย่อยสลายด้วยกรด (Acid Degradation) มี 2 กระบวนการ คือ

- กระบวนการแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous Process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) หรือกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) ผลิตรภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ คือน้ำตาลกลูโคส
- กระบวนการแบบเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneous Process) เป็นกระบวนการที่ใช้กรดอ่อนกว่า แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูง

### การย่อยสลายด้วยกรดเจือจาง

กรด (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH หรือ HF) สามารถปลดปล่อยโปรตอนเพื่อมาทำลายพันธะ heterocyclic ether ระหว่างน้ำตาลโมโนเมอร์ในรูปของสาย polymeric ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ในการแตกของพันธะนี้ จะได้น้ำตาลไซโลส กลูโคส อะราบิโนส และสารอื่นๆ เช่น oligomer, furfural และ acetic acid ในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางเกือบทั้งหมดจะเกิดในเฮมิเซลลูโลส เนื่องจากพันธะของเฮมิเซลลูโลสอ่อนแอกว่าเซลลูโลส กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ คือ เซลลูโลสและลิกนิน สามารถนำกากเหล่านี้ไปผลิตเป็นน้ำตาลกลูโคส หรือนำน้ำตาลกลูโคสที่ได้ไปผลิต lactic acid หรือเอทานอล ส่วนสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ในตัวอย่างสามารถเปลี่ยนไปเป็นสาร xylitol หรือ single cell protein

ปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ของน้ำตาลโพลีเมอร์ด้วยกรดเจือจางในตัวอย่างที่ใช้มีสถานะเป็นของแข็ง และทำปฏิกิริยาในสถานะของเหลว มีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

1. โปรตอนจากกรดเข้าไปจับกับ lignocellulosic matrix
2. เกิดการให้โปรตอน (H<sup>+</sup>) ของออกซิเจน จากพันธะ heterocyclic ether ระหว่างน้ำตาลโมโนเมอร์
3. เกิดการแตกของพันธะ ether
4. เกิด carbonation intermediate
5. Carbocation ถูกละลายด้วยน้ำ
6. มีการสร้างโปรตอนเพิ่มขึ้นมาใหม่พร้อมกับเกิดน้ำตาลโมโนเมอร์ oligomer หรือโพลีเมอร์ ขึ้นกับตำแหน่งการแตกของพันธะ ether



ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยกรด

ผลดี	ผลเสีย
1. ปฏิกริยาเกิดเร็ว ง่าย และสิ้น 2. ตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้มีราคาถูก และหาง่าย 3. ปฏิกริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ (กรณีใช้กรดแก่) 4. ให้ผลิตภัณฑ์สูง (กรณีใช้กรดแก่)	1. ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นไม่เจาะจงทำให้ผลิตภัณฑ์ ที่ได้ไม่บริสุทธิ์ 2. ต้องใช้อุณหภูมิสูง (กรณีใช้กรดอ่อน) 3. น้ำตาลที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสารอื่น เช่น เฟอฟูรัล และสารเคมีอื่นๆ 4. ผลพลอยได้ของปฏิกริยาการย่อยด้วยกรด เช่น เฟอฟูรัลเป็นพิษ

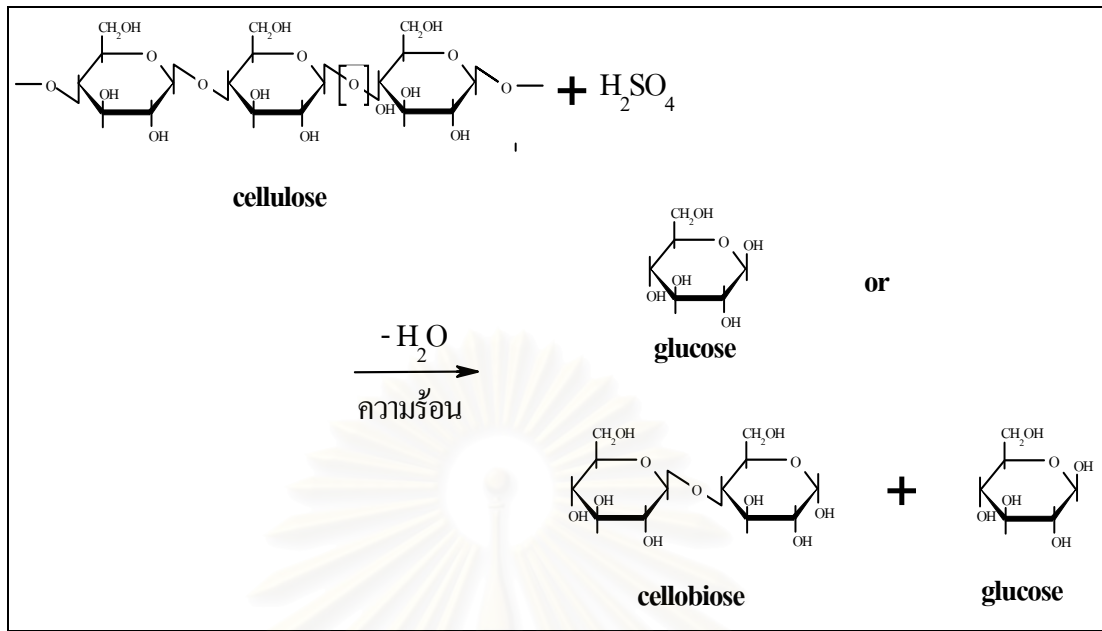
### 2.1.3.2 การย่อยสลายด้วยด่าง (Alkaline Degradation)

สารละลายที่นิยมใช้ คือ สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง เอทีลินไดอะมีน (Ethylene diamine) และแอมโมเนีย (Ammonia) เป็นต้น การใช้สารละลายด่างในการย่อยสลาย จะทำให้สายของโพลีแซคคาไรด์สั้นลง

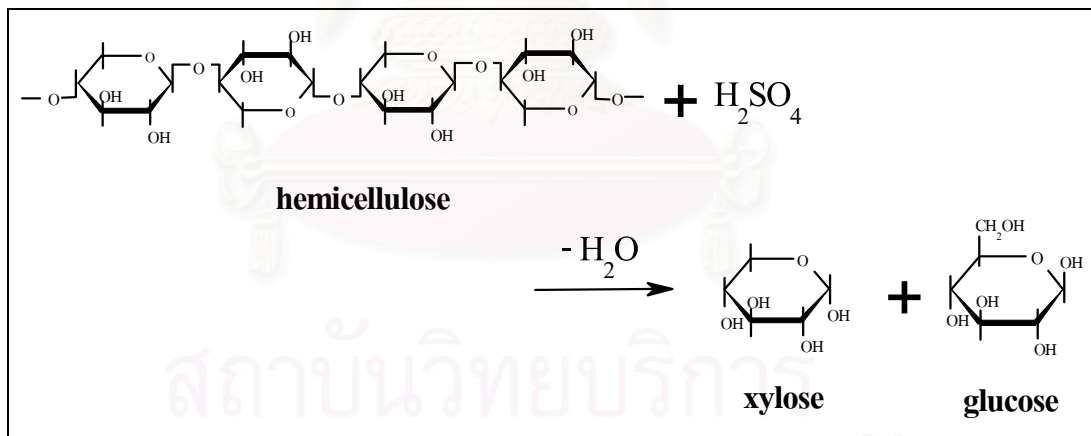
### 2.1.3.3 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Degradation)

เอนไซม์เป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง ที่สิ่งมีชีวิตสร้างขึ้น เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกริยา ภายในเซลล์ (Catalyst) เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกริยาที่มีประสิทธิภาพสูง ในสภาวะการทำงานที่เหมาะสมจะสามารถเร่งปฏิกริยาได้เร็วถึง  $10^8 - 10^{11}$  เท่า เมื่อเทียบกับปฏิกริยาที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง นอกจากนี้เอนไซม์ยังมีความเฉพาะ (specificity) ต่อปฏิกริยาหนึ่งๆ เท่านั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง แม้ว่าเอนไซม์จะถูกสร้างและอยู่ภายในเซลล์สิ่งมีชีวิต แต่สามารถสกัดออกมาใช้งานได้เช่นเดียวกับเมื่ออยู่ในเซลล์

เอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกริยาการย่อยเซลลูโลส คือ เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งราและแบคทีเรีย แต่ที่นิยมนำมาใช้คือ เอนไซม์เซลลูเลสที่ได้จากรา *Trichoderma reesei*



ก. การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลเซลลูโลส



ข. การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลเฮมิเซลลูโลส

รูปที่ 2.9 กลไกปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก

### 2.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในหญ้า

เยื่อใย (Fiber) เป็นสารประกอบพวกอินทรีย์วัตถุที่ปราศจากไขมัน จัดอยู่ในพวก คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทที่สัตว์ย่อยได้ยากหรือย่อยไม่ได้เลย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์ คาร์โบไฮเดรตเป็นโชนะที่มีมากกว่าโชนะกลุ่มอื่นๆ ในพืช คือมีอยู่ประมาณ 50-80 % ของวัตถุแห้ง สูตรโครงสร้างประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยอัตราส่วนระหว่าง H: O เป็น 2: 1 เท่ากับในโมเลกุลของน้ำ คาร์โบไฮเดรตแบ่งตามลักษณะและหน้าที่ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Structural Carbohydrate ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืช ทำให้พืชคงรูปร่างอยู่ได้ คาร์โบไฮเดรตประเภทนี้ คือ เยื่อใยชนิดต่างๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน คิวติน ซิลิกา ฯลฯ โดยมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 91% เฮมิเซลลูโลสและลิกนินประมาณ 5% ของเยื่อใยทั้งหมด
2. Non-structural Carbohydrate อยู่ในรูปเป็นอาหารสะสมของพืช ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล

พืชทุกชนิดจะมีคาร์โบไฮเดรตทั้ง 2 ประเภทนี้ประกอบอยู่ แต่จะมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เช่น เมล็ดจะมีปริมาณแป้งมาก แต่ใบหรือลำต้นจะมีเยื่อใยมาก เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น การสะสมเยื่อใยก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันปริมาณโปรตีนและการย่อยได้ของวัตถุแห้งจะลดต่ำลง (เมธา, 2529) นอกจากนี้ พืชที่ปลูกในเขตร้อน จะมีปริมาณเยื่อใยสูงกว่าพืชที่ปลูกในเขตอบอุ่นหรือเขตหนาว ปริมาณเยื่อใยในอาหารสัตว์จะเป็นตัวบ่งชี้คุณค่าทางโชนะของอาหารสำหรับสัตว์แต่ละประเภท เช่น สัตว์ปีกใช้ประโยชน์จากเยื่อใยได้น้อยมาก ดังนั้น อาหารสัตว์ที่มีเยื่อใยสูง จึงจัดเป็นอาหารที่มีคุณภาพต่ำสำหรับสัตว์ปีก แต่พวกสัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถใช้เยื่อใยพวกเฮมิเซลลูโลสหรือเซลลูโลสได้ ดังนั้นอาหารสัตว์ที่มีเยื่อใยสูง จึงไม่จัดเป็นอาหารที่มีคุณภาพต่ำสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง

การวิเคราะห์หาเยื่อใยในอาหารสัตว์ มีการปฏิบัติกันมาเป็นเวลานานแล้ว วิธีที่นิยมใช้กันมานานกว่า 100 ปีแล้ว และปัจจุบันนี้ก็ยังคงใช้กันอยู่ คือ Weende Method ผู้ค้นคิดวิธีนี้คือ Heneberg และ Stohman (วรพงษ์, 2535) การวิเคราะห์หาเยื่อใยด้วยวิธีการนี้ จะได้ คาร์โบไฮเดรต 2 พวก คือ

1. เยื่อใยหยาบ (Crude fiber: CF) คือ คาร์โบไฮเดรตที่สัตว์ย่อยได้ยาก หรือย่อยไม่ได้เลย คาร์โบไฮเดรตพวกนี้จะไม่ละลายในกรดอ่อนหรือด่างอ่อน
2. Nitrogen free extracts (NFE) คือ คาร์โบไฮเดรตพวก แป้ง และน้ำตาล คาร์โบไฮเดรตพวกนี้สัตว์ทุกชนิดสามารถใช้ประโยชน์ได้

การวิเคราะห์หาเยื่อใยโดยใช้วิธีนี้ มีข้อเสีย คือ ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้น ไม่ใช่ปริมาณเยื่อใยทั้งหมดของตัวอย่างอาหารสัตว์ เพราะเฮมิเซลลูโลสสามารถละลายได้ในกรดอ่อนและด่างอ่อน ส่วนลิกนินสามารถละลายได้ในด่าง ดังนั้นเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนจึงรวมอยู่ในส่วนของ NFE ค่าของ Crude fiber ที่ได้จึงต่ำกว่าความเป็นจริง (Van Soest, 1963)

ในปี ค.ศ. 1965 P.J. Van Soest ได้เสนอวิธีการสำหรับวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชอาหารสัตว์ เรียกว่า Detergent Analysis โดยวิธีการนี้จะแบ่งวัตถุแห้ง ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Cell content หรือ Neutral Detergent Soluble (NDS) คือ ส่วนที่อยู่ในภายในเซลล์พืชทั้งหมด สามารถละลายได้ในสารละลาย ที่เป็นกลาง ประกอบด้วย กรดอะมิโน ไขมัน แป้ง น้ำตาล เพคติน Soluble Protein, Non-protein Nitrogen วัตถุแห้งส่วนนี้สัตว์ทุกชนิดสามารถใช้ประโยชน์ได้เกือบหมด
2. Cell Wall Constituents หรือ Neutral Detergent Fiber (NDF) คือ ส่วนประกอบของผนังเซลล์ ซึ่งไม่สามารถละลายในสารละลายที่เป็นกลาง ประกอบด้วยพวกเยื่อใยทั้งหมด คือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน คิวติน ซิลิกา เคราติน วัตถุแห้งส่วนนี้เป็นประโยชน์ต่อสัตว์เคี้ยวเอื้องเท่านั้น เพราะในกระเพาะ Rumen ของสัตว์เคี้ยวเอื้องมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้

Acid Detergent Fiber (ADF) คือ เยื่อใยที่ไม่สามารถละลายในสารละลาย ซึ่งมีสภาพเป็นกรด ประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินประมาณ 90% ส่วนที่เหลือ 10% จะเป็นพวก คิวติน แก้วที่ไม่สามารถละลายได้ในกรด (Acid Insoluble Ash) และ Indigestible Protein เยื่อใยที่สามารถละลายได้ในสารละลาย Detergent ที่เป็นกรด คือ เฮมิเซลลูโลส

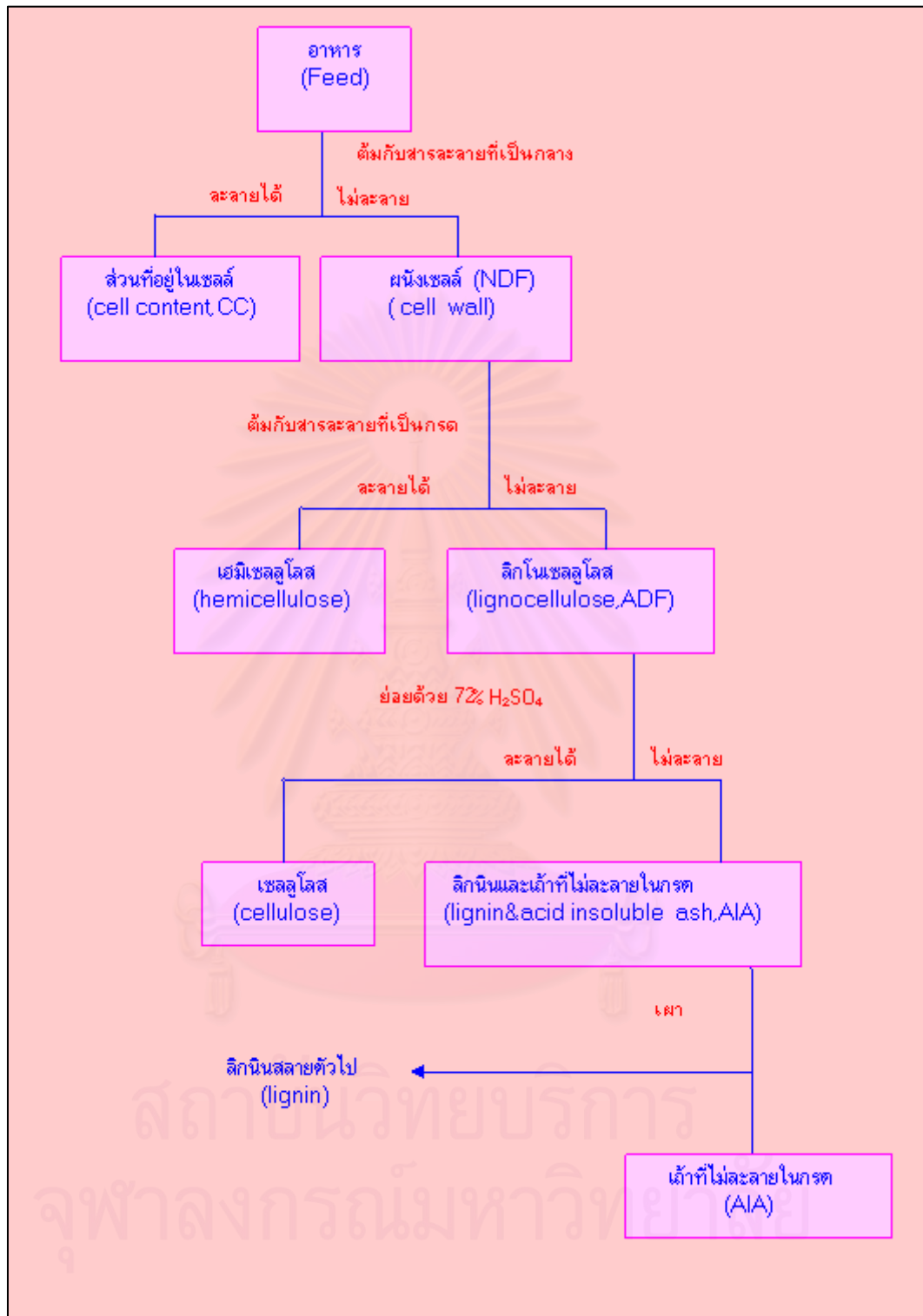
เซลลูโลส คือ เยื่อใยที่จะเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (Water Insoluble Carbohydrate) มีสูตรโครงสร้างที่มีโมเลกุลของกลูโคสมาต่อกัน แบบ  $\beta$  1-4 เป็นสายโซ่ยาว สามารถ Hydrolyze เซลลูโลสให้เป็นกลูโคสได้โดยใช้กรดแก่ (Meyer et al, 1952) แบคทีเรียใน กระเพาะ Rumen ของสัตว์เคี้ยวเองสามารถย่อยเซลลูโลสให้เป็นกลูโคส ดังนั้นสัตว์เคี้ยวเอื้องจึงใช้ กลูโคสให้เป็นประโยชน์ได้

เฮมิเซลลูโลส คือ เยื่อใยที่เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ชั้นที่สองของพืชเป็น สารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต ชนิด Water insoluble carbohydrate ประเภท Heterogeneous Polysaccharides โดยมีน้ำตาลหลายชนิดมาเกาะติดกัน เช่น เพนโตส (Pentose) เฮกโซส (Hexose) และ กรดยูโรนิก (Euronic acid) พืชตระกูลหญ้าจะมีเฮมิเซลลูโลสสูงกว่าพืชตระกูลถั่ว

ลิกนิน คือ เยื่อใยที่ไม่จัดเป็นสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต เพราะนอกจากจะ ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน แล้ว ยังมีธาตุ ไนโตรเจน ประกอบอยู่ 1-5 % แล้วแต่ชนิดของพืช และมี Methoxy group อยู่ประมาณ 5-15 % นอกจากนี้ สัดส่วนของคาร์บอน ในลิกนินก็มากกว่าคาร์บอนในคาร์โบไฮเดรตด้วย ลิกนินเป็นสารที่ไม่มีสัตว์ชนิดใดใช้ประโยชน์ได้ เลย ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้การย่อยได้ของเซลลูโลสลดต่ำลง โดยการที่ลิกนินไปห่อหุ้มอยู่รอบๆ โมเลกุลของเซลลูโลส (วรพงษ์, 2535)

หลักการในการวิเคราะห์สำหรับกรวิจัยนี้ คือ เมื่อต้มพืชตัวอย่างด้วยสารละลาย detergent ที่เป็นกลาง (neutral detergent) ส่วนที่เป็นส่วนประกอบภายในเซลล์และเพคติน จะละลายออกมาเรียกว่า neutral detergent soluble (NDS) ส่วนที่เหลืออยู่เป็นส่วนที่ไม่ละลาย คือ ผนังเซลล์ ที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน เรียกว่า neutral detergent fiber (NDF) ต่อจากนั้นนำไปต้มในสารละลาย detergent ที่เป็นกรด (acid detergent) จะไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสที่อยู่เป็นอิสระและที่อยู่ร่วมกับลิกนินออกมา เรียกส่วนนี้ว่า acid detergent soluble (ADS) ส่วนที่เหลืออยู่ คือ เซลลูโลสและลิกนิน เรียกว่า acid detergent fiber (ADF) โดยจะถูกนำไปย่อยด้วยกรดกำมะถัน ซึ่งจะละลายเซลลูโลสออกมา ส่วนที่เหลือคือลิกนินและถ้า ซึ่งเมื่อนำไปเผาก็สามารถทราบค่าของลิกนิน ซึ่งเรียกว่า ADL (acid detergent lignin) ได้ จาก หลักการข้างต้นนี้ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังรูปที่ 2.10





รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์เยื่อใยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ด้วยวิธีของ Van Soest

### 2.1.5 เคมีรังสีของโพลิเมอร์

#### ผลเบื้องต้นที่เกิดในโพลิเมอร์ที่ถูกฉายรังสี

โดยทั่วไปเมื่อมีการดูดกลืนพลังงานรังสีโดยสาร จะเกิดอันตรกิริยาขึ้นทั้งในนิวเคลียส และอิเล็กตรอนในวงโคจร แต่ถ้าพลังงานรังสีนั้นมีค่าต่ำกว่า 10 MeV แล้วอันตรกิริยาที่เกิดในนิวเคลียสจะมีน้อยมาก และคิดว่าจะไม่เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะกับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุที่มีอะตอมขนาดเล็ก เช่น H, C, N, O, S เป็นต้น เมื่อรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในวงโคจรจะมีกระบวนการ 3 รูปแบบ คือ ผลจากโฟโตอิเล็กตริก การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน และการเกิดคู่ของอิเล็กตรอนบวกและลบ การจะเกิดรูปแบบใดมากน้อยต่างกันขึ้นกับพลังงานของรังสีนั้น และเลขอะตอม (ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในวงโคจร) ของตัวกลางที่รังสีผ่านในทุกๆ รูปแบบที่เกิดจะได้อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่มาจากอะตอมของตัวกลางนั้นเสมอ อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้จะมีพลังงานมากพอที่จะก่อให้เกิดโมเลกุลข้างเคียงเกิดเป็นไอออนอิเล็กตรอนและโมเลกุลในภาวะถูกกระตุ้น (excited molecule) ต่อไปได้ในสารอินทรีย์ยังเกิดอนุมูลอิสระ เหล่านี้ทั้งหมดจะเป็นอนุภาคหรือหมู่ที่ว่องไว (active species) และชักนำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อไปเป็นลูกโซ่จนกว่าจะรวมกันเองกลายเป็นโมเลกุลเดิมหรือโมเลกุลใหม่ที่เสถียร ตัวอย่างการเกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลิเมอร์เมื่อถูกฉายรังสี แสดงดังรูปที่ 2.11

กระบวนการที่ 1 รังสีจะถ่ายเทพลังงานให้แก่โมเลกุลของโพลิเมอร์ ทำให้โพลิเมอร์ที่อยู่ในภาวะกระตุ้น เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับรังสี และเกิดจากการรวมตัวของอนุมูลอิสระของโพลิเมอร์กับ อิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออนไนซ์ ผลที่ได้จะเป็นโมเลกุลสเทินในภาวะถูกกระตุ้นสูง

กระบวนการที่ 2 โมเลกุลสเทินในภาวะถูกกระตุ้นสูงจะแตกตัว (dissociate) ทำให้สายโซ่ขาดเกิดเป็นอนุมูลอิสระของโพลิเมอร์ 2 สายแตกตัวออกมา ทำให้มีโมเลกุลเล็กลง

กระบวนการที่ 3 หรือแยกเป็นอนุมูลอิสระแอลคิล หรืออนุมูลอิสระไฮโดรเจน และถ้า R จับกับ H หรือ H จับกันเองจะได้ก๊าซเกิดขึ้น

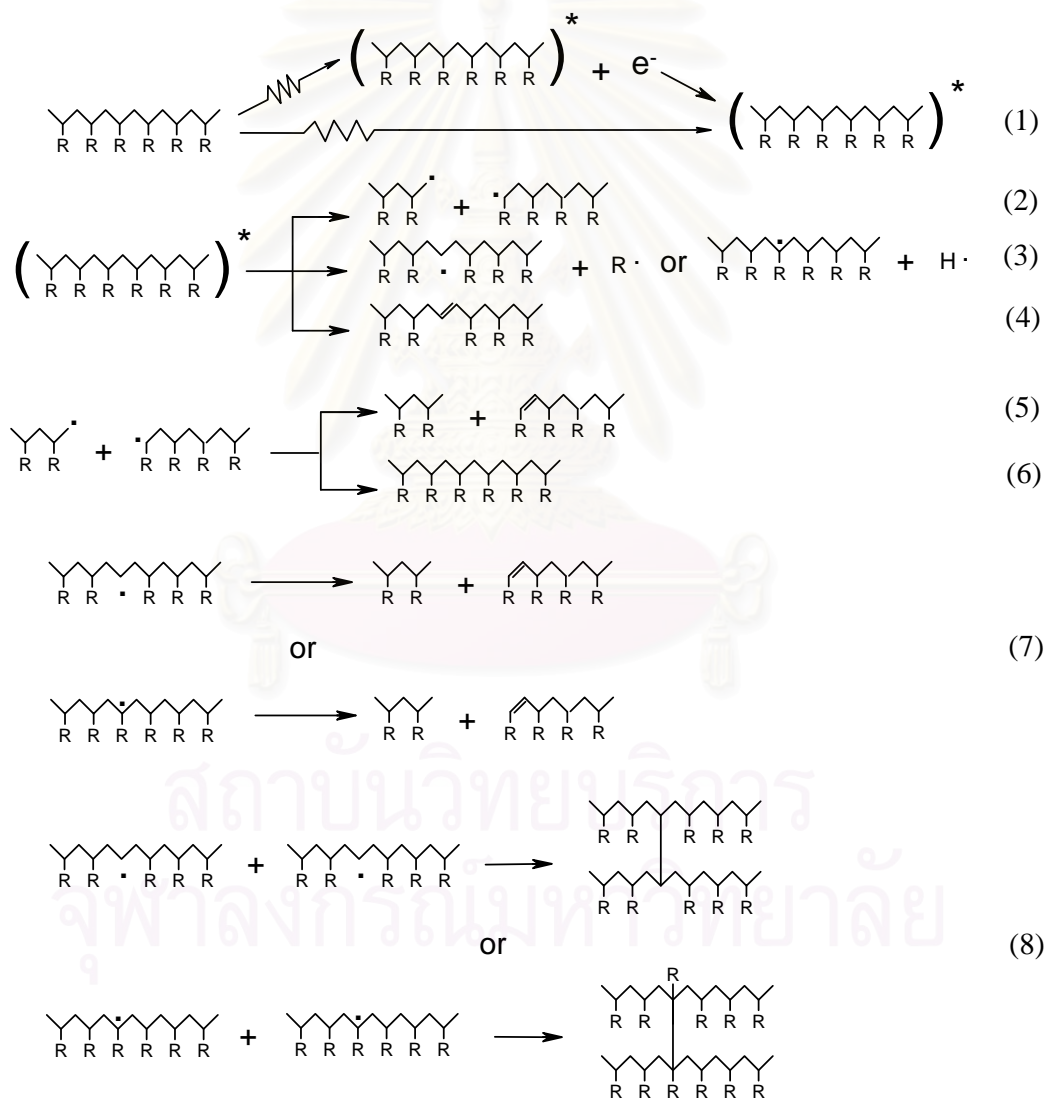
กระบวนการที่ 4 โมเลกุลสเทินในภาวะถูกกระตุ้นสูงอาจแตกตัวกลายเป็นหมู่ RH และโพลิเมอร์เกิดเป็นพันธะคู่ที่สายโซ่หลัก

