การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลไซโลส กลูโคส และอราบิโนส จากฟางข้าวและชานอ้อย เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอล

Efficiency improvement on glucose xylose and arabinose sugar production as ethanol precursor from rice straw and sugar cane bagasse

โดย

ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล วศ.ม. (จุฬา)

วีระชัย บัญชรเทวกุล D.Eng. (Nagoya University)

ชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์ วท.ม. (จุฬา)

โครงการวิจัยเลขที่ 93G-NT-2550

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพ ฯ

มิถุนายน 2551

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2550 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณ รศ.น.สพ.สมชาย จันทร์ผ่องแสง หัวหน้าภาควิชาสัตวบาล คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องบดตัวอย่าง บริษัทมิตรผลวิจัยที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกากอ้อย รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว และ ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณกวีพร จันทน์ขาว ที่กรุณาติดต่อและประสานงานในเรื่องการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มเกษตรกร

เลขหมู่
เลขทะเบียน 013954
วัน, เดือน, ปี 15 ธ.ค. 51

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลไซโลส กลูโคส และอราบิโนส จากฟางข้าวและชานอ้อย ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวและชานอ้อยพบว่า เมื่อใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นเพียงอย่างเดียว เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับฟางข้าวคือการไฮโดรไลซ์ด้วย กรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 20 นาที โดยให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 44.84 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 59.56% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง ส่วนเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับชานอ้อยคือการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 10 นาที ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 53.00 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 68.60% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง เมื่อใช้รังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจางพบว่า เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับฟางข้าวคือการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ก่อนไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2% ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จากนั้นไฮโดรไลซ์กากที่เหลืออีกสามครั้งด้วยกรดเข้มข้น 15% ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 55.74 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 74.03% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง ส่วนเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับชานอ้อยคือการฉายรังสีแกมมา 700 kGy ก่อนการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2% ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นไฮโดรไลซ์กากที่เหลืออีกสามครั้งด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15% ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด 64.43 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 83.41% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการแยกกรดออกจากสารละลายของน้ำตาลและกรดที่ได้ด้วย ion exchange resin อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

Efficiency improvement on glucose xylose and arabinose production from rice straw and sugar cane bagasse were investigated. The analysis of glucose, xylose arabinose and fructose in the sugar solution from rice straw and sugar cane bagasse hydrolysis indicated that with high concentration of sulfuric acid only, the optimum hydrolysis condition for rice straw was 30% sulfuric acid at 100 degree Celsius for 20 minutes. Total sugar was obtained at 44.84% on weight basis or 59.56% of total sugar in the sample. For sugar cane bagasse, the optimum hydrolysis condition was 30% sulfuric acid at 100 degree Celsius for 10 minutes. Total sugar was obtained at 53.00 % on weight basis or 68.60% of total sugar in the sample. With gamma irradiation was applied before hydrolysis with dilute sulfuric acid, the optimum condition for rice straw was a 500 kGy gamma irradiation before hydrolysis with 2% sulfuric acid at 120 degree Celsius for one hour before hydrolyzing the remaining residue (three times) with 15% sulfuric acid at 120 degree Celsius for one hour. Total sugar was obtained at 55.74 % on weight basis or 74.03 % of total sugar in the sample. For sugar cane bagasse the optimum hydrolysis condition was a 700 kGy gamma irradiation before hydrolysis with 2% sulfuric acid at 120 degree Celsius for 30 minutes before hydrolyzing the remaining residue (three times) with 15% sulfuric acid at 120 degree Celsius for one hour. Total sugar was obtained at 64.43 % on weight basis or 83.41 % of total sugar in the sample.

Preliminary study on separation of sulfuric acid from sugar-acid solution with ion exchange resin was also included.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... จ

สารบัญรูป ..... ญ

บทนำ 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

ขอบเขตของโครงการวิจัย 2

การผลิตน้ำตาลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid Hydrolysis) 3

การย่อยสลายโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยรังสี 6

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 9

โครงสร้างเซลลูโลส 9

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส 9

โครงสร้างลิกนิน 11

ฟางข้าว 12

ซานอ้อย 12

วิธีดำเนินการวิจัย 14

1. การเตรียมตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อย 14
2. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและปริมาณเยื่อใยในตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อย 14
3. การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อย ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยใช้วิธี ASTM E 1821 – 01 14
4. การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก 15
5. การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC 17