กระบวนการที่ 5 อนุมูลอิสระจากกระบวนการที่ 2 จะพยายามเข้าสู่ภาวะเสถียร โดยแยกออกเป็น โพลีเมอร์ขนาดเล็กถึง 2 สาย

กระบวนการที่ 6 หรือรวมตัวกลายเป็นโพลีเมอร์เดิมที่เสถียรก็ได้ (recombination)

กระบวนการที่ 7 เกิดการขาดที่สายโซ่หลัก และสร้างพันธะคู่ที่ปลายสายโซ่

กระบวนการที่ 8 เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลขึ้นใหม่ (cross-linking)



รูปที่ 2.11 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสี

ปริมาณที่บ่งถึงผลของรังสีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของสารมักจะใช้ค่า G-value ซึ่งหมายถึงจำนวนของการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของสารโดยรังสีทำให้เกิดสารใหม่ (เกิดอนุมูลอิสระเกิด species หรือการลดลงของสารเดิม) เมื่อมีการดูดกลืนพลังงาน 100 eV

### การเกิด Cross-linking และการเกิด Degradation ของโพลีเมอร์โดยรังสี

ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญที่ต้องการให้เกิดในโพลีเมอร์โดยรังสี ได้แก่ Cross-linking การเกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติหรือการทำให้สายโซ่โพลีเมอร์ขาดโดยรังสี ส่วนปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น การย่อยสลายโมเลกุล (degradation) โดยรังสีในโพลีเมอร์ ได้แก่ การเกิดก๊าซ เช่น  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  หรือการเกิดพันธะคู่ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยรังสีเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้คุณสมบัติของโพลีเมอร์นั้นเปลี่ยนแปลงไปได้มาก ซึ่งทำให้เกิดลักษณะสมบัติที่เปลี่ยนไปและทำให้การใช้รังสีเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ได้ดีขึ้นไปได้ง่าย

การเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญเมื่อฉายรังสีโพลีเมอร์ ก็คือ การเกิด Cross-linking และการ degradation การเกิด cross-linking โดยทั่วไปจะทำให้โมเลกุลของโพลีเมอร์แข็งแรงมากยิ่งขึ้น เช่น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความต้านแรงดึง โมดูลัสสูงขึ้นไป ทนทานต่อความร้อน ตัวทำละลายมากขึ้น เป็นต้น ในทางกลับกันการ degradation ของโพลีเมอร์จะมีผลในทางตรงกันข้าม

ปกติเมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสีจะเกิดการเกิด cross-linking และการ degradation ไปพร้อมๆ กันขึ้นกับว่าโพลีเมอร์ชนิดใดจะเกิดปฏิกิริยา cross-linking หรือการ degradation มากกว่ากัน ผลเบื้องต้นที่เกิดในโพลีเมอร์ที่ถูกฉายรังสี ในปี 1954 Miller และคณะ ได้เสนอหลักเกณฑ์ที่จะทำนายว่าไวนิลโพลีเมอร์โครงสร้างแบบใดจะเกิด cross-linking หรือการ degradation ดังนั้นถ้าโพลีเมอร์มีโครงสร้างในรูปแบบของ  $(-CH_2-CHR-)_n$  จะเกิด cross-linking ขณะที่โพลีเมอร์มีโครงสร้างในรูปแบบของ  $(-CH_2-CR_1R_2-)_n$  จะมีโอกาสเกิดการ degradation สูงเมื่อฉายรังสี ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 โพลีเมอร์ที่เกิด Cross-linking และ Degradation ได้ (Wood and Alexei, 1994)

Group 1 Cross-linking polymers	Group 2 Degrading polymers
Polymethylene (polyethylene)	Polyisobutylene
$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ -\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$
Polypropylene	Poly ( $\alpha$ -methylstyrene)
$\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ -\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{C}_6\text{H}_5 \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$
Polystyrene	Polymethacrylates
$\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \quad   \\ \text{C}_6\text{H}_5 \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ -\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{COOR} \quad \text{COOR} \end{array}$
Polyacrylamide	Polymethacrylamide
$\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \quad   \\ \text{CONH}_2 \quad \text{CONH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ -\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{CONH}_2 \quad \text{CONH}_2 \end{array}$
Polycrylamide	Poly(vinylidene chloride)
$\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \quad   \\ \text{COOR} \quad \text{COOR} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ -\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{Cl} \quad \text{Cl} \end{array}$
Poly (vinyl chloride)	Cellulose and derivatives
$\begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}- \\   \quad   \\ \text{Cl} \quad \text{Cl} \end{array}$	Polytetrafluoroethylene
Polyamides	Polytrifluorochloroethylene
Polyesters	
Polyvinylpyrrolidone	
Rubbers	
Polyacroleine	



## 2.1.6 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น

### การปล่อยก๊าซ (Evolution of gas)

ในขณะที่มีการฉายรังสีโพลีเมอร์ จะมีก๊าซถูกปล่อยออกมา โดยก๊าซที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของโพลีเมอร์

ตารางที่ 2.3 ก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาขณะฉายรังสีโพลีเมอร์

Polymer	Product
Polyethylene	H <sub>2</sub>
Polyisopropylene	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Polyisobutylene	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Poly (vinyl chloride)	HCl, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Poly (vinyl acetate)	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO
Poly (methyl methacrylate)	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub>
Polystyrene	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Cellulose (from wood)	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub>

(ต้นกำเนิดรังสีแกมมา หรือ fast electron ที่อุณหภูมิต่ำและไร้ออกซิเจน)

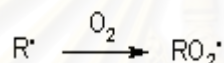
### ผลของออกซิเจนขณะฉายรังสี

การฉายรังสีโพลีเมอร์ในอากาศจะทำให้การเสื่อมสลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุมูลอิสระของโพลีเมอร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ กลายเป็นอนุมูลเปอร์ออกไซด์และเกิดการเสื่อมสลายแม้ในโพลีเมอร์ชนิดที่เกิดการเชื่อมโยงเมื่อถูกรังสี คือจะเกิด Oxidative degradation ในสายโซ่หลักของโพลีเมอร์ดังนี้

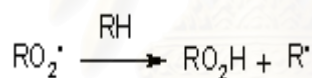
เมื่อโพลีเมอร์ถูกฉายรังสี เกิด Radical ขึ้น



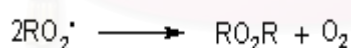
Radical รวมตัวกับออกซิเจน



Peroxy radicals รวมตัวกับอะตอมของไฮโดรเจนจากโมเลกุลของโพลีเมอร์อื่น



เกิดการรวมตัวของ Peroxy radicals เกิดเป็น Peroxide



ในภาวะอื่นๆ เมื่อฉายรังสีเช่น Dose rate สูงๆ สารไวปฏิกิริยา (Sensitizer) สารคงความเสถียร (Stabilizer) เหล่านี้ล้วนมีผลต่อโพลีเมอร์เมื่อฉายรังสีทั้งสิ้น และจะต้องพิจารณาเป็นรายชนิดของโพลีเมอร์

### 2.1.7 การใช้ประโยชน์จากการย่อยสลายโพลิเมอร์ (Polymer degradation)

มีการใช้ประโยชน์จากการย่อยสลายโพลิเมอร์มากมาย ที่สำคัญที่สุด คือการย่อยสลายกากจากการเกษตรและอุตสาหกรรม เพื่อนำไปผลิตเป็นยาอาหารสัตว์และสารปรุงแต่งอาหาร นอกจากนี้ก็ยังมีพัฒนาในด้านอื่นๆ อีก

#### อาหารสัตว์จากกากเซลลูโลส

กากจากการเกษตรและอุตสาหกรรม โดยมากจะประกอบด้วยเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว เปลือกเมล็ดฝ้าย ชังข้าวโพด ชี้อ้อย กากเหล่านี้จะประกอบด้วยสัดส่วนของโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) จำนวนมาก เช่น ฟางข้าว มีถึง 60–70% ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเซลลูโลส ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่ซับซ้อน โดยเฉพาะมีลิกนิน (lignin) ห่อหุ้มอยู่ทำให้สัตว์ย่อยได้ลำบาก จึงมีการปรับปรุงความสามารถในการย่อยได้ด้วยการฉายรังสี ซึ่งพบว่า สามารถใช้ปริมาณรังสี 0.2–0.6 MGy เพื่อปรับปรุงฟางข้าวและใช้ทดแทนเป็นอาหารของวัว แกะ และสัตว์ปีก ได้ 5-7% โดยปราศจากผลกระทบต่อสัตว์ จะเห็นได้ว่าปริมาณรังสีที่ใช้ปรับปรุงจะอยู่ในช่วง 0.1-1 MGy ซึ่งเป็นปริมาณรังสีที่สูง แต่อาจจะลดปริมาณรังสีลงได้ถ้ามีการใช้ความร้อนช่วยก่อนหรือหลังการฉายรังสี

#### การใช้ประโยชน์จากเยื่อกระดาษและกากเซลลูโลสชนิดอื่น

มีการผลิตกลูโคสจากการฉายรังสีเยื่อกระดาษและกากเซลลูโลส โดยใช้ปริมาณรังสี 10 kGy ร่วมกับการใช้กรด (acid hydrolysis) ที่อุณหภูมิสูง (232°C) ซึ่งปริมาณกลูโคสที่ได้จะสูงกว่าการไม่ใช้รังสี 7% และได้มีการทดลองใช้อิเล็กทรอนิกส์เป็นต้นกำเนิดรังสี เพื่อฉายรังสีกากเซลลูโลสจำพวกเนื้อไม้ พบว่าให้ปริมาณกลูโคสเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปบด พบว่าสามารถลดเวลาในการบดลงได้

#### การย่อยสลาย Polytetrafluoroethylene (Teflon)

มีการใช้รังสีเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวใน Polytetrafluoroethylene เพื่อเปลี่ยนจากเศษวัสดุให้กลายเป็นฝุ่นผง และให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำ 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

### การผลิตน้ำตาลกลูโคสจากมันสำปะหลังที่ฉายรังสีแกมมา

ประโยชน์จากการย่อยสลายมันสำปะหลังที่สำคัญคือ เป็นการย่อยสลายเพื่อใช้ในการผลิตน้ำตาลกลูโคส ซึ่งกำลังเป็นที่ต้องการอย่างมากในปัจจุบัน สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา หรือใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอล มันสำปะหลังประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ ส่วนประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลกลูโคสได้ด้วยการใช้รังสีร่วมกับสารเคมี ซึ่งจะทำได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้น

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ขวัญชนก จันทร์สว่าง ทำการวิจัยเรื่อง การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือยูเรีย เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย และเถาถั่วลิสง ไปฉายรังสีร่วมกับการหมักด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือยูเรีย และวิเคราะห์หาค่า NDF ADF และ ADL ผลการวิจัยพบว่าที่ปริมาณรังสีแกมมา 15 kGy ร่วมกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ปริมาณ NDF ADF และ ADL ลดลงได้มากกว่าการใช้รังสีร่วมกับยูเรีย ซึ่งผลของปริมาณ NDF ADF และ ADL ที่ลดลงในฟางข้าว กากอ้อย และเถาถั่วลิสง เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 50-51%, 48-49%, และ 46% ตามลำดับ และเมื่อใช้สารละลายยูเรียเท่ากับ 21%, 9% และ 14-15% ตามลำดับ

2. ชมพูนุช หาญนนทวิวัฒน์ ทำการวิจัยเรื่อง การผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว ไปฉายรังสีร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก และวิเคราะห์หาค่า NDF ADF และ ADL เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเป็นน้ำตาลผลการวิจัยพบว่า การฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกมีภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ คือ 5%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากชานอ้อย เปลือกทุเรียน และฟางข้าว คือ 53.75%, 47.85%, 49.85% ตามลำดับ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 100 kGy ร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่ 5% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C และใช้ระยะเวลา 30 นาที พบว่าตัวอย่างชานอ้อย มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3% เปลือกทุเรียนมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2% ส่วนฟางข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ที่ 75 kGy

3. Adenise Iorenci Woiciechowski, Saul Nitsche, Ashok Pandey and Carlos Ricardo Soccol ทำการวิจัยเรื่อง Acid and enzymatic hydrolysis to recover reducing sugar from cassava bagasse: an Economic study (2002) เป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยการใช้กรดไฮโดรคลอริกและเอนไซม์ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังเพื่อหาปริมาณน้ำตาล ผลการวิจัยพบว่าเมื่อใช้กรดในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 100 กรัม ที่มีแป้งอยู่ 66% จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 62.4 กรัม คิดเป็น 94.1% ในขณะที่เมื่อใช้เอนไซม์ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง 120 กรัม จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 77.1 กรัม คิดเป็น 97.5% เมื่อพิจารณาในเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส พบว่าในขณะที่การไฮโดรไลซิสด้วยกรดใช้เวลาเพียง 10 นาที แต่การ



ไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 25 ชั่วโมง 20 นาที และเมื่อพิจารณาในด้านค่าใช้จ่ายพบว่าการใช้กรดไฮโดรไลซิส กากมันสำปะหลัง 150 กิโลกรัม คิดเป็น 34.27 ดอลลาร์สหรัฐ และการเอนไซม์ในการไฮโดรไลซิส คิดเป็น 2470.99 ดอลลาร์สหรัฐ

4. A. Pessoa JR., I.M. Mancilha and S. Sato(1997) ทำการวิจัยเรื่อง **Acid hydrolysis of hemicellulose from sugarcane bagasse** เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้กรดซัลฟูริกในการไฮโดรไลซิสเฮมิเซลลูโลสในชานอ้อย ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ ระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดและความเข้มข้นของกรด ผลการวิจัยพบว่าสภาวะเงื่อนไขที่สามารถให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เป็นดังนี้คือ ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะเวลา 10 นาที ด้วยกรด 100 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 1 กรัม ได้น้ำตาลรีดิทซ์ 73.7%, ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะเวลา 20 นาที ด้วยกรด 100 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 1 กรัม ได้น้ำตาลรีดิทซ์ 73.9% ที่อุณหภูมิ 150 °C ระยะเวลา 20 นาที ด้วยกรด 70 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 1 กรัม ได้น้ำตาลรีดิทซ์ 71.8% ตามลำดับ และที่สภาวะเงื่อนไขของอุณหภูมิ 140 °C ระยะเวลา 20 นาที ด้วยกรด 100 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 1 กรัม จะได้น้ำตาลไซโลสสูงสุด 83.5%

5. B.C. Gransin and G. McL. Dryden (2002) ทำการวิจัยเรื่อง **Effect of alkalis, oxidants and urea on the nutritive value of rhodes grass (Chloris gayana cv. Callide)** การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองผลกระทบของการใช้ alkalis หรือ oxidants ต่อคุณค่าทางโภชนาการของหญ้าไรต์ โดยใช้ alkalis 3 ชนิด ได้แก่  $\text{Ca(OH)}_2$ , NaOH, CaO และ oxidants 2 ชนิด คือ  $\text{H}_2\text{O}_2$ , NaOCl ปริมาณที่ใช้แตกต่างกัน ดังนี้ 0, 20, 40, 60 หรือ 80 g/kg DM ผลการวิจัยพบว่า NaOH,  $\text{Ca(OH)}_2$  และ CaO มี negative linear effects ( $p < 0.05$ ) ต่อปริมาณ NDF และมี positive linear effects ( $p < 0.05$ ) ต่อค่า DM, organic matter(OM), NDF และ ADF ของ 48 ชั่วโมง ใน sacco disappearances NaOCl ลดค่า NDF แต่ไม่มีผลต่อ sacco disappearances และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ไม่มีผลต่อการย่อยในครั้งนี้ การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของยูเรีย(0, 20, 40, 60 และ 80 g/kg DM) และน้ำ(250, 500 และ 750 g/kg DM) ที่มีต่อหญ้าชนิดดังกล่าว ผลการวิจัยพบว่า การใช้น้ำและยูเรียร่วมกันจะได้ค่า Crude Protein(CP) และ OMD สูงสุด คือ  $250 \pm 80$  และ  $500 \pm 80$  ตามลำดับ สรุปคือ NaOH,  $\text{Ca(OH)}_2$ , CaO และยูเรีย มีผลให้ปริมาณ NDF และการย่อยได้ของหญ้าไรต์เปลี่ยนแปลงไป โดย NaOH ให้ผลในการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด รองลงมาคือ  $\text{Ca(OH)}_2$ , CaO, urea, NaOCl และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ตามลำดับ

6. B.P. Lavarack, G.J. Griffin and D.Rodman(2002) ทำการวิจัยเรื่อง **The acid hydrolysis of sugarcane bagasse hemicellulose to produce xylose, arabinose, glucose and other products** เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสในชานอ้อย เพื่อให้เป็นน้ำตาลไซโลส อะราบินอส กลูโคส และสารตัวอื่นๆ โดยได้ทำการวิจัยและทดลองโดยใช้กรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกเปรียบเทียบกัน ภายใต้อุณหภูมิ 80-200 °C อัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรกรด 1:5 - 1:20 ตัวอย่างหญ้ากินนีสีม่วง ความเข้มข้นของกรด 0.25-8 wt% และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 10-2000 นาที ผลการวิจัยพบว่ากรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายโมเลกุลของไซโลสได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรดไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟูริก

7. E. Takacs, L. Wojnarovits, Cs. Foldvary, P. Hargittai, J. Borsa and I. Sajo (2000) ทำการวิจัยเรื่อง **Effect of combined gamma-irradiation and alkali treatment on cotton-cellulose** เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาปริมาณรังสีสูงร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อโครงสร้างของเยื่อใย(fiber) ในใยฝ้าย โดยมีปริมาณรังสี 0-1,500 kGy เพื่อวิเคราะห์หาค่า viscosimetry ผลการวิจัยพบว่าที่ปริมาณรังสีสูงกว่า 300 kGy ขึ้นไป เยื่อใยในใยฝ้ายมีการย่อยสลายของโมเลกุลมากขึ้น และที่ปริมาณรังสี 500 kGy ตัวอย่างสามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้โครงสร้างของเยื่อใยในใยฝ้ายมีการย่อยสลายของโมเลกุลมากกว่าในตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสีแกมมา

8. E. Takacs, L. Wojnarovits, J. Borsa, Cs. Foldvary and P. Hargittai (1999) ทำการวิจัยเรื่อง **Effect of gamma-irradiation on cotton-cellulose** เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาปริมาณรังสีสูงที่มีต่อโครงสร้างของเยื่อใย(fiber)ในใยฝ้าย ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นปกติ ผลการวิจัยพบว่าที่ปริมาณรังสีสูงกว่า 100 kGy จะเริ่มทำให้เกิดรอยแตกบนผิวของเยื่อใยในใยฝ้าย และรอยแตกบนผิวของเยื่อใยในใยฝ้ายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณรังสีสูงขึ้นถึง 500 kGy ซึ่งในตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 500 kGy จะทำให้โครงสร้างของเยื่อใยในใยฝ้ายมีการย่อยสลายของโมเลกุลมากกว่าในตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสีแกมมา

9. M.R. Al-Masri and M. Zarkawi (1994) ทำการวิจัยเรื่อง **Effect of gamma irradiation on chemical compositions of some agricultural residues** เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาที่มีต่อปริมาณเยื่อใยในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยวัสดุที่ใช้ ได้แก่ ใยฝ้าย ถั่วถั่วแดง ฟางข้าวสาลี ฟางข้าวบาร์เลย์ ต้นข้าวโพดและซังข้าวโพด ปริมาณรังสีที่ใช้คือ 0,10,50 และ 100 kGy ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นปกติ แล้ววิเคราะห์หาค่า total

nitrogen (N), crude fiber (CF), neutral-detergent fiber (NDF), acid-detergent fiber (ADF), และ acid-detergent lignin (ADL) ผลการวิจัยพบว่ารังสีแกมมาไม่มีผลต่อ N ในขณะที่เดียวกันปริมาณรังสี 100 kGy จะลด CF ในใยฝ้ายได้ถึง 30% ฟางข้าวสาลีและต้นข้าวโพด 21% ฟางข้าวบาร์เลย์ เถาถั่วแดงและต้นข้าวโพด 16%: ลด NDF ในใยฝ้าย ฟางข้าวสาลีและฟางข้าวบาร์เลย์ 6%, ต้นข้าวโพด 11% และซังข้าวโพด 9%: ลด ADF ในใยฝ้าย 8%, ต้นข้าวโพดและซังข้าวโพด 7%, ฟางข้าวสาลีและฟางข้าวบาร์เลย์ 6%, และลด ADL ในใยฝ้าย 8%, ฟางข้าวสาลี 21%, ฟางข้าวบาร์เลย์และต้นข้าวโพด 18%, ซังข้าวโพด 30% ส่วนในเถาถั่วแดงพบว่าปริมาณรังสี 100 kGy ไม่มีผลต่อ NDF, ADF และ ADL

10. Zhiyou Wen, Wei Liao and Shulin Chen (2004) ทำการวิจัยเรื่อง **Hydrolysis of manure lignocellulosics for reducing sugar production** เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสโดยใช้เอนไซม์และกรดในการย่อยสลายโครงสร้างของเซลลูโลส โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายโครงสร้าง คือ อุณหภูมิ ระยะเวลา ขนาดอนุภาคของวัสดุ อัตราส่วนของตัวอย่างต่อกรดและเอนไซม์ รวมถึงผลกระทบจากการทำ Pretreatment ด้วยกรดหรือเอนไซม์ก่อน ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยคือ ใช้ขนาดอนุภาค 590  $\mu\text{m}$  ที่อุณหภูมิ 46°C เป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมง และเอนไซม์เซลลูเลสในการย่อย ที่สภาวะนี้ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคส 11.32 g/100 g manure ซึ่งคิดเป็น 40% ของปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโครงสร้างของเซลลูโลส

11. Wei Liao, Yan Liu, Chuanbin Liu, Zhiyou Wen and Shulin Chen (2006) ทำการวิจัยเรื่อง **Acid hydrolysis of fiber from daily manure** เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากวัสดุพวกมูลสัตว์หรือของเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยใช้กรดซัลฟูริกในการย่อยสลายโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายโครงสร้าง คือ อุณหภูมิ ระยะเวลา อัตราส่วนของตัวอย่างต่อกรด รวมถึงผลกระทบจากการทำ Pretreatment ด้วยกรดก่อน ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโครงสร้าง (fiber decrystallization) คือการทำ Pretreatment ก่อนด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 75% โดยมีอัตราส่วนของตัวอย่างต่อกรด 3:5 (weight basis) เป็นระยะเวลา 30 นาที และสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยด้วยกรด คือ ย่อยที่อุณหภูมิ 135°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่สภาวะนี้ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคส 26 g/L ซึ่งคิดเป็น 84% ของปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโครงสร้างของเซลลูโลส และ 11 g/L ซึ่งคิดเป็น 80% ของปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 หญ้ากินนีสีม่วง (Purple Guinea Grass)

3.1.2 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (King Grass)

3.1.3 หญ้าแพนโกล่า (Pangola Grass)

3.1.4 หญ้ารูซี (Ruzi Grass)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องฉายรังสีแบบอุตสาหกรรมของ Sterigenics International, Inc. (Thailand)  
Dose rate 15 kGy/hr

3.2.2 ตู้อบ (Hot air oven) ของ Heraeus รุ่น VT 5042

3.2.3 เครื่อง Autoclave ของ Tomy รุ่น SS-325 และ Hirayama รุ่น HV-28

3.2.4 เครื่องชั่ง (Analytical balance) ของ Sartorius Basic รุ่น BA 310s

3.2.5 เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

- Pump และ Refractive Index Detector ของ LDC รุ่น 4100

- Integrator ของ Shimadza รุ่น C-RIA

3.2.6 เครื่อง Water bath ของ Toledo รุ่น TW20

3.2.7 เครื่อง Hot plate ของ E.G.O รุ่น RK18715

3.2.8 เครื่องบด (Laboratory Mill) ของ Thomas-Wiley Model 4

- 3.2.9 เครื่องวัดความหวาน Master Refractometer Manual ของ Atago รุ่น Master-M
- 3.2.10 เต้าเผา ของ Carbolite รุ่น CFE 1300
- 3.2.11 ชุดตะแกรงร่อน (Micrometer Stainless Steel Test Sieves)
- Mesh size 300  $\mu\text{m}$  และ 710  $\mu\text{m}$
- 3.2.12 pH meter ของ Mettler Toledo รุ่น SevenEasy
- 3.2.13 Filter paper ของ Whatman เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm
- 3.2.14 ฝากรองใยแก้ว ขนาด 40-60  $\mu\text{m}$
- 3.2.15 โถอบแห้ง (Desiccator)
- 3.2.16 Bunchner funnel
- 3.2.17 Suction filtering flask
- 3.2.18 Volumetric flask
- 3.2.19 ถ้วย crucible
- 3.2.20 Filter crucible

### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมี	บริษัท
3.3.1 กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	Merck, Germany.
3.3.2 แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )	Merck, Germany.
3.3.3 ไดโซเดียมเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซีเตท ไดไฮเดรต (E.D.T.A di sodium salt)	Merck, Germany.
3.3.4 ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )	Merck, Germany.



- 3.3.5 โซเดียมลอร์ริลซัลเฟต ( $C_{12}H_{25}NaO_4S$ ) Merck, Germany.
- 3.3.6 โซเดียมบอเรต ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) Merck, Germany.
- 3.3.7 โซเดียมซัลไฟต์ ( $Na_2SO_3$ ) Merck, Germany.
- 3.3.8 2-เอทอกซี เอทานอล (2-Ethoxyethanol) Sigma, USA.
- 3.3.9 ซิทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ( $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3^+Br^-$ ) Merck, Germany.
- 3.3.10 อะซีโตน ( $C_3H_6O$ ) Merck, Germany.
- 3.3.11 สารมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ ) Sigma, USA.
- 3.3.12 สารมาตรฐานน้ำตาลฟรุคโตส ( $C_6H_{12}O_6$ ) Sigma, USA.
- 3.3.13 สารมาตรฐานน้ำตาลไซโลส ( $C_6H_{10}O_5$ ) Sigma, USA.
- 3.3.14 สารมาตรฐานน้ำตาลอะราบิโนส ( $C_5H_{10}O_5$ ) Sigma, USA.
- 3.3.15 สารมาตรฐานน้ำตาลแมนโนส ( $C_6H_{12}O_6$ ) Sigma, USA.

#### 3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

- 3.4.1 ศึกษาค้นคว้า และรวบรวมเอกสาร ข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.4.2 เตรียมตัวอย่างโดยนำหญ้าแห้ง 4 ชนิด คือ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่ มาอบที่อุณหภูมิ  $105^\circ C$  จนแห้งสนิท บดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำไปร่อนด้วย Test sieve ให้มีขนาด Particle Size 710  $\mu m$  และ 300  $\mu m$
- 3.4.3 นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาค่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
- 3.4.4 หาภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดและปริมาณรังสีแกมมาร่วมกับกรด
- 3.4.5 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่องมือทางเคมี

3.4.6 ใช้สภาวะที่เหมาะสมผลิตน้ำตาลจากหญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่าและหญ้ารูซี่เพื่อเป็นตัวอย่างในการผลิต

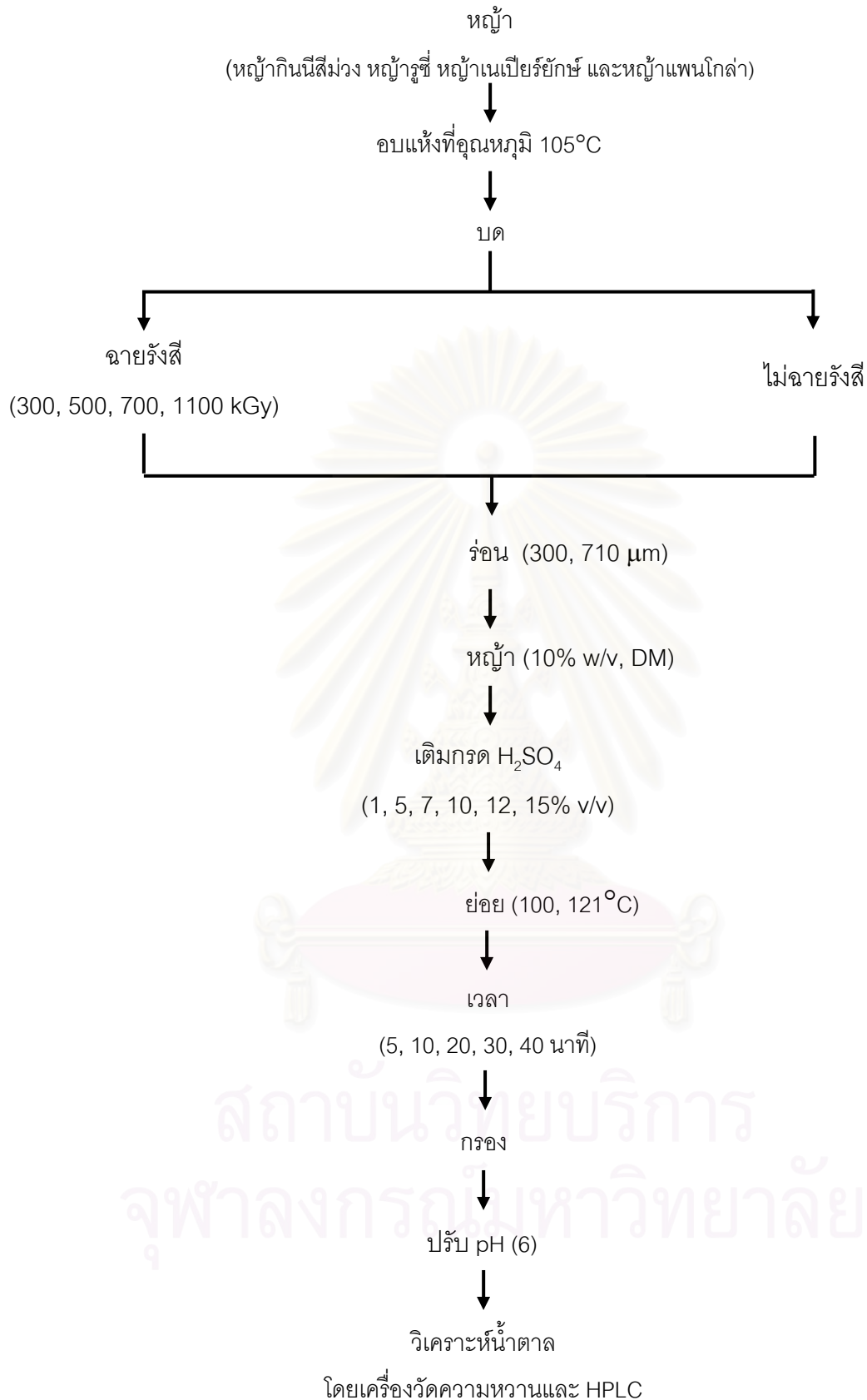
3.4.7 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง

#### การเตรียมตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่ โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. นำวัสดุทั้ง 4 ชนิดไปอบให้แห้ง
2. นำไปบดด้วยเครื่องบด แล้วนำไปร่อนแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน (Test Sieve) ที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  และ 300  $\mu\text{m}$  เก็บไว้ใน desiccators เพื่อป้องกันความชื้น
3. วิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.)
4. แบ่งตัวอย่างแต่ละชนิดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก กลุ่มที่ 2 ฉายรังสีแกมมาพร้อมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก

หมายเหตุ: หญ้าที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ ตัดตั้งแต่วันที่ ธันวาคม 2549 – มกราคม 2550 หญ้ามีอายุการตัดที่ 45 วัน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้า

## การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหม้อนึ่งนึ่งสีม่วง หม้อนึ่งสีน้ำตาล หม้อนึ่งเป็ยร์ยักซ์ และหม้อแปนโกล่า

### ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก

#### 1. ทดลองหาขนาดที่เหมาะสม

ทำการย่อยตัวอย่างที่มี Particle size 300  $\mu\text{m}$  โดยชั่งตัวอย่างหนัก 2 g บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ปริมาตร 20 ml (อัตราส่วนตัวอย่างต่อกรดซัลฟูริก คือ 1:10 w/v, DM) คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 121  $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ปรับ pH เป็น 6 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต แล้ววัดของศาบริกด้วยเครื่องวัดความหวาน (Brix Refractometer) จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้นในตัวอย่างที่มี Particle size 710  $\mu\text{m}$

#### 2. ทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

เมื่อได้ขนาดที่เหมาะสมจากข้อ 1 ทำการทดลองขั้นตอนต่อไปโดยชั่งตัวอย่างหนัก 2 g บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ปริมาตร 20 ml คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ทำการย่อยที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ปรับ pH เป็น 6 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต แล้ววัดของศาบริกด้วยเครื่องวัดความหวาน จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่ทำการย่อยตัวอย่างที่อุณหภูมิ 121 $^{\circ}\text{C}$

#### 3. ทดลองหาเวลาที่เหมาะสม

เมื่อได้ขนาดและอุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 1-2 ทำการทดลองขั้นตอนต่อไป โดยชั่งตัวอย่างหนัก 2 g บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ปริมาตร 20 ml คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ทำการย่อยที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจากข้อ 1 เป็นเวลา 5 นาที กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ปรับ pH เป็น 6 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

ด้วยเครื่อง HPLC จากนั้นทำการไฮโดรไลซ์เช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยนเวลาในการย่อยเป็นที่ระยะเวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ

#### 4. ทดลองหาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสม

เมื่อได้ขนาด อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 1-3 ทำการทดลองขั้นต่อไป โดยชั่งตัวอย่างหนัก 2 g บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% (v/v) ปริมาตร 20 ml คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ทำการย่อยที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ได้ เป็นเวลา 10 นาที กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ปรับ pH เป็น 6 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

5. ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอะราบิโนส ด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้ตัวอย่างที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1-4

### ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกพร้อมกับฉายรังสีแกมมา

นำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy มาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกที่สภาวะที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีไปทำการไฮโดรไลซ์ โดยชั่งตัวอย่างหนัก 2 g บรรจุลงในขวดสำหรับ autoclave เติมกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ปริมาตร 20 ml (อัตราส่วนตัวอย่างต่อกรดซัลฟูริก คือ 1:10 w/v, DM) คนให้เข้ากัน นำไปเข้าเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิและเวลาที่ได้จากการทดลองหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมตามลำดับ

2. กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่กรองได้ปรับ pH เป็น 6 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต แล้ววัดองค์ประกอบด้วยเครื่องวัดความหวาน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC



### วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

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

$$\text{เซลลูโลส (\%)} = \text{ADF} - \text{ADL}$$

$$\text{เฮมิเซลลูโลส (\%)} = \text{NDF} - \text{ADF}$$

$$\text{ลิกนิน (\%)} = \text{ADL}$$

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

ADF (acid detergent fiber) คือ เยื่อใยของเซลลูโลสกับลิกนิน

ADL (acid detergent lignin) คือ ปริมาณลิกนิน

โดยค่า NDF, ADF และ ADL ที่ได้เป็นค่าจากตัวอย่างที่อยู่ในสภาพวัตถุแห้ง

2. วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลไซโลส กลูโคส แมนโนส ฟรุ็กโตส และอะราบิโนส ด้วยเครื่อง HPLC ในการหาค่าปริมาณน้ำตาลดังกล่าว โดยใช้การเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเครื่อง HPLC

เครื่องวิเคราะห์	เงื่อนไขในการวิเคราะห์
Column	Lichrocart – NH <sub>2</sub> ขนาด 250 x 4 mm
Mobile phase	90% ACN in H <sub>2</sub> O (v/v)
Flow rate	1.8 ml/min
Temperature	25 °C
Injection volume	20 µL
Detector	RID

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในหญ้า

จากการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใย โดยวิธีของ Van Soest (ดังแสดงในภาคผนวก ก.) ในหญ้า 4 ชนิด คือ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูฐี ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณเยื่อใยในหญ้า

ชนิดของหญ้า	องค์ประกอบในหญ้า (w/w, DM) (mean $\pm$ standard deviation)				
	NDF	ADF	Cellulose	Hemicellulose	ADL(Lignin)
กินนีสีม่วง	61.44 $\pm$ 0.10	28.50 $\pm$ 0.33	25.93 $\pm$ 0.10	32.95 $\pm$ 0.27	1.87 $\pm$ 0.10
รูฐี	59.99 $\pm$ 0.09	34.27 $\pm$ 0.24	30.15 $\pm$ 0.23	25.72 $\pm$ 0.20	4.03 $\pm$ 0.23
เนเปียร์ยักษ์	54.38 $\pm$ 0.18	26.69 $\pm$ 0.37	23.38 $\pm$ 0.06	27.68 $\pm$ 0.01	1.94 $\pm$ 0.06
แพนโกล่า	64.18 $\pm$ 0.03	30.71 $\pm$ 0.16	28.04 $\pm$ 0.06	33.47 $\pm$ 0.03	2.28 $\pm$ 0.06

หมายเหตุ : แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

จากตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van Soest สามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{เซลลูโลส (\%)} = \text{ADF} - \text{ADL}$$

$$\text{เฮมิเซลลูโลส (\%)} = \text{NDF} - \text{ADF}$$

$$\text{ลิกนิน (\%)} = \text{ADL}$$

โดยค่า NDF, ADF และ ADL ที่ได้เป็นค่าจากตัวอย่างที่อยู่ในสภาพวัตถุแห้ง (Dry Matter; DM)

**Neutral Detergent Fiber (NDF)** เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืชหรือเยื่อใยต่างๆ ในพืช ได้แก่ Cellulose, hemicellulose, lignin, cutin และ tanin หญ้าที่มีปริมาณ NDF สูงจะย่อยยาก หรือมีคุณภาพต่ำกว่าหญ้าที่มี NDF ต่ำ ในตัวอย่างหญ้า 4 ชนิด ที่ทำการวิจัย พบว่ามีค่า NDF อยู่ในช่วง 54.38%-64.18% โดยค่าต่ำสุดพบในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ และค่าสูงสุดพบในหญ้าแพนโกล่า

**Acid Detergent Fiber (ADF)** ได้แก่ เยื่อใยส่วนที่ประกอบด้วย cellulose, lignin, cutin และ Acid insoluble Ash (AIA) ซึ่งพบว่าใน ADF ส่วนใหญ่ประกอบด้วย cellulose และ lignin ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ บางครั้งจึงเรียก ADF ว่า Lignocellulose ในตัวอย่างหญ้า 4 ชนิด ที่ทำการวิจัย พบว่ามีค่า ADF อยู่ในช่วง 26.69%-34.27% โดยค่าต่ำสุดพบในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ และค่าสูงสุดพบในหญ้ารูซี่

**Cellulose** เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างที่สำคัญของพืช อยู่ในส่วนผนังเซลล์ชั้นที่ 1 (Primary wall) สัตว์ไม่สามารถย่อยได้ ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในกระเพาะช่วยในการย่อย ในตัวอย่างหญ้า 4 ชนิด ที่ทำการวิจัยพบว่ามีค่า Cellulose อยู่ในช่วง 23.38%-30.15% ค่าต่ำสุดพบในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ และค่าสูงสุดพบในหญ้ารูซี่

**Hemicellulose** เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ชั้นที่ 2 (Secondary wall) ของพืช และสามารถละลายในกรดและด่างได้ดี ในตัวอย่างหญ้า 4 ชนิด ที่ทำการวิจัยพบว่ามีค่าเฉลี่ยของ hemicellulose อยู่ในช่วง 25.72%-33.47% โดยค่าต่ำสุดพบในหญ้ารูซี่และค่าสูงสุดพบในหญ้าแพนโกล่า

**Acid Detergent Lignin (ADL)** เป็นส่วนประกอบที่ทำให้ผนังเซลล์แข็งและคงทน Lignin เป็นสารที่สัตว์ย่อยไม่ได้และยังทำให้การย่อยได้ของเยื่อใยโดยเฉพาะ cellulose และ hemicellulose ลดลงอีกด้วย ค่าเฉลี่ยของ Lignin ในตัวอย่างหญ้า 4 ชนิด ที่ทำการวิจัยพบว่ามีค่าของ Lignin อยู่ในช่วง 1.87%-4.03% โดยค่าต่ำสุดพบในหญังกินนี่สีม่วง และค่าสูงสุดพบในหญ้ารูซี่

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสใน หญ้าด้วยกรดซัลฟูริก และการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

### ผลการศึกษาเบื้องต้น (Preliminary Test)

นำตัวอย่างหญ้าแต่ละชนิดมาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาต่างๆ กัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าให้เป็นน้ำตาล ในการวิจัยเบื้องต้น (Preliminary Test) วัดองศาบริก (% Brix) โดยใช้เครื่องวัดความหวาน (Brix Refractometer) ในการวิเคราะห์ผล ซึ่งในที่นี้จะทำการทดลองทั้งในตัวอย่างของหญ้าที่ฉายรังสีและหญ้าที่ไม่ฉายรังสี เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

#### 4.2.1 หญ้ากินนีสีม่วง

เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในหญ้า ในตารางที่ 4.1 พบว่าในหญ้ากินนีสีม่วงมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสค่อนข้างสูง และที่สำคัญคือมีปริมาณลิกนินน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากหญ้าทั้ง 4 ชนิด เนื่องจากลิกนินเป็นโครงสร้างที่ย่อยได้ยาก ดังนั้นในหญ้าที่มีปริมาณลิกนินน้อยๆ จะทำให้กระบวนการย่อยเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปัจจัย (Factor) แทรกซ้อนที่อาจจะเป็นปัญหาบกรวนหรือส่งผลกระทบต่อผลการทดลองในเบื้องต้นด้วย ดังนั้นจึงเลือกทำการทดลองเบื้องต้นในหญ้ากินนีสีม่วงก่อน แล้วจึงทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่ ตามลำดับ

จากข้อมูลในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้ารูซี่ พบว่าแนวโน้มของความเหมาะสมในการย่อยมีลักษณะของข้อมูลทั้งหมดเป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆ ชนิดของหญ้า ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงแสดงเป็นตัวอย่างของการทดลองทั้งหมด

สำหรับผลการการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าแพนโกล่า และหญ้าลูซี่ จะแสดงผลการศึกษาที่ได้ตามลำดับ

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงด้วยกรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก ได้สภาวะที่เหมาะสมในการย่อย สามารถสรุปได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
ขนาดอนุภาคของหญ้า (Sample Particle Size)	710 $\mu\text{m}$
อุณหภูมิในการย่อย (Reaction Temperature)	121 °C
ระยะเวลา (Reaction Time)	10 นาที
ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ Concentration)	5-7%
ปริมาณรังสี (Radiation Dose)	1100 kGy

หมายเหตุ : ข้อมูลนี้เป็นการสรุปสภาวะที่เหมาะสมรวมกันทั้งในการทดลองที่ใช้กรดซัลฟูริกอย่างเดียวและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก



#### 4.2.1.1 ผลการศึกษาเรื่องขนาดอนุภาคของหญ้า (Sample Particle Size)

การวิจัยขั้นต้น นำหญ้างินนี่สีม่วงที่มี Particle Size 300  $\mu\text{m}$  และ 710  $\mu\text{m}$  คิดเป็น 34.17% และ 44.58% ตามลำดับ มาเป็นตัวแทนของขนาดของหญ้าที่จะทำการศึกษาวิจัย โดย Particle Size ทั้งสองนี้เป็น Particle Size ที่มีปริมาณมากที่สุดเป็นสองลำดับแรกในตัวอย่งหญ้าที่นำมาใช้ในการวิจัย

การทดลองเบื้องต้น ทำการแบ่งตัวอย่างหญ้างินนี่สีม่วงออกเป็น 2 กลุ่มการทดลอง โดยให้การทดลองกลุ่มที่ 1 ใช้หญ้างินนี่สีม่วงที่มี Particle Size 300  $\mu\text{m}$  และการทดลองกลุ่มที่ 2 ใช้หญ้างินนี่สีม่วงที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ทำการย่อยที่ความเข้มข้นของกรดฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 ผลการไฮโดรไลซิโมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด (ก.) 300  $\mu\text{m}$  และ (ข.) 710  $\mu\text{m}$  ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

(ก.) 300  $\mu\text{m}$

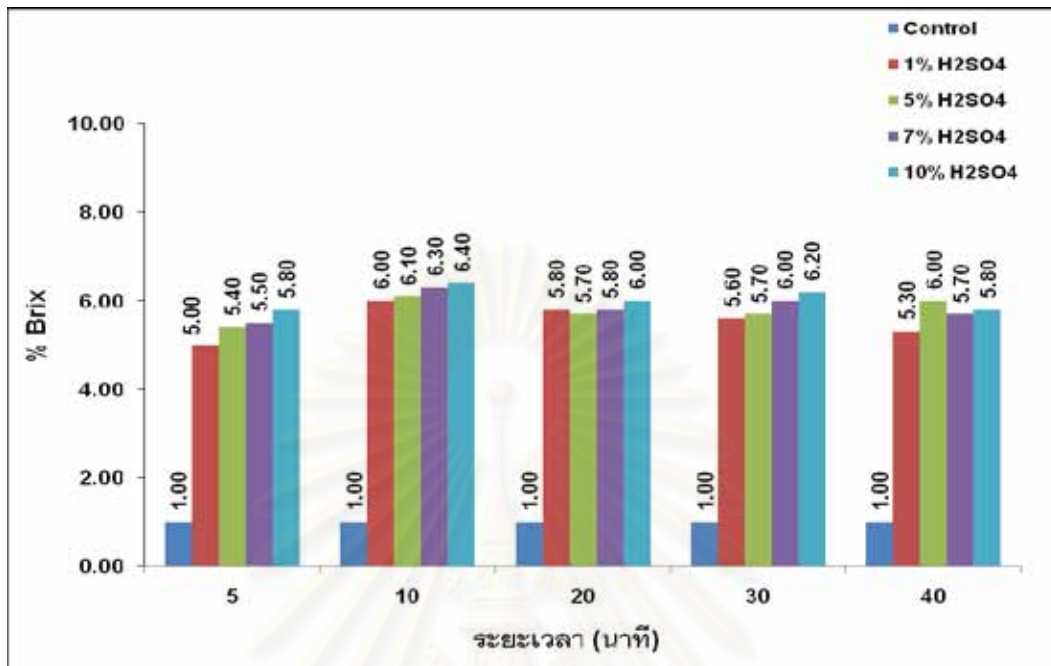
ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องศาบริกของหญ้ากินนีสีม่วงที่เวลาต่างๆ (นาที) (mean $\pm$ standard error)				
	5	10	20	30	40
Control	1.00 $\pm$ 0.00	1.00 $\pm$ 0.14	1.00 $\pm$ 0.37	1.00 $\pm$ 0.34	1.00 $\pm$ 0.20
1	5.00 $\pm$ 0.00	6.00 $\pm$ 0.14	5.80 $\pm$ 0.37	5.60 $\pm$ 0.66	5.30 $\pm$ 0.20
5	5.40 $\pm$ 0.00	6.10 $\pm$ 0.24	5.70 $\pm$ 0.25	5.70 $\pm$ 0.16	6.00 $\pm$ 0.06
7	5.50 $\pm$ 0.00	6.30 $\pm$ 0.17	5.80 $\pm$ 0.11	6.00 $\pm$ 0.02	5.70 $\pm$ 0.02
10	5.80 $\pm$ 0.00	6.40 $\pm$ 0.20	6.00 $\pm$ 0.29	6.20 $\pm$ 0.28	5.80 $\pm$ 0.05

(ข.) 710  $\mu\text{m}$

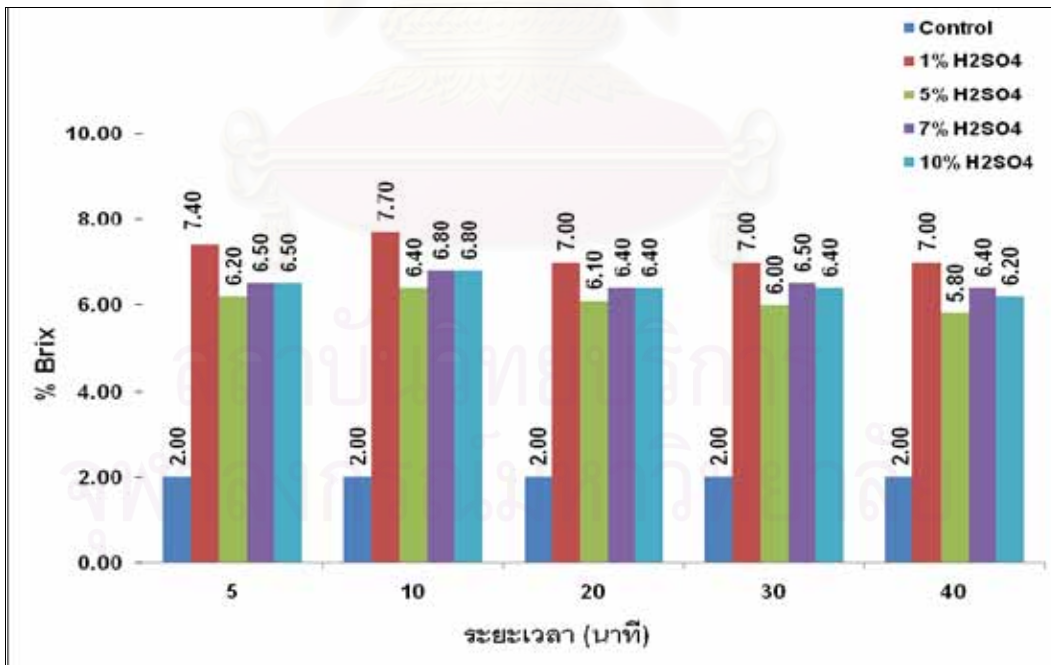
ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องศาบริกของหญ้ากินนีสีม่วงที่เวลาต่างๆ (นาที) (mean $\pm$ standard error)				
	5	10	20	30	40
Control	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.02	2.00 $\pm$ 0.04
1	7.40 $\pm$ 0.17	7.70 $\pm$ 0.13	7.00 $\pm$ 0.06	7.00 $\pm$ 0.57	7.00 $\pm$ 0.04
5	6.20 $\pm$ 0.14	6.40 $\pm$ 0.13	6.10 $\pm$ 0.25	6.00 $\pm$ 0.17	5.80 $\pm$ 0.32
7	6.50 $\pm$ 0.03	6.80 $\pm$ 0.04	6.40 $\pm$ 0.16	6.50 $\pm$ 0.02	6.40 $\pm$ 0.29
10	6.50 $\pm$ 0.04	6.80 $\pm$ 0.05	6.40 $\pm$ 0.24	6.40 $\pm$ 0.11	6.20 $\pm$ 0.28

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

(ก.) 300  $\mu\text{m}$



(ข.) 710  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4.1 องค์สารบrixจากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด (ก.) 300  $\mu\text{m}$  และ (ข.) 710  $\mu\text{m}$  ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

จากผลการศึกษานี้พบว่าขนาดที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงที่มี Particle Size 300  $\mu\text{m}$  และ 710  $\mu\text{m}$  ทำการย่อยที่ความเข้มข้นของกรดฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ผลการศึกษาจากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 พบว่า

เมื่อพิจารณารูป (ก.) ของสารบrikที่ได้จากหญ้าขนาด 300  $\mu\text{m}$  มีค่าอยู่ในช่วง 1.00%-6.40% ในชุดการทดลองที่เวลา 5, 10, 20 และ 30 นาที พบว่าสารบrikมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นกรดฟูริก 1% และค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นกรดเพิ่มขึ้น แต่ในชุดการทดลองที่เวลา 40 นาที พบว่า สารบrikมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดฟูริก 5% และค่อยๆ คงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดฟูริกเพิ่มขึ้น สำหรับชุดการทดลองควบคุม (Control: กรดฟูริก 0%) สารบrikที่ได้มีค่าคงที่ที่ 1% ในทุกชุดการทดลอง

การทดลองในรูป (ข.) ของสารบrikที่ได้จากหญ้าขนาด 710  $\mu\text{m}$  มีค่าอยู่ในช่วง 2.00%-7.70% เมื่อพิจารณาในแต่ละชุดการทดลอง (ชุดการทดลองที่เวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที) พบว่า แนวโน้มของข้อมูล (Trend) ในทุกชุดการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นกรดฟูริกและระยะเวลาที่ทดสอบ กล่าวคือ สารบrikจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นกรดฟูริก 1% แล้วลดลงที่ความเข้มข้นกรดฟูริก 5% จากนั้นจึงค่อยๆ คงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดฟูริกเพิ่มขึ้น สำหรับชุดการทดลองควบคุม (Control: กรดฟูริก 0%) สารบrikที่ได้มีค่าคงที่ที่ 2% ในทุกชุดการทดลอง

จากผลการศึกษานี้พบว่าขนาดที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงที่ได้จากข้อมูลข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบของสารบrikที่ได้จากหญ้าที่มี Particle Size 300  $\mu\text{m}$  และ 710  $\mu\text{m}$  พบว่าหญ้าขนาด 710  $\mu\text{m}$  จะมีค่าของสารบrikสูงกว่าหญ้าขนาด 300  $\mu\text{m}$  ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  มาเป็นตัวแทนของหญ้ากินนีสีม่วงทั้งหมด และที่ขนาด 710  $\mu\text{m}$  ยังเป็นขนาดของหญ้าที่มีมากที่สุดในทุกหญ้าที่นำมาศึกษาวิจัย