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

6. การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเช่นกลูโคส ไซโลส จากสภาวะที่เหมาะสมในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย 17
7. การกำจัดกรดซัลฟูริกออกจากสารละลายของน้ำตาลโดยใช้ Ion exchange resin 18

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. ผลการหาปริมาณความชื้นและปริมาณเยื่อใยในฟางข้าวและชานอ้อย 20
2. ผลการหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย ด้วยวิธี ASTM E 1821 – 01 20
3. ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 21
4. ผลการหาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) 23
5. ผลการย่อยสลายโมเลกุลฟางข้าวและชานอ้อยด้วยรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก 30
   5.1 ผลการย่อยสลายโมเลกุลฟางข้าวด้วยรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก 30
   5.2 ผลการย่อยสลายโมเลกุลชานอ้อยด้วยรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก 40
6. ผลการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเช่นกลูโคส ไซโลสจากสภาวะที่เหมาะสม 49
7. การกำจัดกรดซัลฟูริกออกจากสารละลายน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก 50

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ 53

เอกสารอ้างอิง 55

ภาคผนวก ก 57

ภาคผนวก ข 58

ภาคผนวก ค 64

ภาคผนวก ง 67

ภาคผนวก จ 69

ภาคผนวก ฉ 70

ประวัติคณะผู้วิจัย 74

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1. เงื่อนไขในการวิเคราะห์น้ำตาลจากสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ 17
2. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย 20
3. ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย 20
4. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที 24
5. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที 25
6. ผลรวมของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30%-40% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที 26
7. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที 27
8. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที 28
9. ผลรวมของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30%-40% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที 29
10. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 31
11. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

12. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 33
13. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 34
14. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง 35
15. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง 35
16. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 36
17. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 37
18. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 37
19. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 38
20. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 38
21. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลฟางข้าวฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy 39
22. ปริมาณน้ำตาลรวม 3 ชนิด ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลฟางข้าวฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 – 1100 kGy 39

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

23. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 40
24. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 41
25. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 42
26. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 43
27. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง 44
28. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง 44
29. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 45
30. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 46
31. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 46
32. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 47

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

33. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C 47
34. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลชานอ้อยฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy 48
35. ปริมาณน้ำตาลรวม 3 ชนิด ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลชานอ้อยฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 – 1100 kGy 48

ง-1 เปอร์เซ็นต์ความหวานในฟางข้าวที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20 -110 นาที 67

ง-2 เปอร์เซ็นต์ความหวานในชานอ้อยที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20 -110 นาที 68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1. กลไกของปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 4
2. กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจาง 5
3. กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสเมื่อได้รับรังสี 3
4. สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส 9
5. สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส 10
6. สูตรโครงสร้างของลิกนิน 11
7. เปอร์เซ็นต์ความหวานในฟางข้าวที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 -110 นาที 21
8. เปอร์เซ็นต์ความหวานในชานอ้อยที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 -110 นาที 22
9. พีคของน้ำตาลไซโลส, น้ำตาลอราบิโนส, น้ำตาลฟรุตโตส และน้ำตาลกลูโคส ในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย 23
10. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าว ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที 24
11. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าว ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที 25
12. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างชานอ้อย ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที 27
13. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างชานอ้อย ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที 28
14. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

15. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 32
16. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 33
17. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 34
18. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 40
19. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที 41
20. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 42
21. ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง 43
22. เปอร์เซ็นต์ความหวานของสารละลายน้ำตาลจากตัวอย่างฟางข้าวหลังผ่านเรซิน 51
23. เปอร์เซ็นต์ความหวานของสารละลายน้ำตาลจากตัวอย่างชานอ้อยหลังผ่านเรซิน 52

ข-1 วิธีการวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชตัวอย่าง โดยวิธีของ Van Soest 59

ฉ-1 การบรรยายหลักการและกระบวนการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าวและชานอ้อย 70