#### 4.2.1.2 ผลการศึกษาเรื่องอุณหภูมิ (Reaction Temperature)

นำหญ้าที่มีขนาดเหมาะสมคือ 710  $\mu\text{m}$  เป็นตัวแทนในการศึกษาเรื่องอุณหภูมิ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 กลุ่ม ให้กลุ่มที่ 1 ทดลองที่อุณหภูมิ 100°C ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) และกลุ่มที่ 2 ทดลองที่อุณหภูมิ 121°C ในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) ที่มีความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  ที่มีความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (ก.) ที่อุณหภูมิ 100°C และ (ข.) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

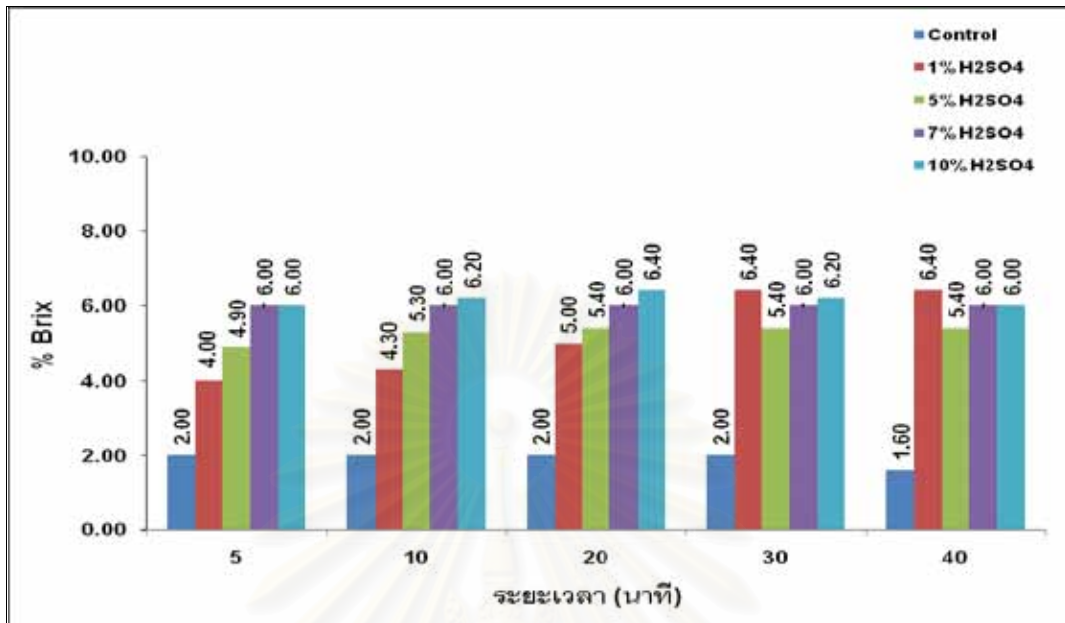
(ก.) ที่อุณหภูมิ 100°C

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องศาบริกของหญ้ากินนีสีม่วงที่เวลาต่างๆ (นาที) (mean $\pm$ standard error)				
	5	10	20	30	40
Control	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	1.60 $\pm$ 0.00
1	4.00 $\pm$ 0.17	4.30 $\pm$ 0.13	5.00 $\pm$ 0.20	6.40 $\pm$ 0.06	6.40 $\pm$ 0.02
5	4.90 $\pm$ 0.14	5.30 $\pm$ 0.13	5.40 $\pm$ 0.37	5.40 $\pm$ 0.25	5.40 $\pm$ 0.11
7	6.00 $\pm$ 0.03	6.00 $\pm$ 0.04	6.00 $\pm$ 0.34	6.00 $\pm$ 0.16	6.00 $\pm$ 0.02
10	6.00 $\pm$ 0.04	6.20 $\pm$ 0.05	6.40 $\pm$ 0.14	6.20 $\pm$ 0.24	6.00 $\pm$ 0.17

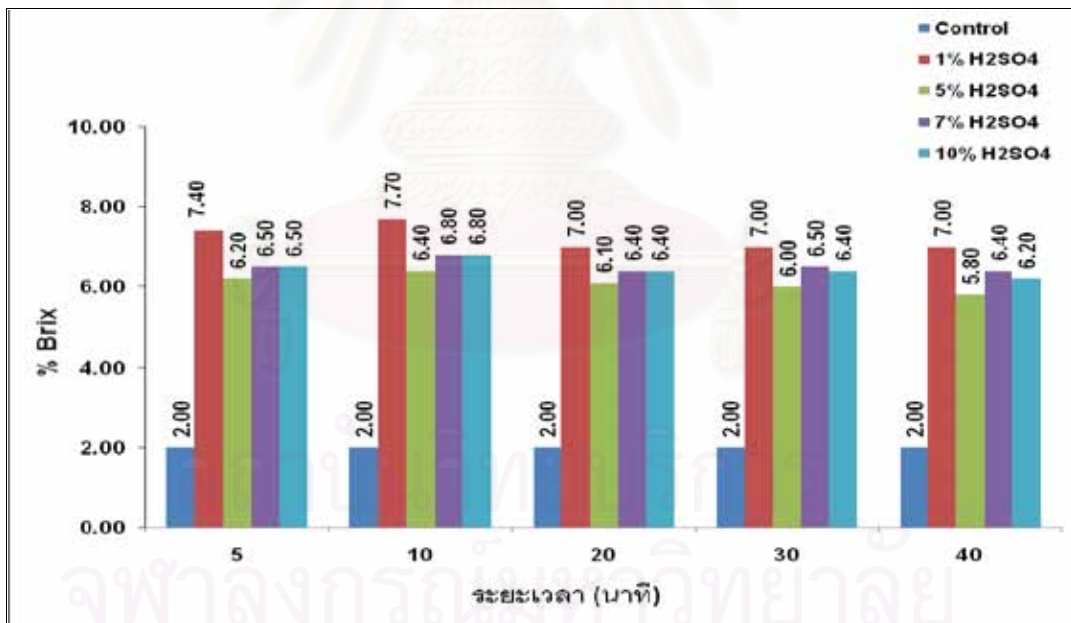
(ข.) ที่อุณหภูมิ 121°C

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องศาบริกของหญ้ากินนีสีม่วงที่เวลาต่างๆ (นาที) (mean $\pm$ standard error)				
	5	10	20	30	40
Control	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.02	2.00 $\pm$ 0.04
1	7.40 $\pm$ 0.17	7.70 $\pm$ 0.13	7.00 $\pm$ 0.06	7.00 $\pm$ 0.57	7.00 $\pm$ 0.04
5	6.20 $\pm$ 0.14	6.40 $\pm$ 0.13	6.10 $\pm$ 0.25	6.00 $\pm$ 0.17	5.80 $\pm$ 0.32
7	6.50 $\pm$ 0.03	6.80 $\pm$ 0.04	6.40 $\pm$ 0.16	6.50 $\pm$ 0.02	6.40 $\pm$ 0.29
10	6.50 $\pm$ 0.04	6.80 $\pm$ 0.05	6.40 $\pm$ 0.24	6.40 $\pm$ 0.11	6.20 $\pm$ 0.28

(ก.) ที่อุณหภูมิ 100 °C



(ข.) ที่อุณหภูมิ 121 °C



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบจากการไฮโดรไลซิสโมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก 1%, 5%, 7% และ 10% (ก.) ที่อุณหภูมิ 100 °C และ (ข.) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



จากผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหมักน้ำกึ่งมีวงที่อุณหภูมิ 100°C และ 121°C ทำการย่อยที่ความเข้มข้นของกรดฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ผลการศึกษาจากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 พบว่า

พิจารณารูป (ก.) องศาบริกที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าอยู่ในช่วง 1.60%-6.40% เมื่อพิจารณาในชุดการทดลองที่เวลา 5, 10 และ 20 นาที พบว่า องศาบริกมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นกรดที่เพิ่มขึ้น แต่ในชุดการทดลองที่เวลา 30 นาที และ 40 นาที พบว่า องศาบริกมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% แล้วลดลงที่ความเข้มข้นกรด 5% และค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น สำหรับชุดการทดลองควบคุม (Control: 0% กรดซัลฟูริก) องศาบริกที่ได้มีค่าคงที่ที่ 2% และลดลงเป็น 1.60% ที่เวลา 40 นาที

การทดลองรูป (ข.) องศาบริกที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 121°C มีค่าอยู่ในช่วง 2.00%-7.70% เมื่อพิจารณาในแต่ละชุดการทดลอง (ชุดการทดลองที่เวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที) พบว่า แนวโน้มของข้อมูล (Trend) ในทุกชุดการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นกรดซัลฟูริกและระยะเวลาที่ทดสอบ กล่าวคือ องศาบริกที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% แล้วลดลงที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% จากนั้นจึงค่อยๆ คงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น สำหรับชุดการทดลองควบคุม องศาบริกที่ได้มีค่าคงที่ที่ 2% ในทุกชุดการทดลอง และในรูป (ข.) ยังพบว่า ชุดการทดลองที่ระยะเวลา 10 นาที จะได้องศาบริกสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกันจุดต่อจุดในแต่ละชุดการทดลอง (ทั้งชุดการทดลองในรูป ก. และชุดการทดลองในรูป ข.)

เมื่อเปรียบเทียบองศาบริกที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 กลุ่มการทดลอง พบว่าที่อุณหภูมิ 121°C มีค่าองศาบริกสูงกว่าที่อุณหภูมิ 100°C ในทุกช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก และระยะเวลาที่ทดสอบ และใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลคงที่ (Stable) ตั้งแต่ที่เวลา 5 นาที ซึ่งน้อยกว่ากลุ่มการทดลองที่อุณหภูมิ 100°C ซึ่งเริ่มสภาวะสมดุลคงที่ที่เวลา 30 นาทีเป็นต้นไป เมื่อพิจารณาข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้น อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการทดลองต่อไป คือ อุณหภูมิ 121°C

#### 4.2.1.3 ผลการศึกษาเรื่องเวลา (Reaction Time)

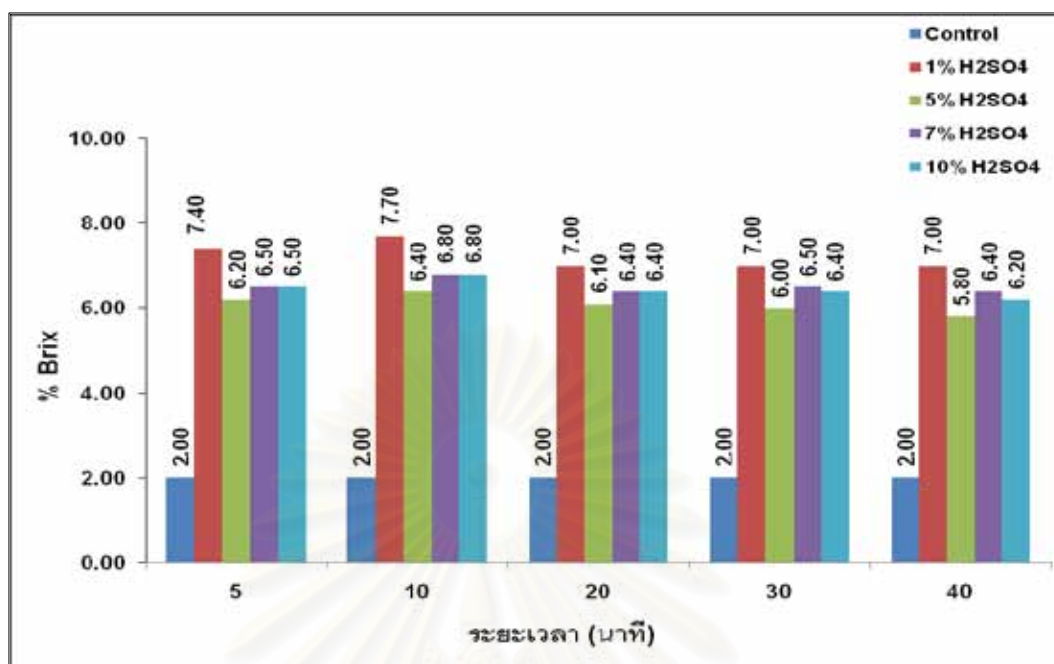
เมื่อได้ขนาดและอุณหภูมิที่เหมาะสมแล้ว ในขั้นตอนนี้ทำการศึกษาเรื่องเวลาที่ เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าให้เป็นน้ำตาล โดยนำหญ้า กินีสีม่วงที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  มาย่อยที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ที่ อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.5 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากีนีสีม่วงที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องค์ประกอบของหญ้ากีนีสีม่วงที่เวลาต่างๆ (นาที) (mean $\pm$ standard error)				
	5	10	20	30	40
Control	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.02	2.00 $\pm$ 0.04
1	7.40 $\pm$ 0.17	7.70 $\pm$ 0.13	7.00 $\pm$ 0.06	7.00 $\pm$ 0.57	7.00 $\pm$ 0.04
5	6.20 $\pm$ 0.14	6.40 $\pm$ 0.13	6.10 $\pm$ 0.25	6.00 $\pm$ 0.17	5.80 $\pm$ 0.32
7	6.50 $\pm$ 0.03	6.80 $\pm$ 0.04	6.40 $\pm$ 0.16	6.50 $\pm$ 0.02	6.40 $\pm$ 0.29
10	6.50 $\pm$ 0.04	6.80 $\pm$ 0.05	6.40 $\pm$ 0.24	6.40 $\pm$ 0.11	6.20 $\pm$ 0.28

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบจากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

จากผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  ทำการย่อยที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ผลการศึกษาจากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3 พบว่า

การทดลองรูปที่ 4.3 องค์ประกอบที่ได้จากการทดลอง มีค่าอยู่ในช่วง 2.00%-7.70% เมื่อพิจารณาในแต่ละชุดการทดลอง (ชุดการทดลองที่เวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที) พบว่า แนวโน้มของข้อมูลในทุกชุดการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นกรดซัลฟูริกและระยะเวลาที่ทดสอบ กล่าวคือ ในทุกชุดการทดลอง องค์ประกอบที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และลดลงที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% แล้วจึงค่อยๆ คงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น สำหรับชุดการทดลองควบคุม (Control: 0% กรดซัลฟูริก) องค์ประกอบที่ได้มีค่าคงที่ที่ 2% ในทุกชุดการทดลอง

จากรูปที่ 4.3 ยังพบว่า ชุดการทดลองที่เวลา 10 นาที องค์ประกอบมีค่าอยู่ในช่วง 2.00%-7.70% ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกันจุดต่อจุดในแต่ละชุดการทดลอง และองค์ประกอบที่มีค่าสูงรองมาคือที่ชุดการทดลองที่เวลา 5 นาที มีค่าองค์ประกอบ

บิริคอยู่ในช่วง 2.00%-7.40% และที่ชุดการทดลองที่เวลา 20, 30 และ 40 นาที องศาบิริคที่ได้มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการย่อยสลายเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาทั้งกลุ่มการทดลอง พบว่า องศาบิริคจะมีค่าเพิ่มขึ้นในชุดการทดลองที่เวลา 5 นาที และมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที่เวลา 10 นาที และมีค่าคงที่ในชุดการทดลองที่เวลา 20 และ 30 นาที และเริ่มลดลงในชุดการทดลองที่เวลา 40 นาที ดังนั้นที่เวลาเพิ่มขึ้นองศาบิริคที่ได้จะมีค่าลดลง

จากผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง สรุปได้ว่าองศาบิริคจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นในทุกความเข้มข้นกรด แต่เนื่องจากองศาบิริคที่เวลา 5 และ 10 นาที มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่สูงกว่าในช่วงเวลา 20, 30 และ 40 นาที ในทุกช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก ดังนั้นจึงเลือกศึกษาต่อไปที่เวลา 5 และ 10 นาที

#### 4.2.1.4 ผลการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีแกมมา (Radition Dose)

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของขนาดอนุภาคของหญ้า อุณหภูมิ และเวลาในการย่อยสลายแล้ว ขั้นตอนมาทำการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมในการย่อย ทำการทดลองโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มการทดลอง ให้กลุ่มที่ 1 ทดลองที่เวลา 5 นาที และกลุ่มที่ 2 ทดลองที่เวลา 10 นาที ใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C ในตัวอย่างหญ้ากินนีสีม่วงซึ่งฉายรังสี 300 kGy, 500 kGy, 700 kGy และ 1100 kGy ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที

(ก.) ที่เวลา 5 นาที

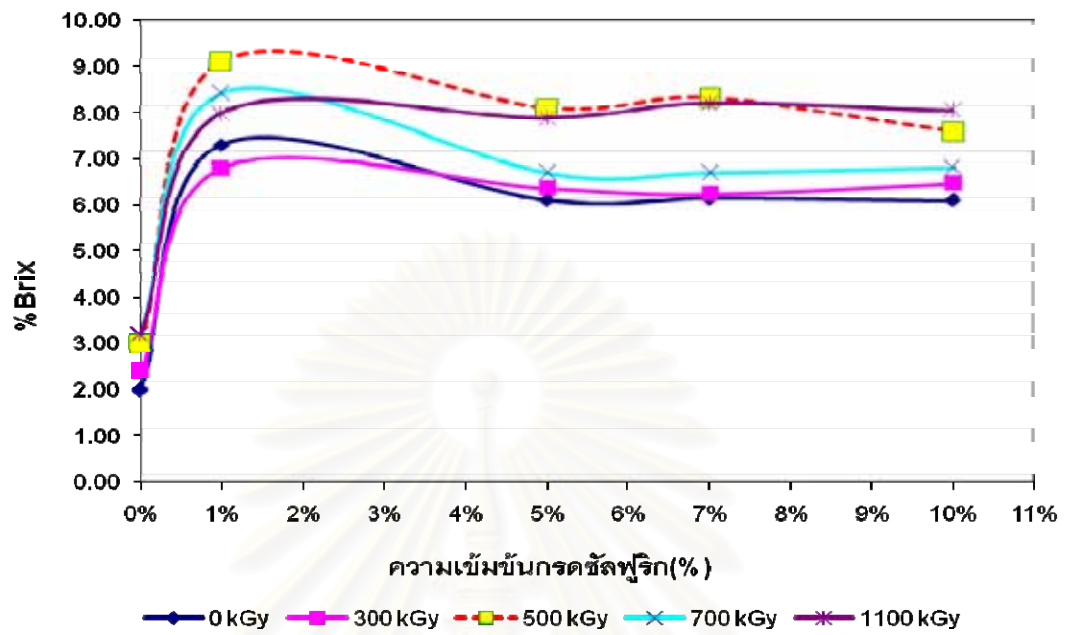
ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องศาบริกของหญ้ากินนีสีม่วงที่ปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)				
	0	300	500	700	1100
Control	2.00 $\pm$ 0.00	2.40 $\pm$ 0.00	3.00 $\pm$ 0.00	3.20 $\pm$ 0.00	3.20 $\pm$ 0.00
1	7.32 $\pm$ 0.17	6.80 $\pm$ 0.57	9.11 $\pm$ 0.22	8.42 $\pm$ 0.03	8.00 $\pm$ 0.00
5	6.10 $\pm$ 0.14	6.36 $\pm$ 0.12	8.11 $\pm$ 0.11	6.70 $\pm$ 0.35	7.89 $\pm$ 0.24
7	6.14 $\pm$ 0.03	6.23 $\pm$ 0.33	8.32 $\pm$ 0.02	6.71 $\pm$ 0.72	8.22 $\pm$ 0.23
10	6.11 $\pm$ 0.04	6.47 $\pm$ 0.06	7.59 $\pm$ 0.73	6.81 $\pm$ 0.18	8.05 $\pm$ 0.03

(ข.) ที่เวลา 10 นาที

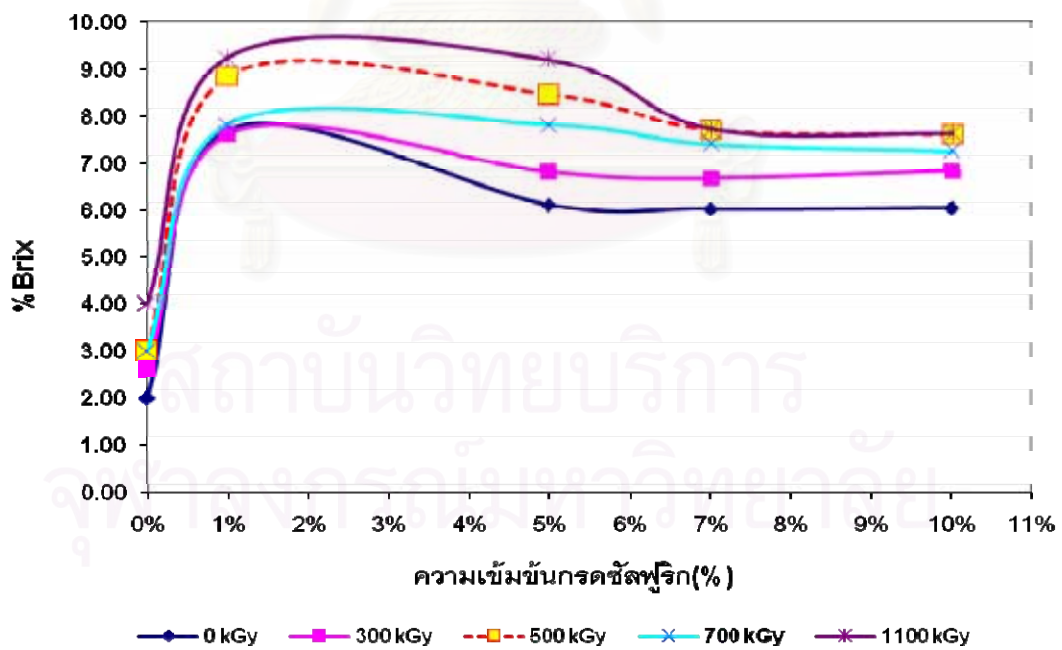
ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องศาบริกของหญ้ากินนีสีม่วงที่ปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)				
	0	300	500	700	1100
Control	2.00 $\pm$ 0.00	2.60 $\pm$ 0.00	3.00 $\pm$ 0.00	3.00 $\pm$ 0.00	4.00 $\pm$ 0.00
1	7.70 $\pm$ 0.13	7.60 $\pm$ 0.57	8.83 $\pm$ 0.28	7.80 $\pm$ 0.60	9.24 $\pm$ 0.62
5	6.11 $\pm$ 0.13	6.80 $\pm$ 0.00	8.45 $\pm$ 0.66	7.80 $\pm$ 0.02	9.20 $\pm$ 0.21
7	6.03 $\pm$ 0.04	6.67 $\pm$ 0.18	7.69 $\pm$ 0.85	7.40 $\pm$ 0.53	7.71 $\pm$ 0.70
10	6.04 $\pm$ 0.05	6.83 $\pm$ 0.04	7.60 $\pm$ 0.57	7.25 $\pm$ 0.56	7.62 $\pm$ 0.54

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

(ก.) ที่เวลา 5 นาที



(ข.) ที่เวลา 10 นาที



รูปที่ 4.4 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที

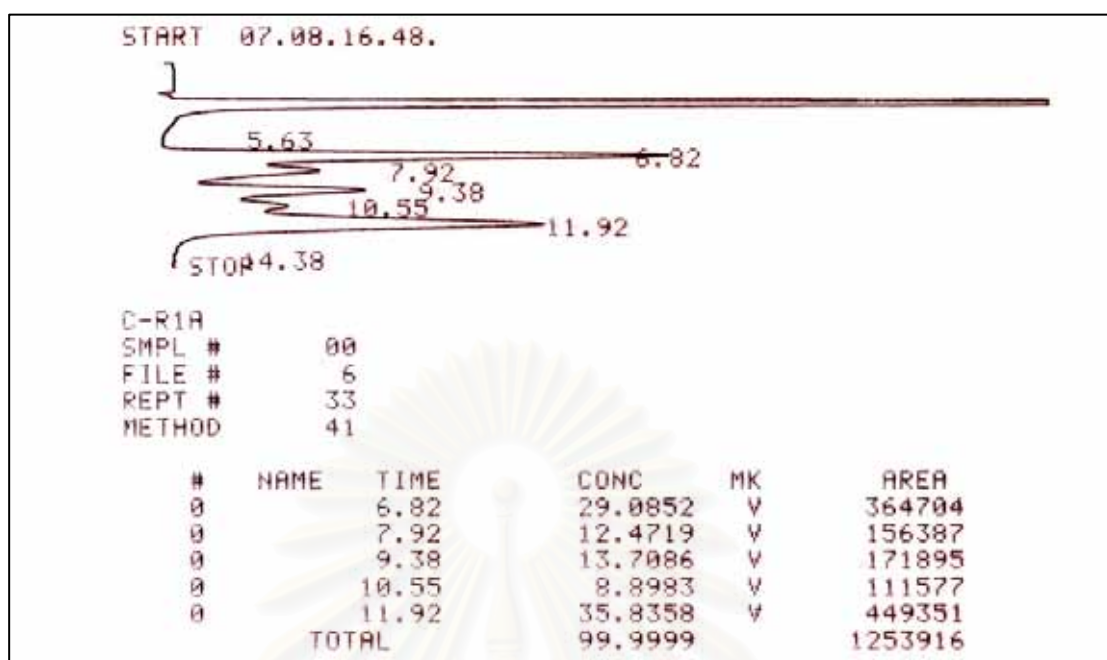


จากผลการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลาย เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300 kGy, 500 kGy, 700 kGy และ 1100 kGy ทำการย่อยที่เวลา 5 นาที และ 10 นาที ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C ผลการศึกษาจากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.4 พบว่า

การทดลองรูป (ก.) องศาบริกที่ได้จากการทดลองที่เวลา 5 นาที มีค่าอยู่ในช่วง 2.00%-9.11% แนวโน้มของข้อมูลในแต่ละชุดการทดลอง (ชุดการทดลองที่ 300, 500, 700 และ 1100 kGy) เป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกชุดการทดลอง กล่าวคือ องศาบริกมีค่าสูงขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และค่อยๆ ลดลงและคงที่ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% เมื่อพิจารณาองศาบริกจากมากไปน้อย พบว่า องศาบริกที่มีค่ามากที่สุด ได้จากชุดการทดลองที่ 500 kGy รองลงมาคือที่ 1100 kGy, 700 kGy, 300 kGy และ 0 kGy ตามลำดับ

การทดลองในรูป (ข.) องศาบริกที่ได้จากการทดลองที่เวลา 10 นาที มีค่าอยู่ในช่วง 2.00%-9.24% แนวโน้มของข้อมูลในแต่ละชุดการทดลองที่ได้มีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับการทดลองในรูป (ก.) คือองศาบริกมีค่าสูงขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% จากนั้นค่อยๆ ลดลงและคงที่ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% เมื่อพิจารณาชุดการทดลองแต่ละชุดการทดลอง พบว่า องศาบริกที่มีค่ามากที่สุด ได้จากชุดการทดลองที่ 1100 kGy, 500 kGy, 700 kGy, 300 kGy และ 0 kGy ตามลำดับ

ในขั้นตอนต่อไป นำสารละลายที่เตรียมได้จากทั้งสองกลุ่มการทดลอง(กลุ่ม ก. ที่เวลา 5 นาที และกลุ่ม ข. ที่เวลา 10 นาที) วิเคราะห์ปริมาณกลูโคส ไสโลส อะราบิโนส ฟรุคโตส และแมนโนส ด้วยเครื่อง HPLC ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ประกอบด้วย กลูโคส ไสโลส และอะราบิโนส โดยผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จะรายงานผลเป็นค่าของปริมาณน้ำตาลโดยรวม จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 พีคของน้ำตาลไซโลส น้ำตาลอะราบิโนส น้ำตาลฟรุ็กโตส น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลแมนโนส จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

จากรูปที่ 4.5 พีคของน้ำตาลแต่ละชนิดจะเริ่มปรากฏที่เวลาดังต่อไปนี้

น้ำตาลไซโลสจะปรากฏพีคนาทีที่	6.82	มีพื้นที่ใต้กราฟ = 364704
น้ำตาลอะราบิโนสจะปรากฏพีคนาทีที่	7.92	มีพื้นที่ใต้กราฟ = 156387
น้ำตาลฟรุ็กโตสจะปรากฏพีคนาทีที่	9.38	มีพื้นที่ใต้กราฟ = 171895
น้ำตาลกลูโคสจะปรากฏพีคนาทีที่	10.55	มีพื้นที่ใต้กราฟ = 111577
น้ำตาลแมนโนสจะปรากฏพีคนาทีที่	11.92	มีพื้นที่ใต้กราฟ = 449351

พิจารณารูปที่ 4.5 การวิเคราะห์น้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC จะรายงานผลน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อะราบิโนส ฟรุ็กโตส และแมนโนส จากพีค (Peak) ของน้ำตาลแต่ละชนิดที่ออกมาในเวลาต่างกัน สำหรับการคำนวณปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ (Area) ของน้ำตาลชนิดนั้นๆ เทียบกับสารมาตรฐานของน้ำตาลชนิดเดียวกัน เช่น ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคส ก็คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของน้ำตาลกลูโคสเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส เป็นต้น และใช้หลักการเดียวกันนี้กับน้ำตาลตัวอื่นๆ (ดังแสดงในภาคผนวก ข.)

น้ำตาลไซโลส น้ำตาลอะราบิโนส น้ำตาลฟรุคโตส น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลแมนโนส เป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งในโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นโครงสร้างที่มีโมเลกุลของกลูโคสมาต่อกันเป็นสายโซ่ เมื่อไฮโดรไลซ์เซลลูโลสจะได้น้ำตาลกลูโคส (Meyer et al., 1952)

สำหรับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดปนกัน คือ เพนโตแซน (ส่วนใหญ่เป็นไซแลน และอะราแบน เมื่อนำไปไฮโดรไลซ์ จะได้น้ำตาลไซโลสและอะราบิโนส) และเฮกโซแซน (ส่วนใหญ่เป็น แมนแนน กาแลคแทน และกลูแคน เมื่อถูกย่อยจะได้ น้ำตาลแมนโนส กาแลคโตส และกลูโคส ตามลำดับ)

ไซโลสเป็นน้ำตาลที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าน้ำตาลตัวอื่นๆ และจากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ทำให้เฮมิเซลลูโลสถูกย่อยสลายไปเป็นส่วนใหญ่ และจากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC ในหญ้ากินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า พบว่า ปริมาณน้ำตาลส่วนใหญ่ที่ได้เป็นน้ำตาลไซโลส รองลงมาคือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลอะราบิโนส ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณน้ำตาลไซโลสที่ได้นั้นมีค่าแปรผันตามปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง (ดังตาราง 4.1)

จากผลการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมในการทดลองที่ 4.2.1.4 ในขั้นตอนต่อไป นำสารละลายที่เตรียมได้จากทั้งสองกลุ่มการทดลอง (กลุ่ม ก. ที่เวลา 5 นาที และกลุ่ม ข. ที่เวลา 10 นาที) วิเคราะห์ปริมาณกลูโคส ไซโลส อะราบิโนส ฟรุคโตส และแมนโนส ด้วยเครื่อง HPLC โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้จะรายงานผลเป็นปริมาณน้ำตาลโดยรวม ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที

(ก.) ที่เวลา 5 นาที

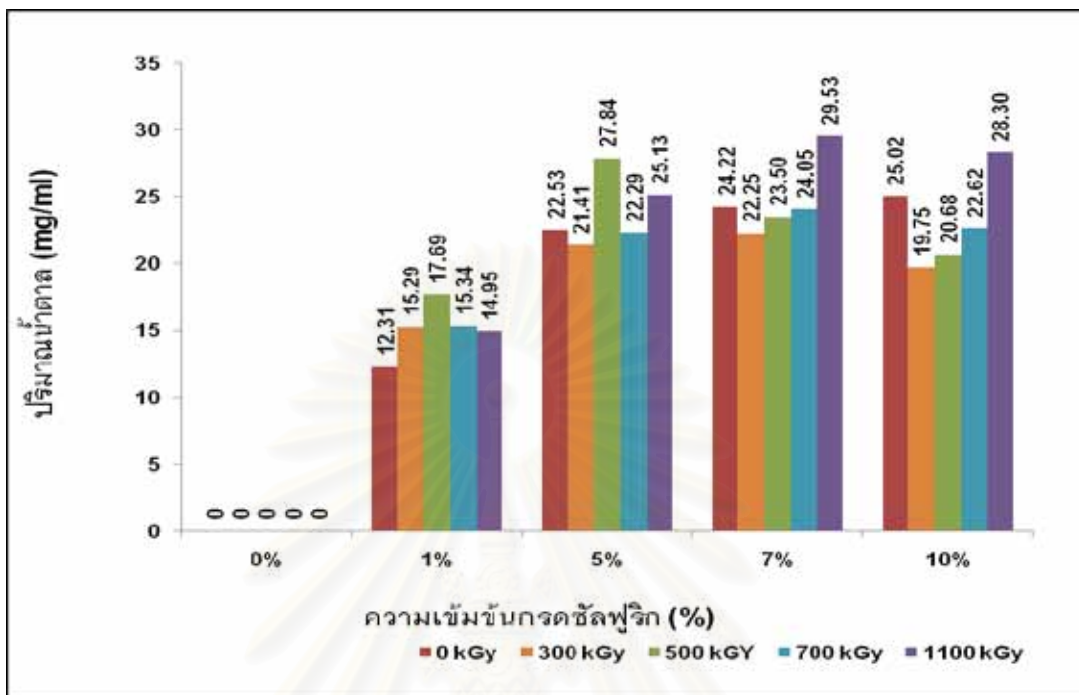
ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วง ที่ปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)				
	0	300	500	700	1100
Control	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
1	12.31 $\pm$ 0.14	15.29 $\pm$ 0.93	17.69 $\pm$ 0.17	15.34 $\pm$ 0.94	14.95 $\pm$ 0.29
5	22.53 $\pm$ 0.21	21.41 $\pm$ 0.67	27.84 $\pm$ 0.23	22.29 $\pm$ 0.44	25.13 $\pm$ 0.17
7	24.22 $\pm$ 0.89	22.25 $\pm$ 0.34	23.50 $\pm$ 0.63	24.05 $\pm$ 0.56	29.53 $\pm$ 0.67
10	25.02 $\pm$ 0.22	19.75 $\pm$ 1.00	20.68 $\pm$ 0.29	22.62 $\pm$ 0.48	28.30 $\pm$ 0.80

(ข.) ที่เวลา 10 นาที

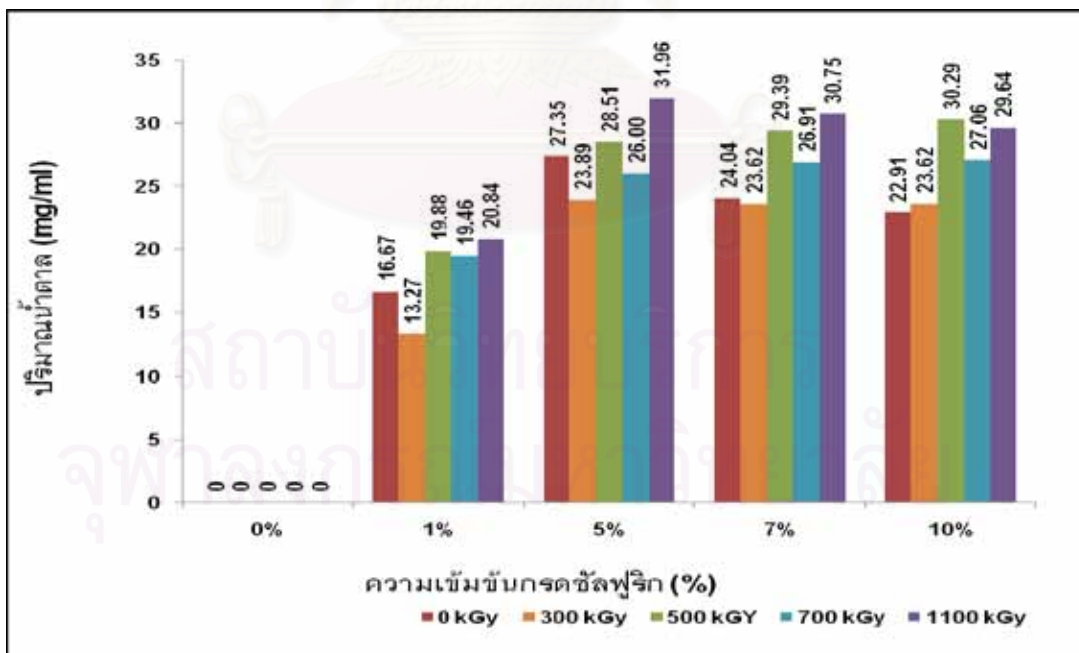
ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วง ที่ปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)				
	0	300	500	700	1100
Control	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
1	16.67 $\pm$ 0.27	13.27 $\pm$ 0.22	19.88 $\pm$ 0.35	19.46 $\pm$ 0.72	20.84 $\pm$ 0.24
5	27.35 $\pm$ 0.21	23.89 $\pm$ 0.68	28.51 $\pm$ 0.23	26.00 $\pm$ 0.60	31.96 $\pm$ 0.16
7	24.04 $\pm$ 0.50	23.62 $\pm$ 0.26	29.39 $\pm$ 0.52	26.91 $\pm$ 0.10	30.75 $\pm$ 0.15
10	22.91 $\pm$ 0.20	23.62 $\pm$ 0.04	30.29 $\pm$ 0.28	27.06 $\pm$ 0.23	29.64 $\pm$ 0.21

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

(ก.) ที่เวลา 5 นาที



(ข.) ที่เวลา 10 นาที



รูปที่ 4.6

ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเมลลิ่งของกล้วยตากที่ฉายรังสี 300, 500, 700 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา (ก.) 5 นาที และ (ข.) 10 นาที



เมื่อพิจารณาในรูปแบบ (ก.) การทดลองที่เวลา 5 นาที ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่า ปริมาณน้ำตาลทั้งกลุ่มการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 0.00% - 29.53% ซึ่งปริมาณน้ำตาลที่ได้มากที่สุด พบในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy และ 500 kGy มีค่าสูงกว่าหญ้าที่ฉายรังสี 700 kGy, 300 kGy และหญ้าไม่ฉายรังสี (0 kGy) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลกับความเข้มข้นกรดซัลฟูริก จากชุดการทดลอง (ก.) สรุปได้ว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้มากที่สุดจากการทดลองสามลำดับแรก คือ ในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 7% ได้น้ำตาล 29.53 mg/ml, ในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 10% ได้น้ำตาล 28.30 mg/ml และในหญ้าฉายรังสี 500 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% ได้น้ำตาล 27.84 mg/ml ซึ่งคิดเป็น 50.15%, 48.06 % และ 47.28% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการทดลองในรูปแบบ (ข.) การทดลองที่เวลา 10 นาที พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.00%-31.96% ซึ่งปริมาณน้ำตาลที่ได้จากหญ้าที่ฉายรังสี 1100 kGy และ 500 kGy มีค่าสูงกว่าหญ้าที่ฉายรังสี 700 kGy, 300 kGy และหญ้าไม่ฉายรังสี (0 kGy) ตามลำดับ ทั้งยังพบว่าที่ปริมาณรังสี 700 kGy ปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับหญ้าที่ไม่ฉายรังสี และที่ปริมาณรังสี 300 kGy จะให้ค่าน้ำตาลน้อยกว่าหญ้าที่ไม่ฉายรังสีในทุกความเข้มข้นกรดซัลฟูริก สำหรับในชุดการทดลองควบคุม (Control: กรดซัลฟูริก 0%) ไม่สามารถวัดค่าปริมาณน้ำตาลได้ทั้งในหญ้าที่ฉายรังสีและหญ้าที่ไม่ฉายรังสี

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้มากที่สุดจากการทดลอง 4 ลำดับแรก คือ ในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% ได้น้ำตาล 31.96 mg/ml รองลงมาคือในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 7% ได้น้ำตาล 30.75 mg/ml และในหญ้าฉายรังสี 500 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ได้น้ำตาล 30.29 mg/ml และในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 10% ได้น้ำตาล 29.64 mg/ml คิดเป็น 54.28%, 52.22%, 51.44% และ 50.34% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ตามลำดับ

จากผลการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีข้างต้น สรุปได้ว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโมเลกุลหญ้าในชุดการทดลองที่ฉายรังสี 1100 kGy และ 500 kGy มีค่าปริมาณน้ำตาลสูงกว่าหญ้าในชุดการทดลองอื่นๆ (ชุดที่ฉายรังสีที่ 700 kGy, 300 kGy และที่ไม่ฉายรังสี)



ปริมาณน้ำตาลจากสองกลุ่มการทดลอง(ก. 5 นาที และ ข. 10 นาที) พบว่า กลุ่ม ก. (ที่เวลา 10 นาที) ปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าสูงกว่า กลุ่ม ข. (ที่เวลา 5 นาที) และปริมาณน้ำตาลที่ได้มากที่สุดจากการทดลองพบในหญ้าที่ฉายรังสี 1100 kGy ในทุกความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก

แต่เนื่องจากปริมาณน้ำตาลที่ได้จากหญ้าที่ฉายรังสี 1100 kGy มีค่าใกล้เคียงกับหญ้าที่ฉายรังสี 500 kGy ดังนั้นจึงยังคงเลือกปริมาณรังสีที่ 500 kGy และ 1100 kGy ในการทดลองต่อไป และที่ระยะเวลา 10 นาที น้ำตาลในหญ้าที่ฉายรังสี 500 kGy ยังไม่คงที่และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาเรื่องความเข้มข้นกรดควบคู่กันในการทดลองต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.1.5 ผลการศึกษาเรื่องความเข้มข้นกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ Concentration)

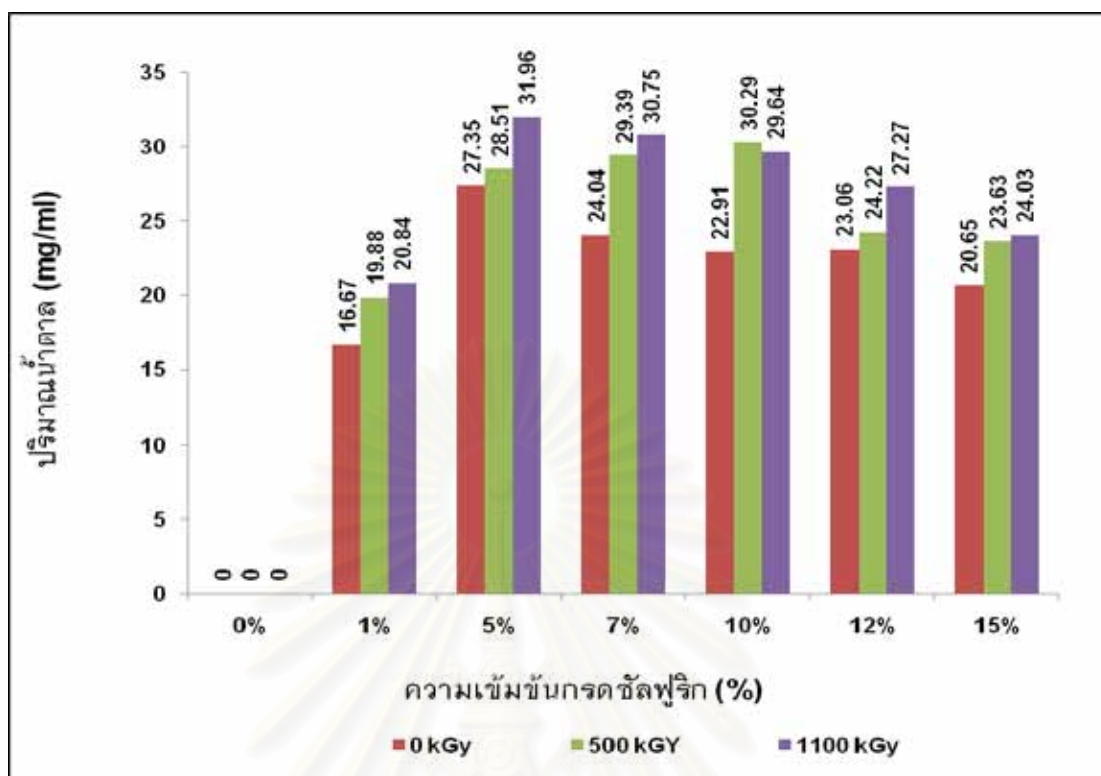
จากการทดลองข้างต้น เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าแล้ว คือใช้หญ้ากินนีสีม่วงที่มีขนาด 710  $\mu m$  ฉายรังสี 500 kGy และ 1100 kGy ที่อุณหภูมิ 121°C ทำการไฮโดรไลซ์เป็นเวลา 10 นาที

จากผลการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมในการทดลองที่ 4.2.1.4 ทำการศึกษาผลความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกและปริมาณรังสีแกมมา พบว่า ปริมาณน้ำตาลในหญ้าที่ฉายรังสี 500 kGy ยังไม่คงที่และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกสูงขึ้น ขั้นตอนนี้จึงทำการศึกษาเรื่องความเข้มข้นกรดซัลฟูริก โดยศึกษาที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1, 3, 5, 7, 10, 12 และ 15 % (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วง ที่ปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)		
	0	500	1100
Control	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
1	16.67 $\pm$ 0.27	19.88 $\pm$ 0.35	20.84 $\pm$ 0.24
5	27.35 $\pm$ 0.21	28.51 $\pm$ 0.23	31.96 $\pm$ 0.16
7	24.04 $\pm$ 0.50	29.39 $\pm$ 0.52	30.75 $\pm$ 0.15
10	22.91 $\pm$ 0.20	30.29 $\pm$ 0.28	29.64 $\pm$ 0.21
12	23.06 $\pm$ 0.03	24.22 $\pm$ 0.69	27.27 $\pm$ 0.85
15	20.65 $\pm$ 0.21	23.63 $\pm$ 0.60	24.03 $\pm$ 0.06

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.7 ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้ากินนีสีม่วงที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

ผลการศึกษาสภาวะความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้ในแต่ละชุดการทดลอง (ชุดการทดลองในหญ้าที่ฉายรังสี 0, 500 และ 1100 kGy) จะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และปริมาณน้ำตาลจะมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% จากนั้นปริมาณน้ำตาลจะค่อยๆ ลดลงที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 7% และลดลงเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเพิ่มสูงขึ้น

ในหญ้าที่ไม่ฉายรังสี (0 kGy) ปริมาณน้ำตาลที่ได้เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% จากนั้นปริมาณน้ำตาลค่อยๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น

ในหญ้าที่ฉายรังสี 500 kGy ปริมาณน้ำตาลที่ได้เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 10% จากนั้นปริมาณน้ำตาลค่อยๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น

ในหญ้าที่ฉายรังสี 1100 kGy ปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงและคงที่ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 7%-10% และลดลงอีกเมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเพิ่มสูงขึ้น

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง พบว่า สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 4 ลำดับแรก คือ หญ้ากินนีสีม่วงฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 31.96 mg/ml (w/v) รองลงมาคือในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 7% ได้ปริมาณน้ำตาล 30.75 mg/ml และในหญ้าฉายรังสี 500 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ได้น้ำตาล 30.29 mg/ml และในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ได้น้ำตาล 29.64 mg/ml คิดเป็น 54.28%, 52.22%, 51.44% และ 50.34% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ตามลำดับ

#### 4.2.1.6 สรุปผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงด้วยกรดซัลฟูริก

สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกคือ นำหญ้าที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  นำไปย่อยที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 31.96 mg/ml คิดเป็น 54.28% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีในตัวอย่าง

สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียวคือ ใช้หญ้าที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  นำไปย่อยที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 27.35 mg/ml คิดเป็น 46.45% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้า  
กินนีสีม่วงโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

กลุ่มการทดลอง	สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่อไปนี้				ปริมาณน้ำตาล (%) Conversion
	ขนาดหญ้า	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก	
หญ้าไม่ฉายรังสี	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	7%	46.45
หญ้าฉายรังสี 1100 kGy	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	7%	54.28

หมายเหตุ : ข้อมูลนี้เป็นการสรุปสภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด ในการทดลองที่ใช้  
กรดซัลฟูริกอย่างเดียวและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการ  
ย่อยสลายโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก มีค่าสูงกว่าการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว ซึ่ง  
ปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 8% ดังนั้นการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตควร  
พิจารณาถึงความเหมาะสมในทางปฏิบัติ ความคุ้มค่าในการวิจัย และต้นทุนในการฉายรังสี  
แกมมาที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่ได้รับว่าเหมาะสมหรือไม่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.2 หน้ำารูชี

ทำการทดลองเบื้องต้นในหน้ำารูชีเช่นเดียวกันทุกประการกับการทดลองเบื้องต้นในหน้ำากินนีสีม่วง โดยนำตัวอย่างหน้ำารูชีที่มีขนาด Particle Size 300  $\mu\text{m}$  และ 710  $\mu\text{m}$  มาย่อยด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาทีที่อุณหภูมิ 121°C เพื่อหาขนาดของหน้ำารูชีที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าขนาดของหน้ำารูชีที่เหมาะสมคือ 710  $\mu\text{m}$  คิดเป็น 42.67%

ศึกษาเรื่องอุณหภูมิที่เหมาะสมในขั้นต่อมาโดยนำหน้ำาที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  มาย่อยที่อุณหภูมิ 100°C และ 121°C เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหน้ำารูชีให้เป็นน้ำตาล ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยหน้ำารูชีคือ ที่อุณหภูมิ 121°C ในการศึกษาเรื่องขนาดของหน้ำาและอุณหภูมิที่เหมาะสม วิเคราะห์ผลที่ได้เป็นองศาปริก โดยใช้เครื่องวัดความหวานในการวิเคราะห์

สำหรับผลการทดลองเบื้องต้นที่กล่าวมา แนวโน้มของความเหมาะสมทั้งขนาดของหน้ำาและอุณหภูมิในการย่อยเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาเบื้องต้นในหน้ำากินนีสีม่วง โดยขนาดของหน้ำารูชีที่เหมาะสมที่ได้คือ Particle Size 710  $\mu\text{m}$  และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยคือที่ 121°C ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหน้ำารูชีโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
ขนาดอนุภาคของหน้ำา (Sample Particle Size)	710 $\mu\text{m}$
อุณหภูมิในการย่อย (Reaction Temperature)	121°C

หมายเหตุ : ข้อมูลนี้เป็นการสรุปสภาวะที่เหมาะสมรวมกันทั้งในการทดลองที่ใช้กรดซัลฟูริกอย่างเดียวและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

สำหรับการวิจัยขั้นต่อไป ทำการศึกษาเรื่องระยะเวลาที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหน้ำารูชี



#### 4.2.2.1 ผลการศึกษาเรื่องเวลา (Reaction Time)

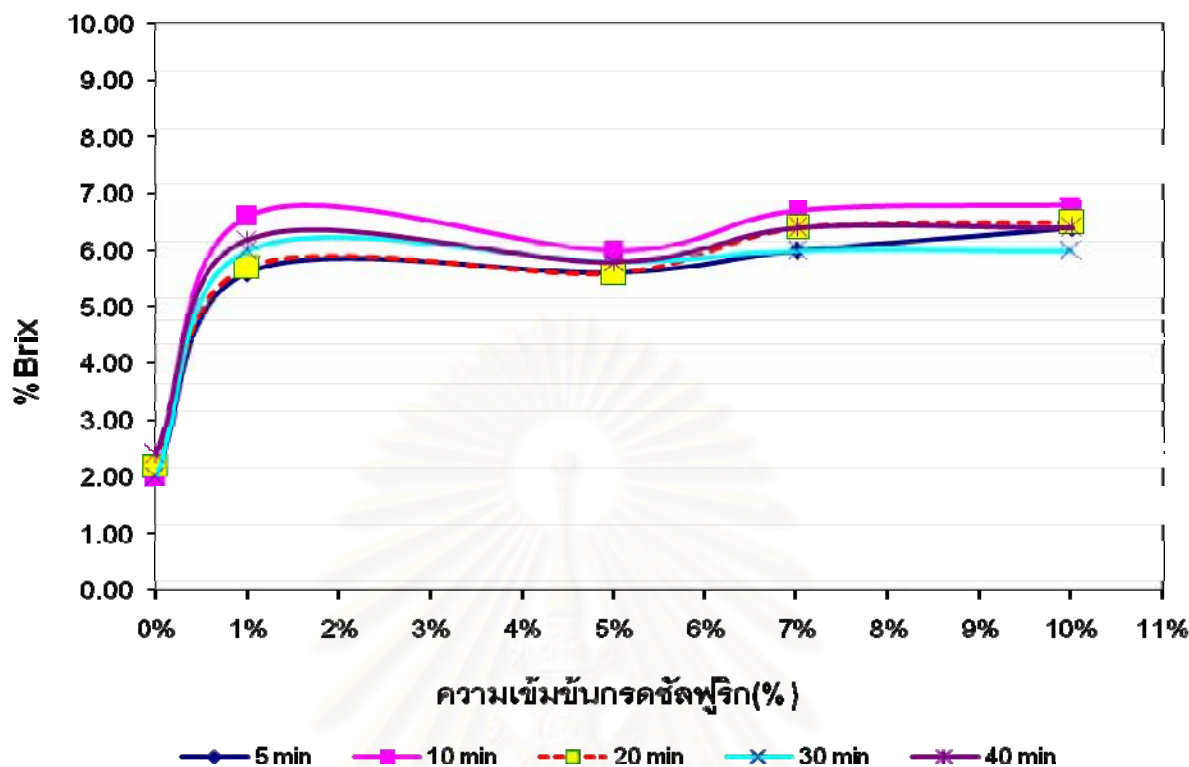
ศึกษาเรื่องระยะเวลาที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหัวารูชีให้เป็นน้ำตาล โดยนำหัวารูชีที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  มาทำการย่อยที่อุณหภูมิ 121°C ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.11 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหัวารูชีที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	องศาปริกของหัวารูชีที่เวลาต่างๆ (นาที) (mean $\pm$ standard error)				
	5	10	20	30	40
Control	2.00 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.20 $\pm$ 0.00	2.00 $\pm$ 0.00	2.40 $\pm$ 0.00
1	5.60 $\pm$ 0.00	6.60 $\pm$ 0.00	5.70 $\pm$ 0.14	6.00 $\pm$ 0.00	6.20 $\pm$ 0.00
5	5.60 $\pm$ 0.00	6.00 $\pm$ 0.07	5.60 $\pm$ 0.00	5.80 $\pm$ 0.00	5.80 $\pm$ 0.00
7	6.00 $\pm$ 0.00	6.70 $\pm$ 0.28	6.40 $\pm$ 0.00	6.00 $\pm$ 0.00	6.40 $\pm$ 0.00
10	6.40 $\pm$ 0.00	6.80 $\pm$ 0.00	6.50 $\pm$ 0.00	6.00 $\pm$ 0.21	6.40 $\pm$ 0.00