ฉ-2 การสาธิตการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าว 71

ฉ-3 การตอบปัญหาและการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น 73

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ พลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบันได้จากฟอสซิลในรูปของถ่านหิน น้ำมัน หินน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งต้องอาศัยเวลาและสภาวะของโลกที่เหมาะสมนานนับล้านปีจึงสังเคราะห์วัสดุเหล่านี้ขึ้นมาได้ ในขณะที่ปริมาณเชื้อเพลิงที่นำมาใช้เพิ่มขึ้นทุกปีตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และปริมาณพลเมืองของโลกที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แหล่งสำรองเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่มีอยู่ลดลงอย่างรวดเร็ว การใช้พลังงานทางเลือกอื่น ๆ เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานนิวเคลียร์ ฯลฯ ช่วยลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ระดับหนึ่งแต่ก็มีข้อจำกัดแตกต่างกันไป พลังงานทดแทนจากชีวมวลในรูปของน้ำมันจากพืช (ปาล์ม มะพร้าว ถั่ว สบู่ดำ ฯลฯ) ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ก๊าซมีเทน (จากการหมักมูลสัตว์ด้วยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศ) และแอลกอฮอล์ (จากการหมักน้ำตาลหรือแป้งด้วยยีสต์หรือแบคทีเรีย) จัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ไขวิกฤติพลังงานได้ในระยะยาวและยั่งยืนสำหรับประเทศไทย เนื่องจากมีภูมิประเทศอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรมีแสงอาทิตย์เหลือเฟือ สามารถผลิตผลิตผลทางการเกษตรได้ตลอดทั้งปี

นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร กากจากอุตสาหกรรมการเกษตรและขยะเทศบาลที่เป็นของแข็ง (Municipal solid waste) ปริมาณมหาศาลในแต่ละปี วัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกทิ้งให้ย่อยสลายไปตามธรรมชาติ หรือเผาทิ้งให้มีปริมาตรลดลงเพื่อลดภาระในการกำจัดขยะ แม้ในปัจจุบันจะมีความพยายามนำขยะเหล่านี้มาใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น ใช้ขยะเทศบาลเป็นปุ๋ยชีวภาพ หรือใช้กากที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต เช่น ชานอ้อย แกลบ กากปาล์มน้ำมัน ฯลฯ เป็นเชื้อเพลิงผลิตไอน้ำและไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดค่าเชื้อเพลิงได้จำนวนมากและช่วยลดปริมาณขยะได้มากในขณะเดียวกัน วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าวและกากจากอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ชานอ้อย ยังสามารถนำไปใช้ผลิตน้ำตาลได้ เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ประกอบด้วย เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลได้ เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมากมาต่อกัน เซลลูโลสเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะกลายเป็นน้ำตาลเฮกโซส เช่น กลูโคส ส่วนเฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกไฮโดรไลซ์จะได้น้ำตาลเพนโตสเป็นหลัก เช่น ไซโลส อราบิโนส และอาจมีน้ำตาลเฮกโซส เช่น แมนโนส กาแลกโตส กลูโคส ปนอยู่ด้วย น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านี้เมื่อนำมาหมักต่อด้วยยีสต์หรือแบคทีเรียจะได้แอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม และยังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนอีกทางหนึ่ง โดยการนำเอทานอลมาผสมกับน้ำมันก๊าซโซลีนผลิตเป็นก๊าซโซฮอล์ 95 และก๊าซโซฮอล์ 91 ใช้แทนน้ำมันก๊าซโซลีนที่ใช้ในการขนส่ง เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดิบและลดการขาดดุลการค้ากับต่างประเทศ และช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และเขม่าควัน ซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

งานวิจัยนี้จะใช้กรดและการฉายรังสีร่วมกับกรด ในการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในฟางข้าวและชานอ้อยให้เป็นน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอล

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตสารตั้งต้นสำหรับนำไปใช้ผลิตแอลกอฮอล์ เช่น กลูโคส ไซโลส และอราบิโนสจากฟางข้าวและชานอ้อย

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าว ชานอ้อยให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีปริมาณสูง ได้แก่ ไซโลส กลูโคส อราบิโนส โดยใช้กรดซัลฟูริก 2 ขั้นตอน และรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก
2. วิเคราะห์น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก และจากการใช้รังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก
3. ผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส ไซโลส จากสภาวะที่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