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหัวรู่ซีที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของหัวรู่ซี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.8 พบว่า องศาบริกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าอยู่ในช่วง 2.00%-6.80% แนวโน้มของข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกและระยะเวลาที่ทดสอบ โดยองศาบริกที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และค่อยๆลดลงที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5% จากนั้นจึงเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 7%

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ชุดการทดลองที่เวลา 10 นาที องศาบริกที่ได้มีค่าสูงสุดในทุกความเข้มข้นกรดซัลฟูริก และแนวโน้มของกราฟที่ได้ (Trend) นี้มีลักษณะเป็นเช่นเดียวกันกับการทดลองในหม้อกึ่งอัตโนมัติ ดังนั้นการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้เวลาในการย่อยสลายโมเลกุลของหัวรู่ซีที่ 10 นาที เช่นเดียวกับการทดลองในหม้อกึ่งอัตโนมัติ

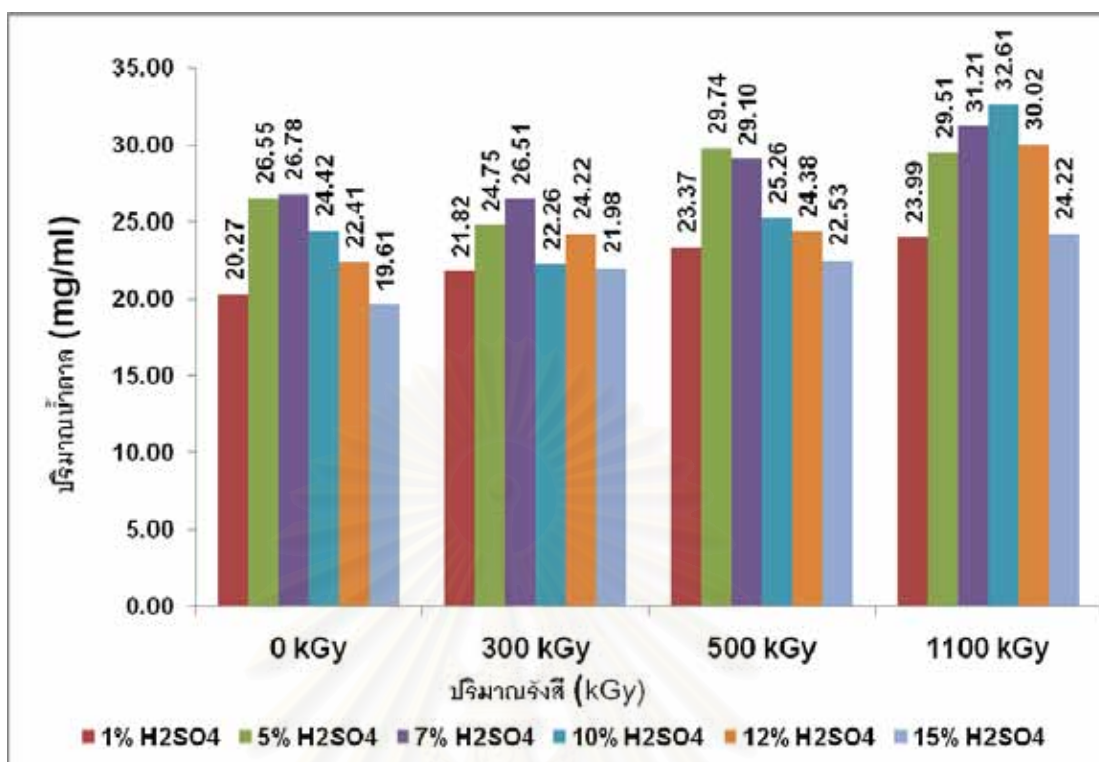
#### 4.2.2.2 ผลการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริก

การทดลองนี้ทำการศึกษาเรื่องรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกไปพร้อมกัน โดยทำการทดลองในหลอดที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  ฉายรังสี 300 kGy, 500 kGy และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.12 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหลอดที่มีปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของหลอดที่มีปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)			
	0	300	500	1100
Control	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
1	20.27 $\pm$ 0.00	21.82 $\pm$ 0.00	23.37 $\pm$ 0.00	23.99 $\pm$ 0.00
5	26.55 $\pm$ 0.00	24.75 $\pm$ 0.00	29.74 $\pm$ 0.00	29.51 $\pm$ 0.00
7	26.78 $\pm$ 0.00	26.51 $\pm$ 0.00	29.10 $\pm$ 0.00	31.21 $\pm$ 0.00
10	24.42 $\pm$ 0.00	22.26 $\pm$ 0.00	25.26 $\pm$ 0.00	32.61 $\pm$ 0.00
12	22.41 $\pm$ 0.00	24.22 $\pm$ 0.00	24.38 $\pm$ 0.00	30.02 $\pm$ 0.00
15	19.61 $\pm$ 0.00	21.98 $\pm$ 0.00	22.53 $\pm$ 0.00	24.22 $\pm$ 0.00

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 4.9 ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิโมเลกุลหน่วยารูซี่ที่ฉายรังสี 300, 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

จากผลการศึกษาเรื่องปริมาณรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกต่อสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหน่วยารูซี่ เมื่อวิเคราะห์ผลน้ำตาลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่า

ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโมเลกุลหน่วยารูซี่ จากรูปที่ 4.9 ข้อมูลที่ได้ในแต่ละกลุ่มการทดลองที่ปริมาณรังสีเดียวกัน จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นกรดซัลฟูริกและระยะเวลาที่ทดสอบ และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลกับความเข้มข้นกรดซัลฟูริกในชุดการทดลองที่ปริมาณรังสีเดียวกันจะพบว่าค่าน้ำตาลเริ่มมีค่าสูงขึ้นที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1% และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 5%-10% จากนั้นจึงค่อยๆ มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น

จากการทดลองในหน่วยารูซี่ที่ฉายรังสี 300, 500 และ 1100 kGy พบว่า ในชุดการทดลองของหน่วยารูซี่ที่ฉายรังสี 1100 kGy จะให้ปริมาณน้ำตาลสูงกว่าในชุดการทดลองที่ฉายรังสี

300 และ 500 kGy ในทุกความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก จากรูปที่ 4.9 พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่มีค่าสูงสุด พบในหน่วยรังสีที่ฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 32.61 mg/ml (w/v) รองลงมาคือหน่วยรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้น้ำตาล 31.21 mg/ml และหน่วยรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 12% ได้น้ำตาล 30.02 mg/ml และในหน่วยรังสี 500 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ได้น้ำตาล 29.74 mg/ml คิดเป็น 58.37%, 55.86%, 53.73% และ 53.23% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ตามลำดับ

#### 4.2.2.3 สรุปผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหน่วยรังสีด้วยกรดซัลฟูริก

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดคือ ใช้หน่วยที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ในหน่วยที่ฉายรังสี 1100 kGy ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 32.61 mg/ml (w/v) ซึ่งคิดเป็น 58.37% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว พบว่า สภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด คือ ใช้หน่วยที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ทดลองที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 26.78 mg/ml ซึ่งคิดเป็น 49.93% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้า  
 รุชี่โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

กลุ่มการทดลอง	สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่อไปนี้				ปริมาณน้ำตาล (%) Conversion
	ขนาดหญ้า	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก	
หญ้าไม่ฉายรังสี	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	7%	49.93
หญ้าฉายรังสี 1100 kGy	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	10%	58.37

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการ  
 ย่อยสลายโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก มีค่าสูงกว่าการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว ซึ่ง  
 ปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 9% ดังนั้นการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต  
 น้ำตาลจึงควรพิจารณาถึงความเหมาะสมในทางปฏิบัติ ความคุ้มค่าในการวิจัย และต้นทุนในการ  
 ฉายรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่ได้รับว่าเหมาะสมคุ้มค่าหรือไม่



### 4.2.3 หล้าเนเปียร์ยักษ์

สำหรับผลการทดลองเบื้องต้นในหล้าเนเปียร์ยักษ์ แนวโน้มของความเหมาะสมทั้งขนาดของหล้าและอุณหภูมิในการย่อยเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษเบื้องต้นในหล้ากินนี่สีม่วง และหล้ารูซี่ โดยขนาดของหล้ารูซี่ที่เหมาะสมที่ได้คือ Particle Size 710  $\mu\text{m}$  และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยคือที่ 121°C ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 สภาวะเหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหล้าเนเปียร์ยักษ์ โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
ขนาดอนุภาคของหล้า (Sample Particle Size)	710 $\mu\text{m}$
อุณหภูมิในการย่อย (Reaction Temperature)	121°C
ระยะเวลา (Reaction Time)	10 นาที
ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ Concentration)	7%

#### 4.2.3.1 ผลการศึกษาเรื่องรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริก

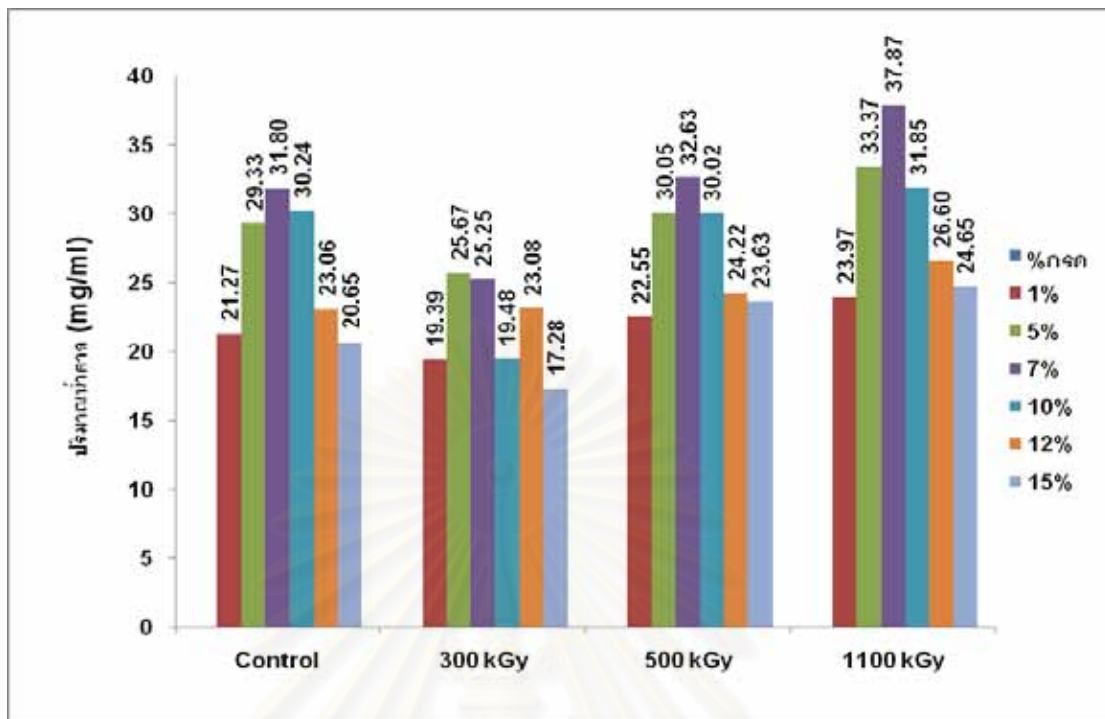
ผลการศึกษาที่ผ่านมาในหล้ากินนี่สีม่วงและหล้ารูซี่ เราได้นำสภาวะที่เหมาะสมจากหล้าทั้งสองชนิด เป็นแนวทางในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในหล้าเนเปียร์ยักษ์ โดยการทดลองนี้ทำการศึกษาเรื่องรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกไปพร้อมกัน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในเบื้องต้นจึงเลือกหล้าเนเปียร์ยักษ์ ที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ฉายรังสี 300 kGy, 500 kGy และ 1100 kGy มาย่อยด้วยกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหล้าเนเปียร์ยักษ์ให้เป็นน้ำตาล จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.15 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้าเนเปียร์ยักษ์ที่ฉายรังสี 300, 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้าเนเปียร์ยักษ์ ที่ปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)			
	0	300	500	1100
Control	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
1	21.27 $\pm$ 0.51	19.39 $\pm$ 0.17	22.55 $\pm$ 0.13	23.97 $\pm$ 0.34
5	29.33 $\pm$ 0.31	25.67 $\pm$ 0.13	30.05 $\pm$ 0.09	33.37 $\pm$ 0.20
7	31.80 $\pm$ 0.83	25.24 $\pm$ 0.22	32.63 $\pm$ 0.07	37.87 $\pm$ 0.18
10	30.24 $\pm$ 0.81	19.48 $\pm$ 0.12	30.02 $\pm$ 0.10	31.85 $\pm$ 0.35
12	23.06 $\pm$ 0.18	23.08 $\pm$ 0.40	24.22 $\pm$ 0.69	26.60 $\pm$ 0.15
15	20.65 $\pm$ 0.21	17.28 $\pm$ 0.21	23.63 $\pm$ 0.69	24.52 $\pm$ 0.04

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสโมเลกุลหญ้าเนเปียร์ยักษ์ที่ฉายรังสี 300, 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 5%, 7%, 10%, 12% และ 15% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

จากผลการศึกษาเรื่องรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกต่อสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ ผลปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้ในแต่ละชุดการทดลอง (Control, 300, 500 และ 1100 kGy) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นกรดซัลฟูริกและระยะเวลาที่ทดสอบ กล่าวคือ ปริมาณน้ำตาลจะเริ่มมีค่าสูงขึ้นที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 1% และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% จากนั้นจึงค่อยๆ ที่ค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.10

ปริมาณน้ำตาลที่มีค่าสูงสุด พบในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้ปริมาณน้ำตาล 37.87 mg/ml (w/v) รองลงมาในหญ้าเนเปียร์ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ได้น้ำตาล 33.37 mg/ml และในหญ้าเนเปียร์ 500 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้น้ำตาล 32.63 mg/ml และในหญ้าเนเปียร์ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ได้น้ำตาล 31.85 mg/ml คิดเป็น 74.15%, 65.34%, 63.89% และ 62.37% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ตามลำดับ

#### 4.2.3.3 สรุปผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ด้วยกรดซัลฟูริก

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดคือ ใช้หญ้าที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ในหญ้าที่ฉายรังสี 1100 kGy ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 37.87 mg/ml (w/v) ซึ่งคิดเป็น 74.15% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว พบว่า สภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด คือ ใช้หญ้าที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ทดลองที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 31.80 mg/ml ซึ่งคิดเป็น 62.27% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าเนเปียร์ยักษ์โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

กลุ่มการทดลอง	สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่อไปนี้				ปริมาณน้ำตาล (%) Conversion
	ขนาดหญ้า	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก	
หญ้าไม่ฉายรังสี	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	7%	62.27
หญ้าฉายรังสี 1100 kGy	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	7%	74.75

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก มีค่าสูงกว่าการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว ซึ่งปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 12% ดังนั้นการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตควรพิจารณาถึงความเหมาะสมในทางปฏิบัติ ความคุ้มค่าในการวิจัย และต้นทุนในการฉายรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่ได้รับว่าเหมาะสมหรือไม่

#### 4.2.4 หล้าแพนโกล่า

สำหรับผลการทดลองเบื้องต้นในหล้าเนเปียร์ยักษ์ แนวโน้มของความเหมาะสมทั้งขนาดของหล้าและอุณหภูมิในการย่อยเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันกับผลการศึกษาเบื้องต้นในหล้ากินนีสีม่วง และหล้ารัฐี โดยขนาดของหล้ารัฐีที่เหมาะสมที่ได้คือ Particle Size 710  $\mu\text{m}$  และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยคือที่ 121°C ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหล้าแพนโกล่า โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
ขนาดอนุภาคของหล้า (Sample Particle Size)	710 $\mu\text{m}$
อุณหภูมิในการย่อย (Reaction Temperature)	121°C
ระยะเวลา (Reaction Time)	10 นาที
ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ Concentration)	7%
ปริมาณรังสี (Radiation Dose)	500 kGy

##### 4.2.4.1 ผลการศึกษาเรื่องรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริก

ผลการศึกษาที่ผ่านมาในหล้ากินนีสีม่วง หล้ารัฐี และหล้าเนเปียร์ยักษ์ ได้สภาวะที่เหมาะสมจากหล้าทั้งสามชนิด มาใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในหล้าแพนโกล่า โดยการทดลองนี้จะศึกษาเรื่องรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกไปพร้อมกัน เนื่องจากที่ผ่านมา ปริมาณรังสีที่ 500 kGy และ 1100 kGy นั้น จะให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในทุกการทดลอง ทั้งยังพบว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จะลดลงเมื่อความเข้มข้นกรดซัลฟูริกสูงขึ้น ดังนั้นในการวิจัยในหล้าแพนโกล่า จึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมเบื้องต้น โดยใช้หล้าแพนโกล่าที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ฉายรังสี 500 kGy และ 1100 kGy มาย่อยด้วยกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้น 1%, 5%, 7% และ 10% (v/v) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลส

และเฮมิเซลลูโลสในหญ้า จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC ผลการศึกษาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.11

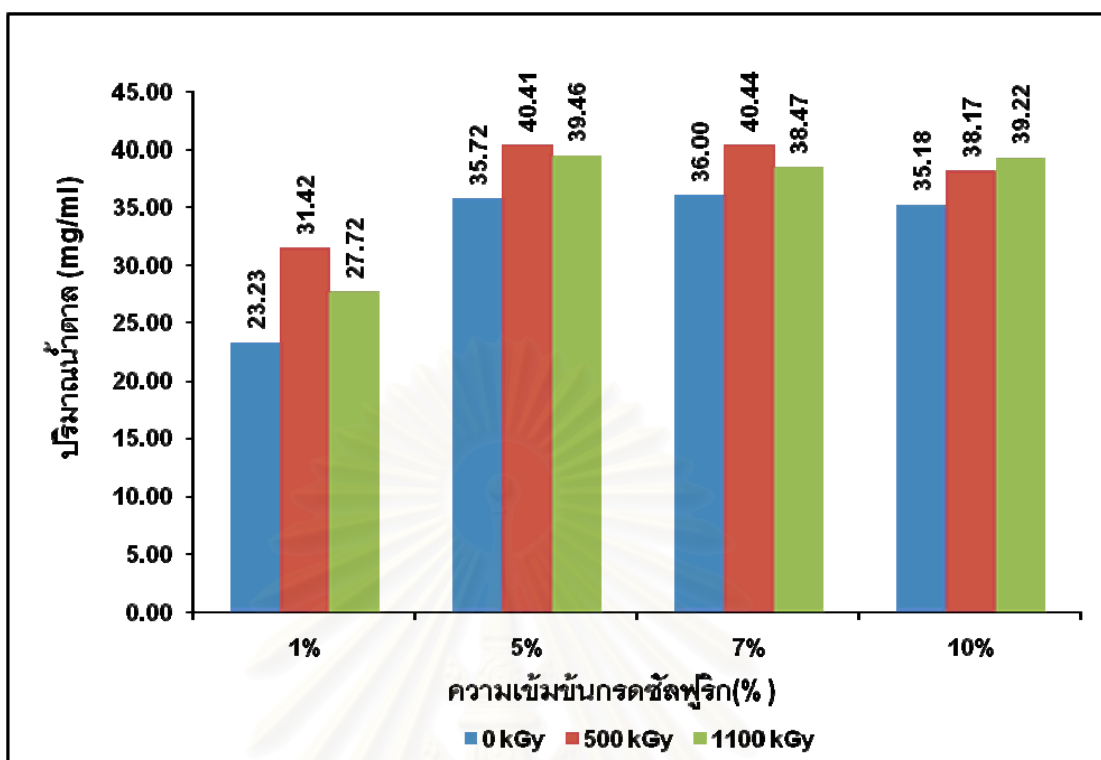
ตารางที่ 4.18 ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้าแพนโกล่าที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 3%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (%)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้าแพนโกล่า ที่ปริมาณรังสีต่างๆ (kGy) (mean $\pm$ standard error)		
	0	500	1100
Control	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
1	23.23 $\pm$ 0.04	31.42 $\pm$ 0.25	27.72 $\pm$ 0.24
5	35.78 $\pm$ 0.25	40.41 $\pm$ 0.15	39.46 $\pm$ 0.20
7	36.00 $\pm$ 0.19	40.57 $\pm$ 0.32	38.47 $\pm$ 0.15
10	35.17 $\pm$ 0.31	38.17 $\pm$ 0.13	39.22 $\pm$ 0.24

หมายเหตุ : ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $P < 0.05$ ) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.11 ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลหญ้าแพนโกล่าที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 1%, 3%, 5%, 7% และ 10% ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที

จากผลการศึกษาเรื่องรังสีแกมมาและความเข้มข้นกรดซัลฟูริกต่อสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าแพนโกล่าเมื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากเครื่อง HPLC ผลคือ ปริมาณน้ำตาลที่มีค่าสูงสุดพบในหญ้าแพนโกล่าที่ฉายรังสี 500 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% จะได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 40.57 mg/ml (w/v) รองลงมาในหญ้าฉายรังสี 500 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ได้น้ำตาล 40.41 mg/ml และในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ได้น้ำตาล 39.46 mg/ml และในหญ้าฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ได้น้ำตาล 39.22 mg/ml คิดเป็น 65.95%, 65.69%, 64.15% และ 63.76% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในตัวอย่างตามลำดับ

#### 4.2.2.4 สรุปผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลล์ไลส และเฮมิเซลล์ไลสในหญ้าแพนโกล่าด้วยกรดซัลฟูริก

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลล์ไลสและเฮมิเซลล์ไลสโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดคือ ใช้หญ้าที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ในหญ้าที่ฉายรังสี 500 kGy ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 40.57 mg/ml (w/v) ซึ่งคิดเป็น 65.95% ของปริมาณเซลล์ไลสและเฮมิเซลล์ไลสที่มีในตัวอย่าง

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลล์ไลสและเฮมิเซลล์ไลสโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว พบว่า สภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด คือ ใช้หญ้าที่มี Particle Size 710  $\mu\text{m}$  ทดลองที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ 36.00 mg/ml ซึ่งคิดเป็น 58.52% ของปริมาณเซลล์ไลสและเฮมิเซลล์ไลสที่มีในตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าแพนโกล่าโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

กลุ่มการทดลอง	สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่อไปนี้				ปริมาณน้ำตาล (%) Conversion
	ขนาดหญ้า	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก	
หญ้าไม่ฉายรังสี	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	7%	58.52
หญ้าฉายรังสี 500 kGy	710 $\mu\text{m}$	121°C	10 นาที	7%	65.95

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่ได้ พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก มีค่าสูงกว่าการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว ซึ่งปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 8% ดังนั้นการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตควรพิจารณาถึงความเหมาะสมในทางปฏิบัติ ความคุ้มค่าในการวิจัย และต้นทุนในการฉายรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่ได้รับว่าเหมาะสมหรือไม่

## สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยเรื่องการผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วง หญ้าธูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า สามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีแรกเป็นการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว และอีกวิธีเป็นการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก

ในหญ้า ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ โดยส่วนประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนสได้ โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมา มาช่วยในการย่อยสลายพันธะภายในโครงสร้างทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีขนาดเล็กลง

ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว คือ ใช้ขนาดอนุภาคของหญ้า 710  $\mu\text{m}$  ย่อยที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5-7% อัตราส่วนหญ้าต่อกรดซัลฟูริก 1:10 (w/v) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดสำหรับการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียวในหญ้ากินนีสีม่วงคือ ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ได้ปริมาณน้ำตาลคิดเป็น 46.45% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า, สำหรับหญ้าธูซี่คือ ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้ปริมาณน้ำตาล คิดเป็น 49.43% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า, สำหรับหญ้าเนเปียร์ยักษ์คือ ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้ปริมาณน้ำตาลคิดเป็น 62.27% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้าและสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดสำหรับหญ้าแพนโกล่าคือ ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้ปริมาณน้ำตาลคิดเป็น 58.52% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าโดยใช้การฉายรังสีแกมมา ร่วมกับกรดซัลฟูริกคือ ใช้ขนาดอนุภาคของหญ้า 710  $\mu\text{m}$  ย่อยที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5-10% อัตราส่วนหญ้าต่อกรดซัลฟูริก 1:10 (w/v) และ

ปริมาณรังสี 500-1100 kGy ผลการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดใน การย่อยสลายโมเลกุลสำหรับหญ้ากินนีสีม่วงคือ ฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 5% ได้ปริมาณน้ำตาลคิดเป็น 54.28% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า, สำหรับหญ้ารัฐคือ ฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 10% ได้ปริมาณน้ำตาลคิด เป็น 58.37% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า, สำหรับหญ้าเนเปียร์ยักษ์คือ ฉายรังสี 1100 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้ปริมาณน้ำตาลคิดเป็น 74.15% ของ ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า และสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด สำหรับหญ้าแพนโกล่าคือ ฉายรังสี 500 kGy ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 7% ได้ปริมาณน้ำตาล คิดเป็น 65.95% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีในหญ้า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 สภาวะเหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้า โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก

ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	สภาวะเหมาะสมที่ผลิตน้ำตาลได้สูงสุด	
	กรดซัลฟูริก	การฉายรังสีแกมมา ร่วมกับกรดซัลฟูริก
ขนาดอนุภาคของหญ้า (Sample Particle Size)	710 $\mu\text{m}$	710 $\mu\text{m}$
อุณหภูมิในการย่อย (Reaction Temperature)	121°C	121°C
ระยะเวลาในการย่อย (Reaction Time)	10 นาที	10 นาที
ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ Concentration)	5-7%	5-10%
ปริมาณรังสี (Radiation Dose)	-	500-1100 kGy

ตารางที่ 5.2 สภาวะเหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากีนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่าโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ชนิดของหญ้า	สภาวะเหมาะสมที่ผลิตน้ำตาลได้สูงสุด					ปริมาณน้ำตาล (% Conversion)
	ขนาดหญ้า	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก	ปริมาณรังสี	
กีนีสีม่วง	710 $\mu\text{m}$	121 $^{\circ}\text{C}$	10 นาที	5%	0 kGy	46.45
				5%	1100 kGY	54.28
รูซี่	710 $\mu\text{m}$	121 $^{\circ}\text{C}$	10 นาที	7%	0 kGy	49.43
				10%	1100 kGY	58.37
เนเปียร์ยักษ์	710 $\mu\text{m}$	121 $^{\circ}\text{C}$	10 นาที	7%	0 kGy	62.27
				7%	1100 kGY	74.15
แพนโกล่า	710 $\mu\text{m}$	121 $^{\circ}\text{C}$	10 นาที	7%	0 kGy	58.52
				7%	500 kGY	65.95

หมายเหตุ : ปริมาณน้ำตาลที่ได้คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักเทียบกับปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีหญ้าชนิดนั้นๆ (% Conversion ซึ่งคิดจากปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส)

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบกับการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าโดยใช้การฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก กับการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือสภาวะที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด พบว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายโดยใช้รังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก มีค่าสูงกว่าการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณน้ำตาลในหญ้ากีนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 8%, 9%, 12% และ 8% (w/v) ตามลำดับ

## 5.2 อภิปรายผลการทดลอง

### การหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้า

การวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้างินนี่สีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก จากผลการทดลองวิจัย สามารถอภิปรายได้ดังนี้

#### 5.2.1 ปริมาณเชื้อใย

ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีผลต่อปริมาณน้ำตาลที่ได้และมีผลต่อความยากง่ายในการย่อยสลายโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าด้วยเช่นกัน กล่าวคือ หญ้าที่มีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเยอะก็จะมีโอกาสถูกย่อยสลายจากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดหรือการย่อยสลายด้วยรังสีได้มากกว่า (Degradation) และสามารถผลิตน้ำตาลได้มากกว่าหญ้าที่มีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสน้อย แต่หากหญ้าชนิดนั้นมีปริมาณลิกนินมาก การย่อยสลายก็เกิดขึ้นได้ยากเช่นกัน เนื่องจากลิกนินเป็นโครงสร้างที่ย่อยได้ยากมาก

ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยโครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พบว่าน้ำตาลที่ได้จะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสเป็นโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดมาต่อกัน เมื่อถูกย่อยสลายด้วยรังสีหรือกรดจึงทำให้ได้ปริมาณและชนิดของน้ำตาลต่างกันไป แต่โดยมากเมื่อเฮมิเซลลูโลสถูกย่อย น้ำตาลที่ได้ส่วนใหญ่มักเป็นน้ำตาลไซโลสและอะราบิโนส สำหรับเซลลูโลสเมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลกลูโคส และจากการวิจัยพบว่าการฉายรังสีปริมาณสูงจะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณรังสีที่สูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสย่อยได้มากขึ้น

#### 5.2.2 ขนาดอนุภาคของหญ้าที่เหมาะสม

จากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคของหญ้าที่เหมาะสมในการนำมาผลิตน้ำตาลคือ หญ้าขนาด  $710 \mu\text{m}$  ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลสูงกว่าขนาดอนุภาค  $300 \mu\text{m}$  ที่เป็นเช่นนั้นสามารถอธิบายได้ว่าในหญ้าที่มีขนาดอนุภาค  $300 \mu\text{m}$  โดยส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างพวกใบหญ้า เนื่องจากเมื่อนำมาบดจะได้ขนาดที่เล็กกว่าส่วนที่เป็นลำต้น และเมื่อนำมาร่อนแยกขนาด ส่วนที่มีอนุภาคเล็กกว่าที่เป็นโครงสร้างพวกใบหญ้าจึงมักอยู่ในกลุ่มหญ้าที่มีขนาดอนุภาค  $300 \mu\text{m}$  และโครงสร้างพวกใบหญ้าจะมีปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าโครงสร้างในส่วนที่เป็น



ลำต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้หญ้าที่มีขนาดอนุภาค 300  $\mu\text{m}$  วัดปริมาณน้ำตาลได้น้อยกว่าหญ้าที่มีขนาดอนุภาค 710  $\mu\text{m}$  อย่างไรก็ตามจากการพิจารณางานวิจัยอื่น พบว่าขนาดอนุภาคของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสมในการนำมาย่อยด้วยเอนไซม์และให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดคือขนาด 590-350  $\mu\text{m}$  สำหรับขนาดที่เล็กกว่า 250  $\mu\text{m}$  ใหญ่กว่า 840  $\mu\text{m}$  หรือไม่แยกขนาด (Mixture) ก็สามารถนำมาย่อยให้เป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์ได้ โดยปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นขนาดของอนุภาคที่ใหญ่หรือเล็กกว่า 590  $\mu\text{m}$  นั้นไม่ใช่ข้อจำกัดในการย่อยแต่จะปรากฏผลความแตกต่างชัดเจนในขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 250  $\mu\text{m}$  ลงไป (Zhiyou et al., 2003) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องขนาดที่ว่าหญ้าที่มีขนาดอนุภาค 300  $\mu\text{m}$  และเล็กกว่า 300  $\mu\text{m}$  จะย่อยให้น้ำตาลได้น้อยกว่าหญ้าที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$

### 5.2.3 อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาจากการทดลองเรื่องอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าที่เหมาะสมในการนำมาผลิตน้ำตาล ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 100°C (ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ- Water bath) และทดลองที่อุณหภูมิ 121°C (ในหม้อแรงดันไอน้ำ- Autoclave ที่มีความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว) ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 121°C ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะเหมาะสมของการย่อยได้ในระยะเวลา 5 นาที ซึ่งเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 100°C ที่ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะเหมาะสมของการย่อยตั้งแต่ 30 นาที ขึ้นไป ดังนั้นในแง่ของการใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะเหมาะสม การย่อยที่อุณหภูมิ 121°C ใช้ระยะเวลาน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 100°C และเมื่อเปรียบเทียบจากองศาบริกที่ได้ พบว่าการย่อยที่อุณหภูมิ 121°C ก็มีค่าองศาบริกสูงกว่าการย่อยที่อุณหภูมิ 100°C เช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะการย่อยที่อุณหภูมิ 121°C นั้นมีความดันเป็นปัจจัยส่งเสริมช่วยในการย่อย จึงทำให้การย่อยเกิดขึ้นได้เร็วและดีกว่า และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดคือระยะเวลา 10 นาที เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสโดยใช้กรดซัลฟูริก คือย่อยที่อุณหภูมิ 135°C เป็นระยะเวลา 10 นาที ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสคิดเป็น 84% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดจะให้ผลดีกว่าเมื่อใช้ระยะเวลาสั้นๆ คือ 10-20 นาที ในการไฮโดรไลซ์ (Wei et al., 2005)

#### 5.2.4 การหาสภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด

เรื่องการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก เมื่อพิจารณาภายใต้สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน คือ ขนาดอนุภาคของหญ้าที่นำมาย่อยคือที่อุณหภูมิ 121°C เป็นระยะเวลา 10 นาที และย่อยที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริกเดียวกันในหญ้ากินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.3-5.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.3 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ากินนีสีม่วงโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ปริมาณรังสี	ปริมาณน้ำตาล (mg/ml)					ปริมาณน้ำตาล (% Conversion)
	Xylose	Arabinose	Fructose	Glucose	Total sugar	
0 kGy <sup>A</sup>	11.09	2.78	2.13	11.35	27.35	46.45
1100 kGy <sup>B</sup>	10.26	1.63	1.37	18.70	31.96	54.28

หมายเหตุ : A คือ การย่อยโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นกรด 5%

B คือ การย่อยโดยการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นกรด 5%

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้ารัฐโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ปริมาณรังสี	ปริมาณน้ำตาล (mg/ml)					ปริมาณน้ำตาล (% Conversion)
	Xylose	Arabinose	Fructose	Glucose	Total sugar	
0 kGy <sup>A</sup>	13.54	4.04	1.00	6.14	24.42	43.71
1100 kGy <sup>B</sup>	13.08	4.23	1.00	14.40	32.61	58.37

หมายเหตุ : A คือ การย่อยโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นกรด 10%

B คือ การย่อยโดยการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นกรด 10%

ตารางที่ 5.5 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ โดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

ปริมาณรังสี	ปริมาณน้ำตาล (mg/ml)					ปริมาณน้ำตาล (% Conversion)
	Xylose	Arabinose	Fructose	Glucose	Total sugar	
0 kGy <sup>A</sup>	14.31	6.82	1.53	9.41	31.80	62.27
1100 kGy <sup>B</sup>	13.73	5.34	1.82	16.27	37.87	74.15

หมายเหตุ : A คือ การย่อยโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นกรด 7%

B คือ การย่อยโดยการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นกรด 7%

ตารางที่ 5.6 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าแพนโกล่าโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก

ปริมาณรังสี	ปริมาณน้ำตาล (mg/ml)					ปริมาณน้ำตาล (% Conversion)
	Xylose	Arabinose	Fructose	Glucose	Total sugar	
0 kGy <sup>A</sup>	13.01	4.59	1.40	17.00	36.00	58.52
1100 kGy <sup>B</sup>	13.44	5.12	1.68	20.34	40.57	65.95

หมายเหตุ : A คือ การย่อยโดยใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นกรด 7%

B คือ การย่อยโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นกรด 7%

จากข้อมูลในตารางที่ 5.3-5.6 สภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสโดยใช้กรดซัลฟูริกและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกในหญ้ากินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพนโกล่า ตามลำดับ พบว่าการฉายรังสีปริมาณสูงขึ้นทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรวม (Total sugar) เพิ่มขึ้น เพราะปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลสถูกย่อยสลาย (Degradation) มากขึ้น

### 5.2.5 ปริมาณรังสีที่เหมาะสม

จากผลการวิจัยนี้พบว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จากหญ้าที่ฉายรังสี 300 kGy มีค่าน้อยกว่าในหญ้าที่ไม่ฉายรังสี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (E. Takacs et al., 2000) โดยงานวิจัยเรื่องนี้ ทำการทดลองโดยฉายรังสีในไผ่ตั้งแต่ 0-500 kGy ภายใต้สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน พบว่าไผ่ที่ฉายรังสีตั้งแต่ 250-300 kGy จะมีการย่อยโครงสร้างเซลลูโลสในไผ่เกิดขึ้นได้น้อยกว่าในไผ่ที่ไม่ฉายรังสี และพบว่าที่ปริมาณรังสีตั้งแต่ 500 kGy ขึ้นไปจะทำให้โครงสร้างเซลลูโลสในไผ่มีการย่อยสลายได้ดีที่สุด ซึ่งผู้วิจัยได้แนะนำว่าควรใช้ปริมาณรังสีตั้งแต่ 500 kGy ขึ้นไป ร่วมกับการ Pretreatment ด้วยต่างก่อนจึงจะทำให้โครงสร้างเซลลูโลสในไผ่มีการย่อยสลายได้ดีขึ้น และการฉายรังสีในช่วง 250-300 kGy พบว่าไผ่มีการย่อย

โครงสร้างเซลล์โลสได้น้อยกว่าในใยฝ้ายที่ไม่ฉายรังสี ซึ่งงานวิจัยในใยฝ้ายนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในหญ้าเช่นกัน

การฉายรังสีทำให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มสูงขึ้นในทุกตัวอย่างหญ้า โดยเฉพาะในหญ้ารัฐซี พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 เท่า จากการฉายรังสีที่ 1100 kGy ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 และจะเห็นได้จากการวิจัยว่าปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดที่ได้มีความคล้ายคลึง แตกต่าง มากน้อยต่างกันไปโดยขึ้นกับชนิดของหญ้า

เป็นที่ทราบกันว่าน้ำตาลแต่ละชนิดมาจากโครงสร้างภายในหญ้าที่ต่างกัน เมื่อย่อยสลายโครงสร้างเซลล์โลสจะได้น้ำตาลกลูโคส และเมื่อย่อยสลายโครงสร้างเฮมิเซลล์โลสจะได้น้ำตาลไซโลสและอะราบิโนสเป็นส่วนใหญ่ แต่หญ้าต่างชนิดกันย่อมมีโครงสร้างของเฮมิเซลล์โลสต่างกัน โดยโครงสร้างของเฮมิเซลล์โลสที่ต่างกันนี้ เกิดจากลักษณะกึ่งก้านของโมเลกุลน้ำตาลต่างชนิดกันมาต่อกัน เมื่อเกิดกระบวนการย่อยด้วยกรด หรือย่อยด้วยรังสีจึงทำให้การแตกกึ่งก้านภายในโครงสร้างเป็นแบบสุ่ม ดังนั้นน้ำตาลที่ได้จึงมีชนิดและปริมาณที่ต่างกัน หากต้องการน้ำตาลชนิดใดก็พิจารณาและศึกษาจากหญ้าชนิดนั้นๆ เพิ่มเติม เป็นต้น

จากงานวิจัยนี้ พบว่าปริมาณรังสีเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดคือที่ 1100 kGy (Technical) แต่เนื่องจากการฉายรังสีในปริมาณสูงจะเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต ดังนั้นการพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลจากหญ้า จึงควรพิจารณาในด้านปัจจัยการผลิตอื่นๆ ประกอบกัน ซึ่งจากข้อมูลการวิจัยได้แก่ ปริมาณของกรดซัลฟูริกที่เพิ่มขึ้น (5-10%) และในส่วนของต้นทุนการฉายรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้นว่ามีความคุ้มค่าและเหมาะสมหรือไม่กับปริมาณน้ำตาลที่ได้เพิ่มขึ้น (8-12%) จากการศึกษาด้วยวิธีการตามวิทยานิพนธ์นี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.2.5 ต้นทุนในการผลิต

หากพิจารณาต้นทุนในการผลิต โดยเปรียบเทียบการผลิตจากการใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว กับการย่อยโดยการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก โดยพิจารณาภายใต้สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ต้นทุนในการผลิตน้ำตาลจากกรดย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในหญ้าโดยใช้กรดซัลฟูริกเปรียบเทียบกับกรดยังรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก

รายการ	ราคาต่อหน่วย
ค่าหญ้าที่นำมาผลิตน้ำตาล	1.25 <sup>a</sup> บาท/กิโลกรัม
ค่ากรดซัลฟูริก	152.00 <sup>b</sup> บาท/ลิตร
ค่าฉายรังสีแกมมา	0.40 <sup>c</sup> บาท/กิโลเกรย์

หมายเหตุ : a คือ ราคาหญ้าแห้งจากกรมปศุสัตว์ เป็นราคาแห้งที่มีปริมาณโปรตีนต่ำกว่า 5%

b คือ ราคากรดซัลฟูริกของบริษัท Merck, Germany (A.R. Grade)

c คือ ราคาอ้างอิงจากบริษัท Sterigenics สำหรับค่าฉายรังสีในงานวิจัยนี้ซึ่งไม่ได้คิดตามราคาการผลิตในระดับอุตสาหกรรม (mass product)

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 5.7 หากต้องการคำนวณราคาต้นทุนในการผลิตน้ำตาล เปรียบเทียบ 2 วิธี คือ วิธีใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว และอีกวิธีคือการฉายรังสีแกมมาพร้อมกับกรดซัลฟูริก ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการผลิตน้ำตาลจากหญ้าเนเปียร์ยักษ์ เนื่องจากการผลิตน้ำตาลจากหญ้าเนเปียร์ยักษ์ ด้วย 2 วิธีการนี้ให้ปริมาณน้ำตาลต่างกันมากที่สุดถึง 12% เมื่อเทียบกับหญ้าชนิดอื่นๆ

การคำนวณอ้างอิงจากสภาวะเหมาะสมที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดในหญ้าเนเปียร์ยักษ์ คือ ใช้หญ้าที่มีขนาด 710  $\mu\text{m}$  ย่อยที่อุณหภูมิ 121°C ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก 7% โดยในขั้นต้นใช้หญ้าเนเปียร์ยักษ์ 1 กิโลกรัม



การผลิตน้ำตาลจากหญ้าเนเปียร์ยักษ์ โดยวิธีใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียว สำหรับหญ้าเนเปียร์ยักษ์ 1 กิโลกรัม ราคา 1.25 บาท ต้องใช้กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นกรด 7% ปริมาตร 10 ลิตร (ต้องใช้  $H_2SO_4$  Conc. ปริมาตร 713.70 ml) คิดเป็นเงิน 108.50 บาท จะสามารถผลิตน้ำตาลกลูโคส ไสโลส อะราบิโนส และฟรุคโตส ซึ่งคิดเป็น 62.27% ของปริมาณน้ำตาลที่มีทั้งหมดในหญ้า การผลิตน้ำตาลด้วยวิธีนี้คิดเป็นเงินทั้งหมด  $1.25 + 108.50 = 109.75$  บาท

การผลิตน้ำตาลจากหญ้าเนเปียร์ยักษ์ โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก สำหรับหญ้าเนเปียร์ยักษ์ 1 กิโลกรัม ราคา 1.25 บาท ต้องใช้กรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นกรด 7% ปริมาตร 10 ลิตร (ต้องใช้  $H_2SO_4$  Conc. ปริมาตร 713.70 ml) คิดเป็นเงิน 108.50 บาท คิดค่าฉายรังสีที่ 1100 kGy คิดเป็นเงิน 440 บาท ซึ่งสามารถผลิตน้ำตาลกลูโคส ไสโลส อะราบิโนส และฟรุคโตส ซึ่งคิดเป็น 74.15% ของปริมาณน้ำตาลที่มีทั้งหมดในหญ้า การผลิตน้ำตาลด้วยวิธีนี้คิดเป็นเงินทั้งหมด  $1.25 + 108.50 + 440 = 549.75$  บาท

จากการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธี พบว่าการผลิตน้ำตาลโดยวิธีใช้กรดซัลฟูริกเพียงอย่างเดียวมีราคาต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการผลิตน้ำตาลโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก ( $549.75 - 109.75 = 440$  บาท) แต่ได้ปริมาณน้ำตาลน้อยกว่า ( $74.15\% - 62.27\% = 11.88\%$ ) ซึ่งในส่วนที่แพงกว่านั้นเป็นค่าฉายรังสี

สำหรับต้นทุนการผลิตที่คำนวณได้นี้ อ้างอิงจากการวิจัยทั้งหมด ซึ่งในความเป็นจริงปริมาณน้ำตาลที่ได้ขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของหญ้า ปริมาณเยื่อที่มีในโครงสร้างของหญ้าก็มีผลเช่นกัน เช่นในหญ้าบางชนิดที่มีปริมาณลิกนินเยอะก็จะทำให้การย่อยเกิดขึ้นได้ยาก และเนื่องจากหญ้าที่มีอายุการเพาะปลูกมากจะมีปริมาณเยื่อ (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สามารถผลิตน้ำตาลได้มากขึ้นด้วยแต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาเลือกหญ้าที่มีปริมาณลิกนินน้อยๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิต

ดังนั้นการพิจารณาเลือกวิธีการใดมาผลิตน้ำตาลขึ้นกับความคุ้มค่าในการผลิต ทั้งค่าฉายรังสี ค่ากรดที่เพิ่มขึ้น วิธีการในการผลิต และชนิดของน้ำตาลที่ต้องการด้วย เนื่องจาก การฉายรังสีปริมาณสูงจะให้น้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับการไม่ฉายรังสี ดังนั้น การเลือกวิธีการใดมาใช้ขึ้นต้องขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการผลิตด้วยเช่นกัน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การขายรังสีในสภาพที่มีน้ำอยู่ในตัวอย่างจะทำให้การย่อยสลายโมเลกุลของหญ้าด้วยรังสีมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากน้ำแตกตัวให้อนุมูลอิสระ
2. การผลิตน้ำตาลโดยการขายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกจะคุ้มค่าก็ต่อเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้แล้วมาเป็นต้นกำเนิดสำหรับขายรังสี เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขายรังสีซึ่งจะทำให้ต้นทุนการขายรังสีต่ำมาก
3. สำหรับกรดซัลฟูริกที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำตาลควรใช้เป็น Comercial Grade ก็เพียงพอแล้ว เพื่อเป็นการลดต้นทุนราคากรดต่อหน่วยการผลิตน้ำตาลลงได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. ขวัญชนก จันทร์สว่าง. การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาร่วมกับไซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.
2. ชนิตา พงษ์ลิมานนท์. เคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 4. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2546
3. ชมพูนุช หาญนันท์วิวัฒน์. การผลิตน้ำตาลจากการย่อยสลายโมเลกุลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
4. ตีรพล เจาะจิตต์. การเลี้ยงโคนม. กรุงเทพมหานคร : เกษตรไทย, 2527.
5. ทิพา บุญยะวิโรจ และคณะ. 2533. ระดับปุ๋ยไนโตรเจนที่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตหญ้าเนเปียร์ หญ้าอมริซัส หญ้าเฮมิล และหญ้ารูซี่ ภายใต้ระบบการชลประทานในดินชุดราชบุรี. รายงานประจำปี 2533 ศูนย์วิจัยอาหารสัตว์ชยันนาท กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หน้า 126-135.
6. ธิติ เชี่ยวชาญวิทย์. บทควมลิกนิน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เทคโนโลยี ถ.เลียบคลองห้า ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 ประเทศไทย, 2544
7. มนตรี จุฬำวัฒนทล และคณะ. ชีวเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยมหิดล, 2542.
8. เมธา วรณพัฒน์. 2529. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 387.
9. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, คณะวิทยาศาสตร์. คู่มือปฏิบัติการชีวเคมีเบื้องต้น. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2546.
10. ระวีวรรณ แก้วกล้า. Ethanol production from rice straw. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค วิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1995.
11. วารุณี พานิชผล. การวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชอาหารสัตว์. กรุงเทพมหานคร : กลุ่มงานวิเคราะห์อาหารสัตว์ กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์, 2541.

12. วรพงษ์ สุริยจันทร์ทราทอง. 2529. ความหมายและความสำคัญของเยื่อใยในอาหารสัตว์ เอกสารประกอบคำสอนวิชาโภชนศาสตร์เคี้ยวเอื้อง ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 2-17.
13. ศุภชัย อุดชาชน. จะผลิตหญ้าเนเปียร์ยักษ์อย่างไรจึงได้ผลผลิตสูงและมีคุณภาพดี. ศูนย์วิจัยอาหารสัตว์ปากช่อง กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2545
14. A. Pessoa JR., I.M. Mancilha and S. Sato. Acid hydrolysis of hemicellulose from sugarcane bagasse. Chemical Engineering, 14 (1997) : 1-12
15. Abatzoglou, Nicolas, Chornet, Esteban. Acid hydrolysis of hemicellulose and cellulose: theory and application. Polysaccharides. 1007-1045. USA : Marcel Dekker, Inc., 1998
16. Abatzoglou, Nicolas, Chornet, Esteban. Polysaccharides 1998 , Marcel Dekker, Inc. , USA
17. Adenise Iorenci Woiciechowski, Saul Nitsche., และคณะ. Acid and enzymatic hydrolysis to recover reducing sugar from cassava bagasse: an Economic study, Biology and Technology, 45 (2002): 1-13
18. Aguilar, R., และคณะ. Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse. Journal of Engineering 55 (2002):309-318
19. B.C. Gransin and G. McL. Dryden. Effect of alkalis, oxidants and urea on the nutritive value of rhodes grass (Chloris gayana cv. Callide). Animal Feed Science and Technology, 103 (2002) :113-122
20. B.P. Lavarack, G.J. Griffin and D.Rodman. The acid hydrolysis of sugarcane bagasse hemicellulose to produce xylose, arabinose, glucose and other products. Biomass and Bioenergy, 23 (2002) : 367-380
21. Chaptin, M.F., and Kennedy, J.F. Carbohydrate analysis and Analytical, 1987
22. Dela Rosa, A.M., และคณะ. Radiation pretreatment of cellulose for energy production. Radiation Physics and Chemistry 22 (1983) :861-867
23. E. Takacs, L. Wojnarovits, Cs. Foldvary, P. Hargittai, J. Borsa and I. Sajo. Effect of combined gamma-irradiation and alkali treatment on cotton-cellulose. Radiation Physics and Chemistry, 57 (2000) : 399-403

24. E. Takacs, L. Wojnarovits, J. Borsa, Cs. Foldvary and P. Hargittai. Effect of gamma-irradiation on cotton-cellulose. Radiation Physics and Chemistry, 67 (1999) : 505-508
25. Lehniger, A.L. Biochemistry. 2nd ed., New York : Worth Publisher, 1975
26. M.R. Al-Masri and M. Zarkawi. Effect of gamma irradiation on chemical. Radiation Physics and Chemistry, 6 (1994) : 712-722
27. 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
28. Neureiter, M., Danner, H., Thornasser, C., and Braun, R. <sup>๑</sup>ของ Dilute acid hydrolysis of softwood chips for the production of hemicellulose sugars.  
<http://bioproducts-bioenergy.gov/pdfs/bcota/abstracts/12/z386.pdf>
29. 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
30. Sang Heum Shin และ คณะ. Dilute-Acid Hydrolysis of Hemicellulose from Agricultural Renewable Biomass.  
<http://www.nrel.gov/biotechsypm25/docs/abst6a-17.doc>.
31. 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](http://www.hud.ac.uk/schools/applied_sciences/research/bmsrc/sinnott.htm)
32. Spinks, J.W.T. and Woods, R.J. An introduction to radiation chemistry. 3rd ed., New York : John Weiley & Sons, Inc., 1990
33. Wei Liao, Yan Liu, Chuanbin Liu, Zhiyou Wen and Shulin Chen. Acid hydrolysis of fiber from daily manure. Bioresource Technology, 97 (2006) : 31-39
34. Zhiyou Wen, Wei Liao and Shulin Chen. Hydrolysis of manure lignocellulosics for reducing sugar production. Bioresource Technology, 91 (2003) : 31-39



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van Soest (12)

### สารละลาย Neutral Detergent Fiber (NDF)

#### สารเคมีที่ใช้

1. โซเดียมมอลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate, USP.)
2. ไดโซเดียมเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซีเตท (E.D.T.A) ไดไฮเดรต (cryatal, reagent grade)
3. โซเดียมบอเรต ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , reagent grade)
4. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , anhydrous, reagent grade)
5. 2-เอทอกซีเอทานอล (2-Ethoxyethanol, purified grade)
6. น้ำกลั่น

#### วิธีเตรียมสารเคมี (สำหรับสารละลาย NDF 1000 ml)

1. ชั่งสาร E.D.T.A 18.61 g และ  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  6.81 g ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 ml
2. เติมน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$ - $100^\circ\text{C}$  ปริมาตร 250 ml ลงในบีกเกอร์ คนให้ทั่วจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ถ้าสารไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันให้ใช้ความร้อนช่วย
3. เตรียมสารละลายโซเดียมมอลอริลซัลเฟต 30 g และ 2-เอทอกซีเอทานอล 10 ml มาผสมกันในบีกเกอร์ขนาด 500 ml ชั่งสาร  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  4.56 g ใส่ลงไปบีกเกอร์
4. เติมน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$ - $100^\circ\text{C}$  ปริมาตร 250 ml ลงในบีกเกอร์ในข้อ 3. คนให้ทั่วจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ถ้าสารไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันให้ใช้ความร้อนช่วย
5. นำสารละลายที่เตรียมไว้ใน ข้อ 1. และข้อ 2. มาผสมกัน
6. คนให้ทั่วจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
7. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

## การวิเคราะห์หาปริมาณ NDF

1. นำ Crucible ที่ล้างสะอาดแล้วไปอบในตู้อบแห้ง(oven) ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 1 ชั่วโมง นำ Crucible ออกจากตู้อบแล้วใส่ในโถอบแห้ง (Desiccators) ทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างหญ้าที่ต้องการวิเคราะห์ 1 g ใส่ในบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 600 ml สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเยื่อใย
3. เติมสารละลาย Neutral detergent 100 ml และ Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> ปริมาณ 0.5 g ลงในบีกเกอร์
4. นำสารละลายในข้อ 3. มาให้ความร้อนโดยวางบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 100°C จนกระทั่งสารละลายเดือด จับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือดแล้วทำการย่อยต่อไปอีก 60 นาที
5. นำบีกเกอร์ออกจาก Hot plate กรองเก็บตัวอย่างโดยใช้ผ้าขาวบาง แล้วล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ให้หมดโดยใช้น้ำร้อน (90°C-100°C) จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน ปริมาณ 1200 ml ถ่ายตะกอนลงใน Crucible ที่วางบนขวดกรอง
6. แช่ตะกอนด้วยอะซีโตนประมาณ 30 นาที กรองอะซีโตนออก ล้างตะกอนด้วยอะซีโตน จนกระทั่งสารละลายที่เหลือออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C นาน 6 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ออกมาใส่ในโถอบแห้ง ทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักของ Crucible คือ ปริมาณของ NDF