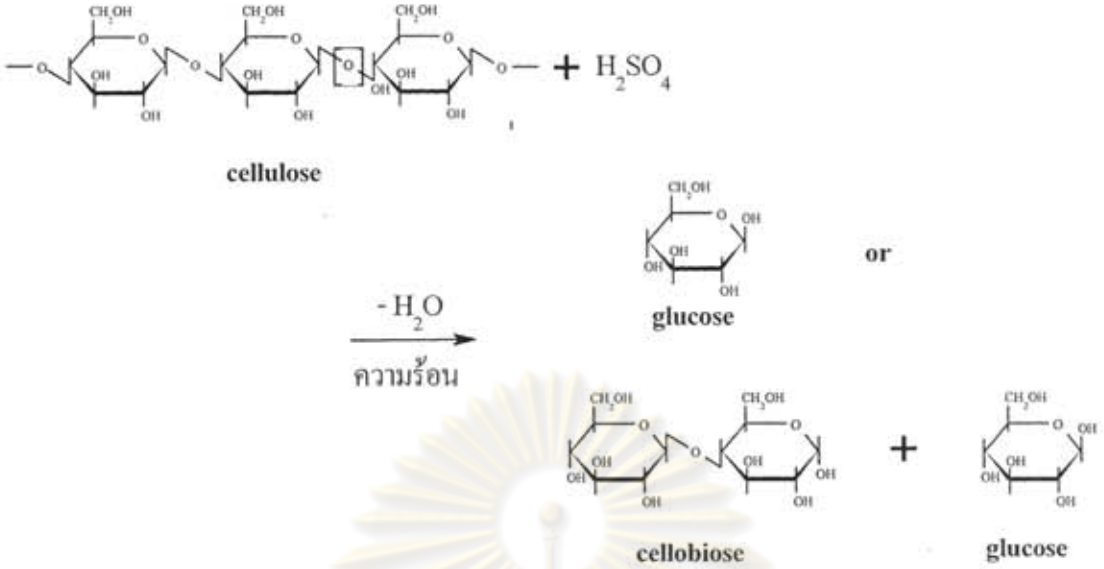
การผลิตน้ำตาลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ในปัจจุบันวัตถุดิบหลัก (feed stocks) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์คือแป้งและน้ำตาล แป้งส่วนใหญ่ได้จากธัญพืช (ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ฯลฯ) มันเทศ มันสำปะหลัง ฯลฯ น้ำตาลส่วนใหญ่ได้จากอ้อย โมลาส บีทรูท มะพร้าว ตาลโตนด ฯลฯ การใช้น้ำตาลเป็นวัตถุดิบจะต้องแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกไปเหลือเพียงน้ำตาลบริสุทธิ์ชนิดที่ต้องการซึ่งมีความเข้มข้นเหมาะสมเพื่อป้อนสู่ขั้นตอนการหมัก การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบ (จากข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง) จำเป็นต้องไฮโดรไลซ์เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อนจึงนำไปหมักต่อ การใช้ชานอ้อย ฟางข้าว กากจากการผลิตเบียร์หรือเยยแข็ง กระดาษ/เศษกระดาษ เนื้อไม้/เศษไม้ ฯลฯ เป็นวัตถุดิบจำเป็นต้องทำการไฮโดรไลซ์เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อน จากนั้นจึงแยกน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ได้ (ออกจากกรด/ด่าง/สิ่งเจือปน/สารที่เป็นพิษต่อจุลชีพที่ใช้ในการหมัก) เพื่อป้อนสู่ขั้นตอนต่อไป เช่น การหมัก หรือผลิตเป็นน้ำตาลผงโดยตรง ส่วนกรดที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์จะถูกแยกออกจากน้ำตาล และทำให้เข้มข้นเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

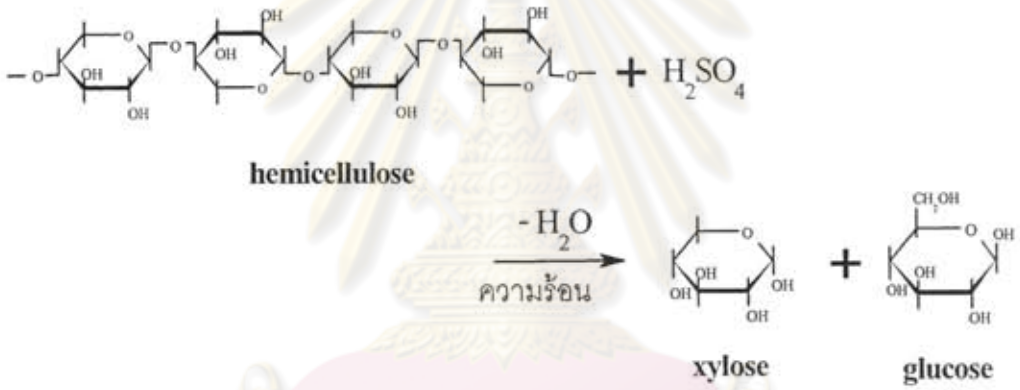
ผนังเซลของพืชเป็นลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วยเซลลูโลส 35-50% เฮมิเซลลูโลส 20-35% และลิกนิน 10-25% เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นห่วงโซ่ของผลึกกลูโคส เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์แบบกิ่งก้านมีไซโลสเป็นหลักและมีน้ำตาลชนิดอื่นปนอยู่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช) โดยมีลิกนิน (เป็นโพลิเมอร์แบบอโรแมติก) ทำหน้าที่ยึดโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน การเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทำได้หลายวิธี เช่น การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดหรือการใช้รังสีร่วมกับกรด

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid Hydrolysis)

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นการย่อยด้วยสารละลายกรด ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการทำลายพันธะไกลโคสิดิกระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจน (oxygen) เนื่องจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาล เมื่อนำมาทำการย่อยจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ถ้าเซลลูโลสถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ จะให้น้ำตาลกลูโคสเพียงอย่างเดียว ถ้าการย่อยไม่สมบูรณ์จะได้ทั้งกลูโคส เซลโลบิโอส (cellobiose) และโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) ปนกัน ส่วนเฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกย่อยจะให้น้ำตาลเพนโตสหลายชนิดปนกัน ขึ้นกับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส ดังรูปที่ 1



ก. การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลเซลลูโลส



ข. การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลเฮมิเซลลูโลส

รูปที่ 1 กลไกของปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก

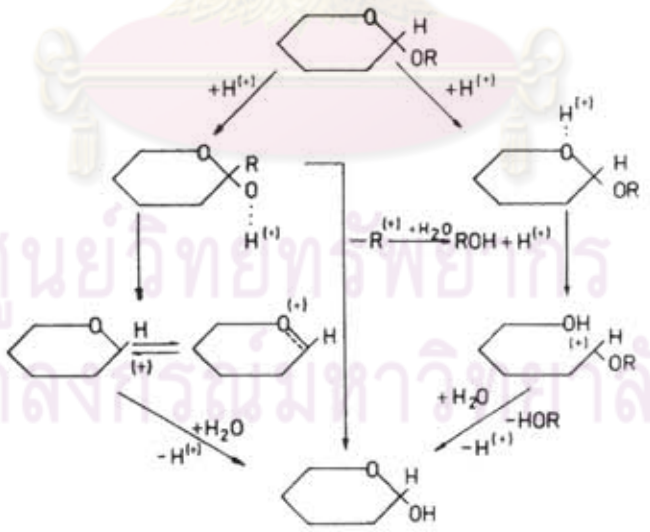
การไฮโดรไลซ์วัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยกรดมีสองแบบ คือ การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจาง และการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้น ตัวแปรในการไฮโดรไลซ์ ประกอบด้วย ชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ ความดัน เวลา ฯลฯ

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางสามารถไฮโดรไลซ์ได้เฉพาะเฮมิเซลลูโลส (เนื่องจากพันธะของเฮมิเซลลูโลสอ่อนแอกว่าพันธะของเซลลูโลส) การใช้กรดที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง และใช้เวลาสั้น (เป็นวินาที/นาที) จึงเหมาะกับกระบวนการผลิตต่อเนื่อง การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางมีข้อเสีย คือ ต้องบดย่อยให้วัสดุที่จะถูกไฮโดรไลซ์มีขนาดเล็ก (2-3 มม.) เพื่อให้กรดเข้าไฮโดรไลซ์ได้ง่าย และมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเกิดขึ้นหลายชนิด (ขึ้นกับชนิดของ feedstocks) การไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงกว่าหนึ่งบรรยากาศส่งผลให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้น

เปลี่ยนเป็นสารอื่นได้ เช่น furfural ทำให้มี sugar yield ต่ำ (ประมาณ 50%) และวัสดุที่ใช้ทำภาชนะสำหรับไฮโดรไลซิสมีราคาแพง เนื่องจากต้องทนกรดที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง อีกทั้ง furfural ที่เกิดขึ้นอาจมีผลเสียหรือเป็นพิษต่อยีสต์หรือแบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการหมัก เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโพลิแซคคาไรด์ชนิดเพนโตสเป็นหลัก (ประกอบด้วยไซแลนและอะราแบน) และมีโพลิแซคคาไรด์ชนิดเฮกโซแซน (ประกอบด้วยแมนแนน กาแลกแทนและกลูแคน) และโพลียูโรไนด์เป็นส่วนน้อย น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นจึงมีไซโลสเป็นหลัก และมีอราบิโนส แมนโนส กาแลกโตส กลูโคส และกรดยูโรนิก ปนอยู่เล็กน้อย

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางดังรูปที่ 2 ซึ่งมีกลไกของปฏิกิริยาดังนี้ [1]

1. โปรตอนจากกรดจะ diffuse เข้าสู่ lignocellulosic matrix
2. โปรตอน (H^+) จับกับออกซิเจนของ heterocyclic ether bond ระหว่างโมโนเมอร์ของน้ำตาล
3. เกิดการแตกของพันธะ ether
4. เกิด carbocation intermediate
5. carbocation ละลายน้ำ
6. ปล่อยโปรตอนขึ้นมาใหม่ พร้อมกับเกิดน้ำตาลโมโนเมอร์, oligomer, หรือ โพลิเมอร์ขึ้นกับตำแหน่งการแตกของพันธะ ether



รูปที่ 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจาง [2]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นประกอบด้วยการเติมกรดเข้มข้นลงในตัวอย่าง (ฟางข้าวหรือชานอ้อย) กรดจะตัด hydrogen bond ระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสส่งผลให้ โครงสร้างที่เป็นผลึกของเซลลูโลส เปลี่ยนเป็นอะมอฟัส (มีลักษณะคล้ายเจลาติน) จากนั้นเติมน้ำลงไปเพื่อเจือจางกรดให้มีความเข้มข้น ประมาณ 20-30% แล้วทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิปานกลาง จะได้กลูโคสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

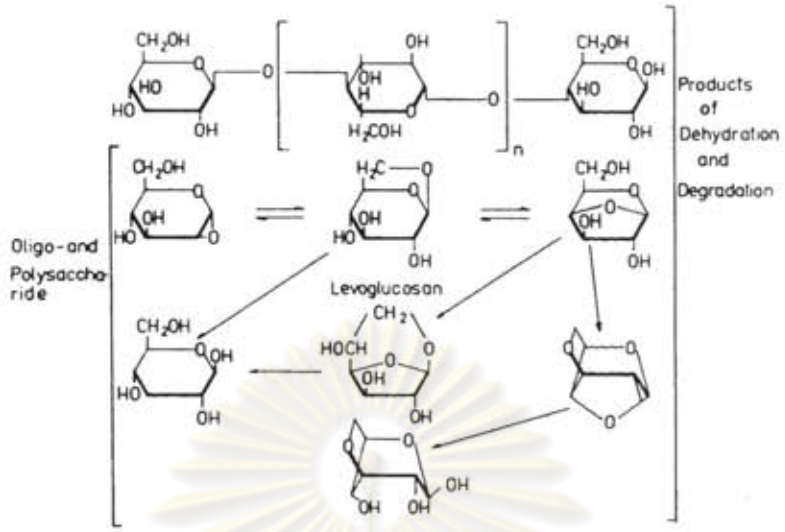
การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นจะไฮโดรไลซ์ทั้งเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสไปพร้อม ๆ กัน เมื่อเซลลูโลสถูกไฮโดรไลซ์อย่างสมบูรณ์ด้วยกรดเข้มข้นจะให้กลูโคสเพียงอย่างเดียวในขณะที่เฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นจะให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด การใช้กรดเข้มข้นที่อุณหภูมิต่ำและที่ความดันปกติ ทำให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นไม่เปลี่ยนเป็นสารอื่น ทำให้มีค่า sugar yield สูง (>90%) วัสดุที่ใช้ทำภาชนะสำหรับทำการไฮโดรไลซ์ หาได้ง่ายและมีราคาถูก (เช่นไฟเบอร์กลาส) ข้อเสียของการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นคือต้องใช้กรดเข้มข้นซึ่งมีราคาแพง มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า ใช้เวลานาน (เป็นชั่วโมง) เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำ และต้องมีการแยกกรดและน้ำตาลที่ไฮโดรไลซ์ได้ออกจากกัน เพื่อนำกรดที่เหลือมาเพิ่มความเข้มข้นและใช้ซ้ำเพื่อลดค่าใช้จ่าย (เป็นการหลีกเลี่ยงการกำจัดกรดที่เหลือด้วยการสะเทินซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้สะเทินกรด และค่าใช้จ่ายในการกำจัดผลิตผลจำนวนมากที่เกิดขึ้นจากการสะเทินกรด) เนื่องจาก feedstocks ทั่วไปจะมีเซลลูโลสมากกว่าเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นจึงมีกลูโคสเป็นหลัก มีไซโลสในปริมาณรองลงมา และมีอราบิโนส แมนโนส กาแลกโตส กลูโคส และกรดยูโรนิกปนอยู่เล็กน้อย

การย่อยสลายโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยรังสี [3]

ผลของการย่อยสลายโมเลกุลด้วยรังสี คือ ทำให้เกิดการลดขนาดของโมเลกุลขนาดใหญ่ ให้มีขนาดเล็กลง การฉายรังสีเป็นการถ่ายเทพลังงานของรังสีไปสู่โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งโดยมากจะประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ และเมื่อฉายรังสีที่ปริมาณรังสีสูงมากพอจะทำให้เกิดการย่อยสลายโมเลกุลจากโพลีแซคคาไรด์เป็นโมโนแซคคาไรด์ McManus et.al. (1972) พบว่าปริมาณรังสีตั้งแต่ 250 kGy ขึ้นไป จะสามารถนำไปปรับปรุงอาหารหยาบคุณภาพต่ำหรือวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร เพื่อนำไปใช้เลี้ยงแกะได้ และ Yu et.al. (1975) รายงานว่าส่วนประกอบของผนังเซลล์ (cell-well constituents, NDF) ในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จะละลายได้ 50 % ถ้าใช้ปริมาณรังสี 100 MGy

กลไกการเกิดปฏิกิริยาจากการฉายรังสีในเซลลูโลส

รังสีจะถ่ายเทพลังงานให้แก่โมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้สายโซ่ของเซลลูโลสขาดออกจากกันที่ β-1,4-glycosidic linkage ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสเมื่อได้รับรังสี [2]

ค่าที่ใช้แสดงความสามารถของรังสีที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเสื่อมสลาย (degradation) ในโพลิเมอร์ คือ G(S) (radiation chemical yield of degradation, หน่วย scission/100eV) ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดมวลโมเลกุล (molecular mass) ของโพลิเมอร์ ก่อนและหลังการฉายรังสี แล้วใช้สมการหาค่า G(S) ดังนี้

$$G(S) = \frac{9.65 \times 10^3}{D}\left(\frac{1}{M_n} - \frac{1}{M_{n,o}}\right)$$

เมื่อ $\overline{M}_{n,o}$ คือจำนวนมวลโมเลกุลเฉลี่ยของโพลิเมอร์ก่อนการฉายรังสี

$\overline{M}_n$ คือจำนวนมวลโมเลกุลเฉลี่ยของโพลิเมอร์หลังการฉายรังสี

D คือปริมาณรังสีดูดกลืน หน่วย MGy

ตัวแปรที่มีผลต่อค่า G(S) ได้แก่ องศาของความเป็นผลึก (degree of crytallinity) อุณหภูมิ-ความดันระหว่างการฉายรังสี และ LET (Linear Energy Transfer)

ค่า G(S) ของเซลลูโลสที่ถูกรังสีเหนี่ยวนำให้เกิด degradation ที่อุณหภูมิห้อง สภาวะไร้ออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 7.0

ปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดระหว่างการฉายรังสีหรือหลังการฉายรังสี ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำโพลิเมอร์ที่ฉายรังสีแล้วด้วยความร้อน ทำให้เกิด peroxy radicals (RO_2 *), hydro

peroxides (RO_2H) และ peroxides (ROOR) ซึ่งผลของออกซิเจนมีผลต่อการเกิด degradation ในโพลิเมอร์ต่างกัน ๆ จะไม่เหมือนกัน เช่นใน polyethylene เกิด degradation ได้ง่ายขึ้น แต่ใน poly (methyl methacrylate) เกิด degradation ได้ช้าลง สำหรับเซลลูโลสจะให้ผลการเกิด degradation ที่เหมือนกัน ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของออกซิเจนไม่มีกฎแน่นอน โดยจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโพลิเมอร์แต่ละชนิด และการที่ออกซิเจนไม่มีผลต่อการเกิด degradation ในเซลลูโลสก็เนื่องมาจากโครงสร้างที่แข็งและมีความเป็นผลึกสูง ทำให้ออกซิเจน diffuse เข้าสู่โมเลกุลได้ยาก

LET (Linear Energy Transfer) คือ จำนวนพลังงานที่สูญเสียไป ต่อระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ มีการทดลองว่า LET มีส่วนต่อการเกิดกระบวนการ cross-linking และ degradation ในโพลิเมอร์ โดยจะแบ่งโพลิเมอร์ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ LET ไม่มีผลต่อการเกิดกระบวนการทั้งสอง ในกลุ่มที่ LET ไม่มีผลต่อกระบวนการทั้งสอง ได้แก่ cellulose, cellulose diacetate, polyethylene เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่ LET มีผลต่อการเกิดกระบวนการ ได้แก่ cellulose nitrate, polymethacrylonitrile เป็นต้น

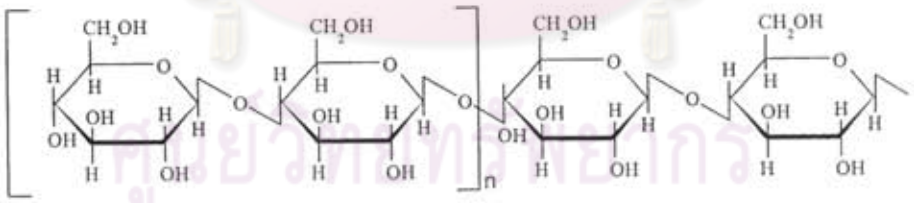
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าวและชานอ้อย จัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสิก (lignocellulosic material) ชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ และสภาวะที่เจริญเติบโต

โครงสร้างเซลลูโลส

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



รูปที่ 4 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส [4]

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentose) ซึ่งส่วนมากเป็นดี-ไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (xylose) หลาย ๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะ β-1,4-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 5 สายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (heterogenous) ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดปนกันคือ

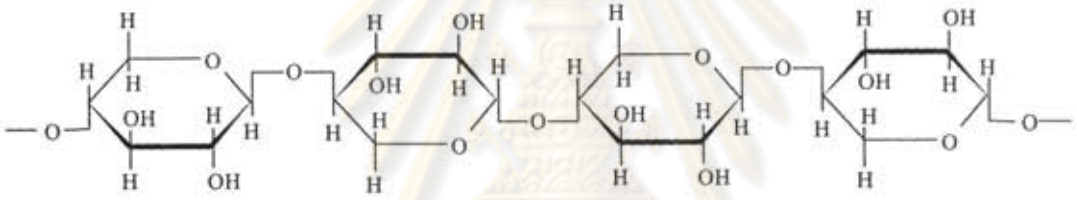
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

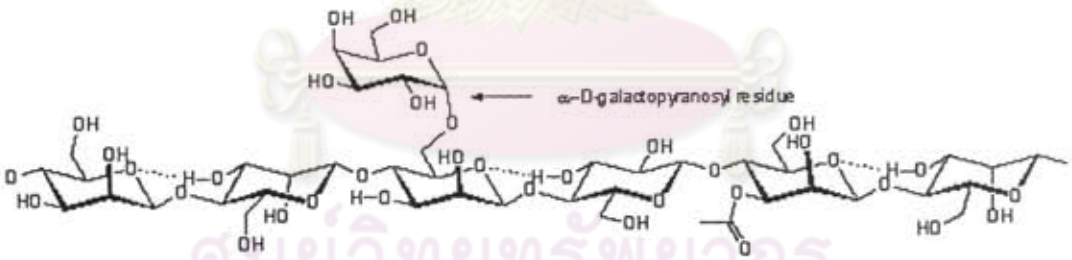
- เฮกโซแซน (hexosan) ส่วนใหญ่เป็น แมนแนน (mannan) กาแลคแทน (galactan) และกลูแคน (glucan) เมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแลคโตส (galactose) และกลูโคส ตามลำดับ

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

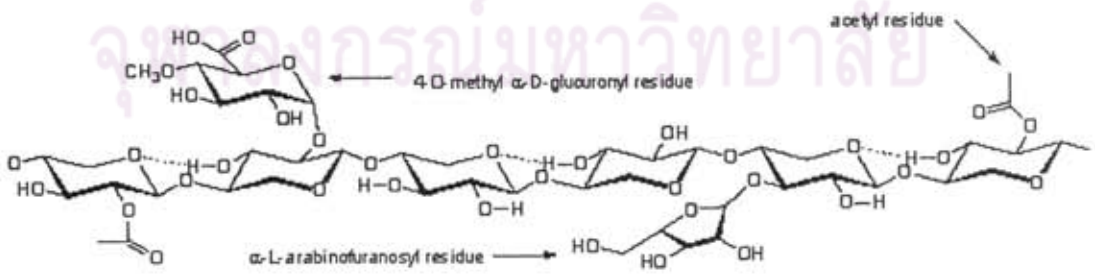
ข้อแตกต่างของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจาง ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้สายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขามากกว่า และมีความยาวของสายโพลีเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส



ก. Hemicellulose [5]



ข. Graminaceous hemicellulose [6]