## วิธีคำนวณ

$$\% \text{ NDF} = \frac{[(\text{น.น. Crucible \& น.น.เยื่อใย}) - \text{น.น. Crucible}] \times 100}{\text{น.น. ตัวอย่าง}}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารละลาย Acid Detergent Fiber (ADF)

### สารเคมีที่ใช้

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc.  $H_2SO_4$ , A.R., percent assay เท่ากับ 100)
2. ซิลติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethyl ammoniumbromide)

### วิธีเตรียมสารเคมี (สำหรับสารละลาย ADF 1000 ml)

1. นำกรดซัลฟูริกปริมาตร 27 ml ใส่ในขวด Volumetric flask ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่น อยู่พอประมาณ ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ให้เย็น
2. เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
3. เติมซิลติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 20 g เขย่าให้เข้ากัน

### การวิเคราะห์ปริมาณ ADF

1. นำ Crucible ออบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}C$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาใส่ในโถอบแห้ง (Desiccators) ทิ้งให้เย็นแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
2. นำตะกอนที่ได้จากการหา NDF ถ่ายใส่บีกเกอร์ทรงสูงขนาด 600 ml เติมสารละลาย ADF 100 ml ลงไปแล้วนำไปต้มจนเดือด จับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือดแล้วหยุดต่ออีก 60 นาที
3. กรองตัวอย่างด้วยผ้ากรองใยแก้วขนาด  $40-60 \mu m$  ล้างตะกอนและตัวอย่างที่ติดในบีกเกอร์ให้หมดด้วยน้ำร้อน ( $90^{\circ}C-100^{\circ}C$ ) ปริมาตร 1200 ml ถ่ายตะกอนลง Crucible ที่วางบนขวดกรอง เช้ตะกอนด้วยอะซิโตนประมาณ 30 นาที กรองอะซิโตนออก ล้างตะกอนด้วยอะซิโตนอีกครั้งจนกระทั่งสารละลายที่เหลือออกจาก Crucible ไม่มีสี
4. นำ Crucible ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}C$  นาน 6 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
5. นำ Crucible ออกมาใส่ในโถอบแห้ง ทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักของ Crucible คือ ปริมาณ ADF

### วิธีคำนวณ

$$\% \text{ ADF} = [(\text{น.น. Crucible \& น.น.เยื่อใย}) - \text{น.น. Crucible}] \times 100 / \text{น.น. ตัวอย่าง}$$

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

## สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 % (ADL)

### สารเคมีที่ใช้

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น ( $H_2SO_4$ )
2. น้ำกลั่น

### วิธีเตรียมสารเคมี (สำหรับสารละลาย ADL 1000 ml)

เตรียมน้ำกลั่น 440 ml ในบีกเกอร์ที่มีปริมาตร 1 ลิตร นำกรดซัลฟูริก 560 ml ที่เตรียมไว้ค่อยๆ รินลงในบีกเกอร์น้ำกลั่นที่เตรียมไว้ ใช้แท่งแก้วค่อยๆ คนให้เข้ากัน ตั้งบีกเกอร์ไว้ในน้ำที่เย็น เติมกรดซัลฟูริกจนหมด วัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายให้ได้เท่ากับ 1.634

### การวิเคราะห์หาปริมาณ Lignin

1. นำ Crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา ADF เรียบร้อยแล้ววางในภาชนะที่มีน้ำกลั่นอยู่ระวังอย่าให้เยื่อใยใน Crucible เปียกน้ำ
2. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72 % ลงไปประมาณครึ่ง Crucible ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่วเพื่อให้เยื่อใยแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน คอยเติมกรดเมื่อกรดแห้งและต้องคนบ่อยๆ
3. ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง กรองกรดออก แล้วล้างด้วยน้ำร้อน ( $90^{\circ}C-100^{\circ}C$ ) ประมาณ 1200 ml หรือจนกว่าจะหมดกรด
4. นำ Crucible ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}C$  นาน 8 ชั่วโมง เอาออกใส่โถอบแห้ง ปล่อยให้เย็น นำมาชั่งน้ำหนัก
5. นำ Crucible ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำ Crucible ออกใส่โถอบแห้ง ทิ้งไว้ให้เย็น นำไปชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่หายไป คือ ปริมาณลิกนิน

### วิธีคำนวณ

% ลิกนิน =  $(\text{น.น. เยื่อใยหลังการอบ} - \text{น.น. เยื่อใยหลังการเผา}) \times 100 / \text{น.น. ตัวอย่าง}$

% Cellulose =  $(\text{น.น. ADF} - \text{น.น. เยื่อใยหลังย่อยด้วยกรดและอบแห้ง}) \times 100 / \text{น.น. ตัวอย่าง}$



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## การวิเคราะห์น้ำตาลด้วย High performance Liquid Chromatography (HPLC)

High performance Liquid Chromatography (HPLC) หรือโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาสารเคมีจากตัวอย่าง สามารถแยกสารเคมีภายใต้ความดันของของเหลว เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารเชิงคุณภาพวิเคราะห์ (qualitative analysis) และปริมาณวิเคราะห์ (quantitative analysis) ที่นิยมใช้มากวิธีหนึ่ง โดยสามารถใช้กับงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ในการวิเคราะห์ทางอาหาร ยา ทางด้านการแพทย์ สมุนไพร และทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น สามารถตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างในปริมาณต่างๆ ได้ในระดับไมโครกรัม ( $\mu\text{g}$ ) ถึงระดับพิโคกรัม ( $\text{pg}$ ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้เครื่องตรวจวัดที่เหมาะสม

ในหลักการของ HPLC จะทำหน้าที่แยกสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ออกเป็นสารเคมีอิสระเพื่อที่จะได้ทราบถึงชนิด และปริมาณขององค์ประกอบ โดย HPLC เป็นเทคนิคแยกสารผสมแบบใช้เครื่องสูบล้างแรงดันสูง (High pressure pump) สูบล้างทำละลายซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) พาสารตัวอย่างที่ถูกฉีดเข้าทางช่องฉีดสาร (injector) ผ่านอนุภาคที่เป็นเฟสอยู่กับที่ (stationary phase) ซึ่งบรรจุอยู่ในคอลัมน์ (column) สารผสมตัวอย่างจะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และถูกแยกออกมา ผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจวัด (detector) ในเวลาที่ต่างกัน สัญญาณที่วัดได้จะอยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้าตามเวลาและปริมาณของสารแต่ละตัวที่ตรวจวัดได้ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณ เพื่อแสดงผลออกมาเป็นโครมาโทแกรม (chromatogram)

### ส่วนประกอบที่สำคัญของ HPLC มีดังต่อไปนี้

#### Mobile phase reservoir

- เป็นภาชนะใช้บรรจุ mobile phase

#### Degasser

- เป็นอุปกรณ์ในการกำจัดฟองอากาศในสารละลาย

#### Pump

- เนื่องจากในการแยกสารผสมในเทคนิค HPLC จะอาศัยหลักการไหลของเฟสเคลื่อนที่ผ่านเฟสอยู่กับที่ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กมาก จึงทำให้เกิดความต้านทานการไหลระบบปั๊มจึงมีความสำคัญมากในการที่จะทำให้เกิดความดันสูงเพื่อที่จะเอาชนะแรงต้านทาน

### Sample injection

- เป็นอุปกรณ์ในการฉีดสารตัวอย่างมีทั้งแบบ manual และแบบ automatic sampler

### Column มี 2 ชนิดคือ

1. Analytical column มีความยาวประมาณ 10-30 cm เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 4-10 mm วัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุ เช่น stainless steel polyethylene สำหรับส่วนที่เป็น packing material ที่บรรจุอยู่ภายใน ได้แก่ silica based resins gels bonded phases เป็นต้น

2. Guard column ต่อระหว่างส่วน injector และส่วนของ analytical column ซึ่งจะทำหน้าที่กรองอนุภาคหรือสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนมากับสารตัวอย่างรวมทั้ง ตัวทำละลาย เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของ analytical column

### Detector

เครื่องตรวจวัดสัญญาณสำหรับ HPLC ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

Refractive index detectors (RI detector): ใช้วัดปริมาณสารใดก็ได้ที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากเฟสเคลื่อนที่ นั่นคือจะเกิดความแตกต่างกันระหว่าง reference cell (มีเฟสเคลื่อนที่ไหลผ่าน) และ sample cell (มีสารที่เราสนใจ) ภายใน detector จึงทำให้ได้ค่าดัชนีหักเหที่ต่างกัน จึงตรวจวัดสัญญาณได้

### วิธีการหาปริมาณของสารประกอบโดยใช้ HPLC

เป็นกระบวนการเปรียบเทียบสารประกอบที่ไม่ทราบความเข้มข้นกับสารละลายที่ทราบความเข้มข้น มีวิธีทำคือ

1. ฉีดชุดของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่เตรียมไว้เข้าไปใน HPLC เพื่อทำการตรวจวิเคราะห์ โดย Chromatograph จะแสดงพีคของชุดข้อมูลที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายที่ฉีดเข้าไป
2. หาพื้นที่ใต้กราฟ (Area) ของชุดของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่ฉีดไปในข้อ 1 และนำข้อมูลที่ได้มาทำเป็น calibration curve โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เราทราบค่า

3. ทำการฉีดชุดของสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์หาชนิดและความเข้มข้นของน้ำตาลในตัวอย่างเข้าไปใน HPLC เพื่อทำการตรวจสอบหาพื้นที่ใต้กราฟ (Area) ของน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส

ตารางที่ ข.1 พื้นที่ใต้กราฟของน้ำตาลกลูโคส 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

4. คำนวณหาปริมาณน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส จากสมการดังนี้

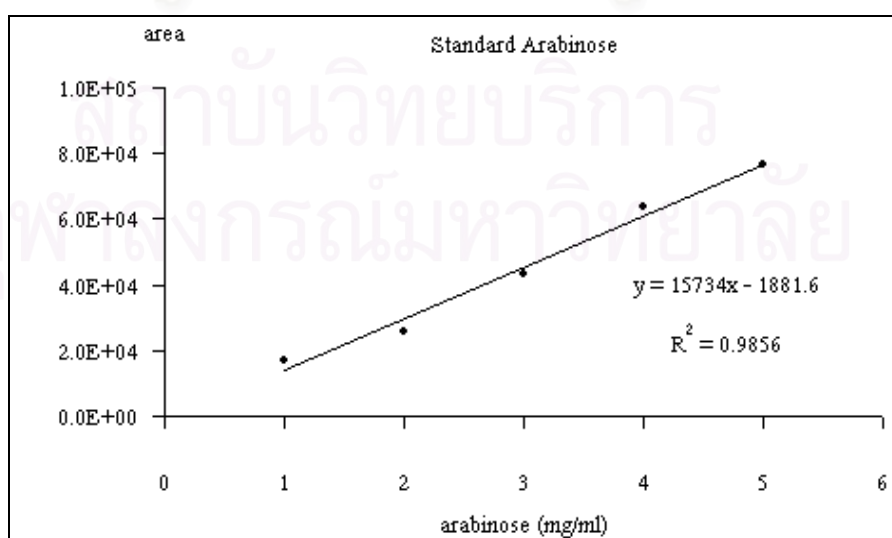
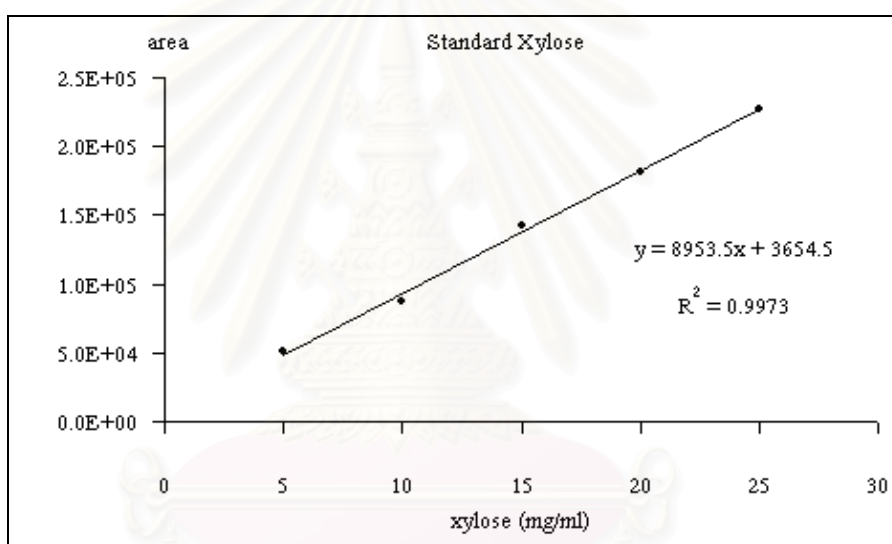
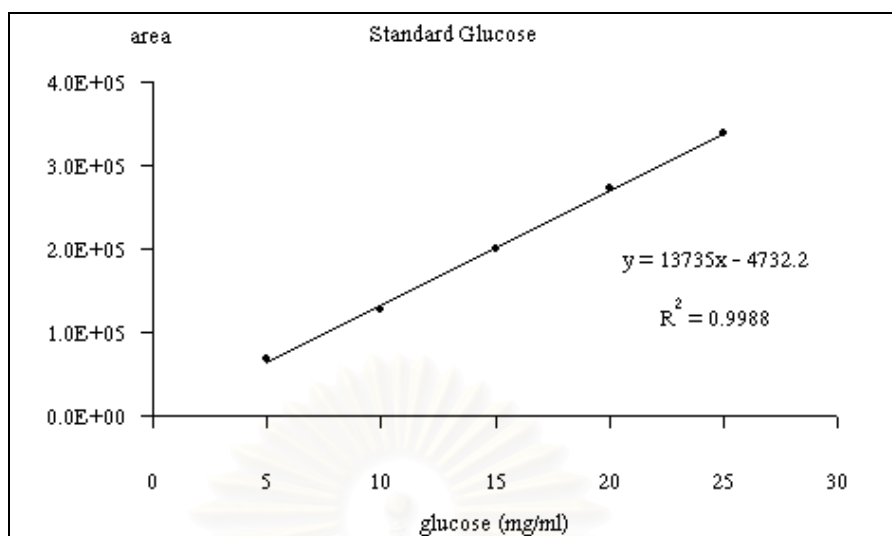
สมการของน้ำตาลกลูโคส คือ  $y = 13735x - 4732.2$

สมการของน้ำตาลไซโลส คือ  $y = 8953.5x + 3654.5$

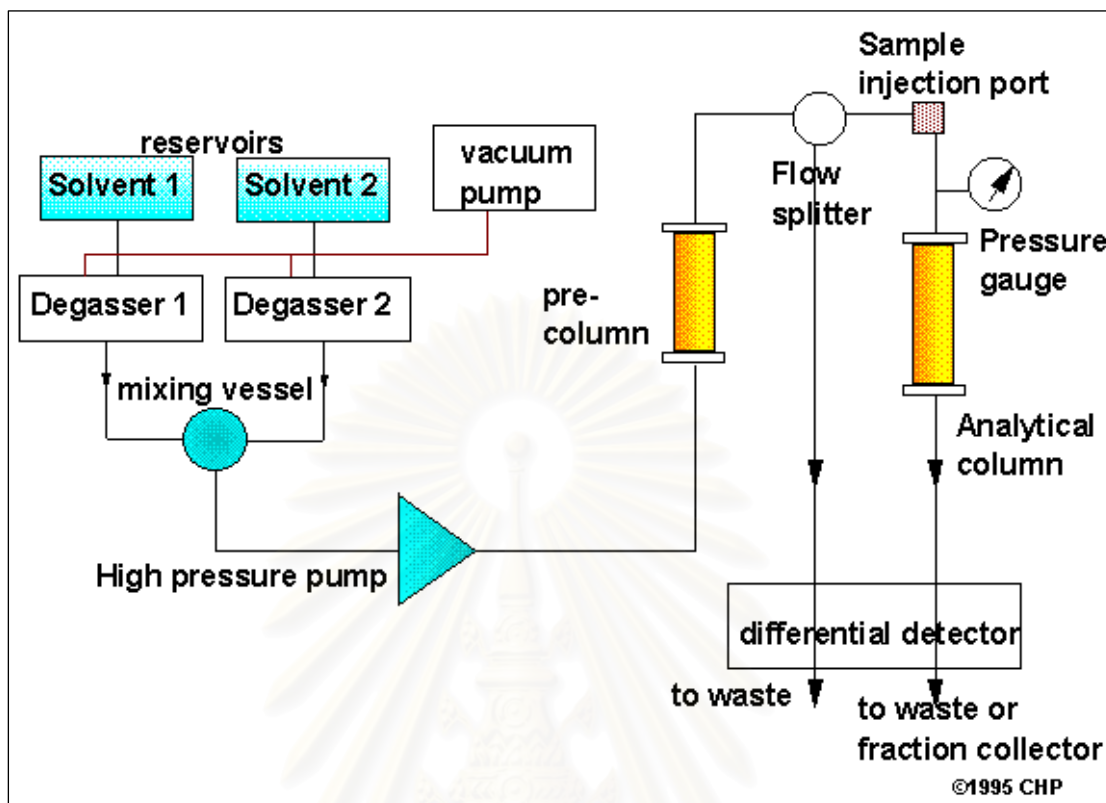
สมการของน้ำตาลอะราบิโนส คือ  $y = 15734x - 1881.6$

โดย  $y$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของน้ำตาลชนิดนั้นๆ  
 $x$  คือ ปริมาณน้ำตาล

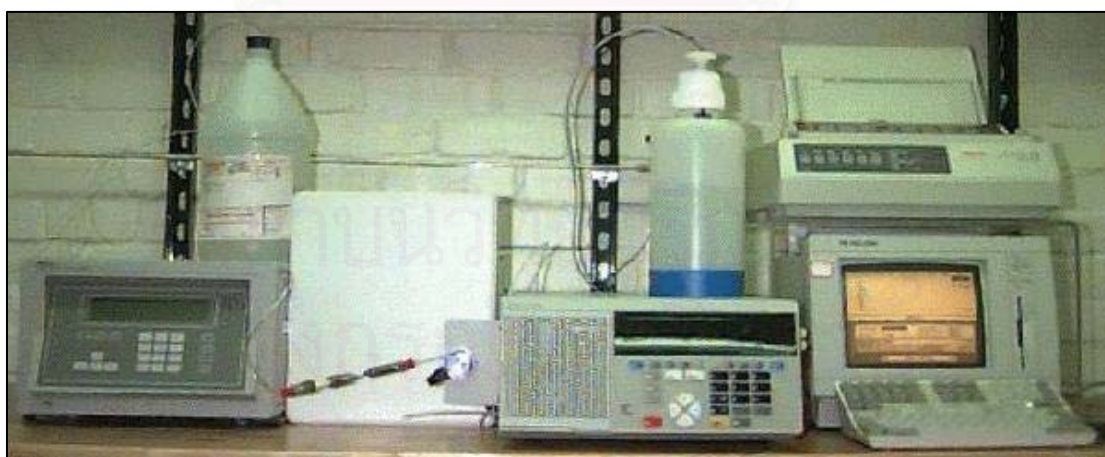
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้กราฟกับปริมาณสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ๑.๒ แผนภาพการทำงานของเครื่อง High performance Liquid Chromatography (HPLC)



รูปที่ ๑.๓ ชุดอุปกรณ์ของเครื่อง High performance Liquid Chromatography (HPLC)



ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## การวิเคราะห์น้ำตาลด้วย Brix Refractometer

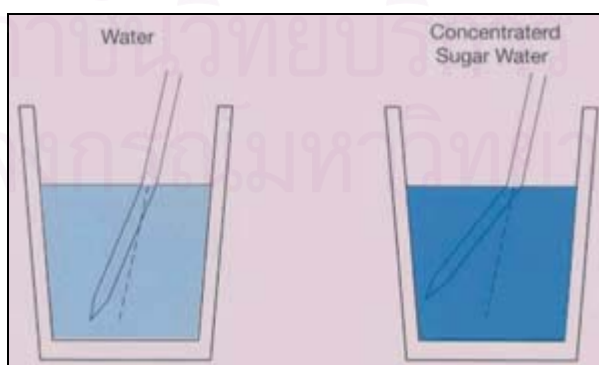
Brix Refractometer หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการหักเหของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง เช่น จากอากาศสู่น้ำ จากน้ำสู่คริสตัล (crystal) โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดความต่างของตัวแปรที่มีผล เช่น มุม ความเร็ว หรือดัชนีหักเหของแสงของตัวกลาง เป็นต้น

### การหักเหของแสง ( Refraction)

เมื่อนำหลอดๆ หนึ่งจุ่มลงในแก้วน้ำที่มีน้ำอยู่ จะสังเกตเห็นการโค้งงอของหลอด และถ้า น้ำที่มีอยู่ในแก้วมีน้ำตาลละลายอยู่ หลอดก็จะโค้งงอมากขึ้น (อธิบายดังรูปที่ ค.1) ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การหักเหของแสง (Refraction) Refractometer คือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการหักเหของแสงนี้ โดยหลักการการทำงานของ refractometer จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสาร (เช่นการละลายของน้ำตาลในน้ำ) และจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น (เราจะสังเกตเห็นการโค้งงอของหลอดมากขึ้น) refractometer ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาโดย Dr. Ernst Abbe นักวิทยาศาสตร์ เยอรมัน/ออสเตรีย ในต้นศตวรรษที่ 20

### หลักการของ refractometer

การตรวจสอบค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) สามารถทำได้ 2 ระบบ คือ ระบบการส่องผ่านของแสง (transparent system) และ ระบบการสะท้อนของแสง (reflection system) โดย refractometer ที่ใช้ระบบของการสะท้อนของแสง คือ Hand-held Refractometer และ Abbe Refractometer ส่วน refractometer ที่ใช้ระบบของการส่องผ่าน คือ digital refractometer



รูปที่ ค.1 ปรากฏการณ์การหักเหของแสง

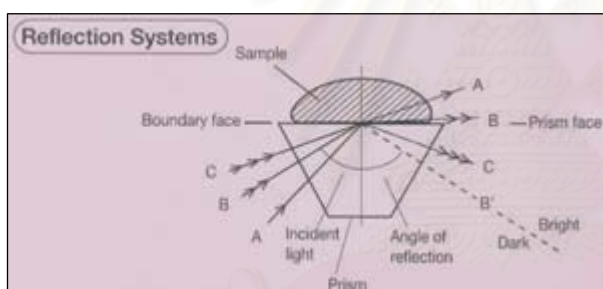
### ระบบการส่องผ่าน

ระบบการตรวจสอบสำหรับ Hand-held Refractometer สรุปได้ดังนี้

- ในรูปด้านล่าง การตรวจสอบจะใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์หักเหของแสงบนรอยต่อระหว่างปริซึม และสารละลายตัวอย่าง โดยที่ดัชนีหักเหของปริซึมมากกว่าของสารละลายตัวอย่าง
- ถ้าตัวอย่างเจือจาง จะทำให้มุมของการหักเหกว้าง (ตำแหน่ง "a" รูปที่ ค.2) เนื่องจากมีความต่างของดัชนีหักเหของแสงระหว่างปริซึมกับสารละลายตัวอย่าง มาก แต่ในทางตรงกันข้าม
- ถ้าตัวอย่างเข้มข้น มุมของการหักเหจะแคบ (ตำแหน่ง "b" รูปที่ ค.2)

### ระบบการสะท้อน

ระบบการตรวจสอบสำหรับ Digital refractometer สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ ค.2 การหักเหของแสงผ่าน Refractometer



รูปที่ ค.3 เครื่องวัดความหวาน Brix Refractometer ที่ใช้ในงานวิจัย

ในรูปที่ 3 แสง A ที่ตกกระทบทางด้านล่างซ้ายของปริซึมจะไม่สะท้อนกลับบริเวณรอยต่อ แต่จะทะลุผ่านสารละลายตัวอย่าง แสง B จะสะท้อนตามรอยต่อและขนานกับพื้นผิวสัมผัสไปทางด้านขวา และแสง C มีมุมตกกระทบที่มากกว่าที่จะทะลุผ่านสารละลายตัวอย่างไปได้หรือก็คือมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤตจึงทำให้แสงที่ตกกระทบสะท้อนกลับหมดในทางด้านขวา

ผลที่ได้บริเวณรอยต่อที่ให้ทั้งส่วนมืดและส่วนสว่างบริเวณที่เป็นรอยปะ (เส้น B) ในรูปมุมของการสะท้อนบริเวณเส้นรอยต่อจะเป็นอัตราส่วนกับดัชนีหักเหของแสง ตำแหน่งของเส้นรอยต่อระหว่างส่วนมืดกับส่วนสว่างจะถูกตรวจจับโดย sensor และถูกเปลี่ยนไปเป็นค่าดัชนีหักเหของแสง

## % Brix scale

ค่าของ Brix (%) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลายน้ำ (water solution) ปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ทั้งหมด (soluble solid) คือผลรวมของของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด เช่น น้ำตาล เกลือ โปรตีน กรด เป็นต้น และค่าที่อ่านได้จะออกมาในรูปแบบผลรวมของปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total soluble solid) โดยพื้นฐานแล้ว % Brix จะทำการสอบเทียบ (calibration) กับสารละลายน้ำตาลอ้อย (cane sugar solution) 100 กรัม ดังนั้นเมื่อมีการวัดสารละลายน้ำตาล ค่า % Brix ที่ได้จะเป็นความเข้มข้นของน้ำตาลที่แท้จริงสำหรับสารละลายอื่นๆ ที่มีหลายองค์ประกอบ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเทียบกลับเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่แท้จริง แต่สำหรับ refractometer ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต้องทำการสอบเทียบโดยใช้ Deionized water เท่านั้น

## การประยุกต์ใช้งานของ Refractometer

เมื่อวัดความเข้มข้นของน้ำตาลในผลไม้ มีการนำ refractometer ไปใช้ประโยชน์ดังนี้

- การกำหนดเวลาในการเก็บเกี่ยวได้อย่างถูกต้อง
- การแยกกลุ่มและแบ่งเกรดของผลไม้ก่อนการขนส่งต่อไป
- ใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลเป็นดัชนีชี้ค่าสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และสถานะของการเจริญเติบโต

เมื่อวัดความเข้มข้นของสารละลายทางเคมีหรือทางอุตสาหกรรม เช่น สารละลายจากการคัดแยกน้ำมัน สารละลายน้ำยาล้าง แอลกอฮอล์ เป็นต้น Hand-held refractometer เหล่านี้ จะวัดเป็นค่า % Brix ในรูปดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) และถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของแสงและเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นจะขึ้นกับชนิดของสารละลาย ดังนั้น Hand-held refractometer เหล่านี้ จำเป็นที่จะต้องสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่าง % Brix และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นก่อนทำการตรวจวัด

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุภัทร ภัทรกิจโสภณ เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2525 สถานที่เกิด สุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปี พ.ศ.2547 แล้วเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรประกาศนียบัตรบัณฑิต (วิชาชีพครูวิทยาศาสตร์) ภาควิชาการศึกษา สาขาการสอนวิทยาศาสตร์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2548 แล้วเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย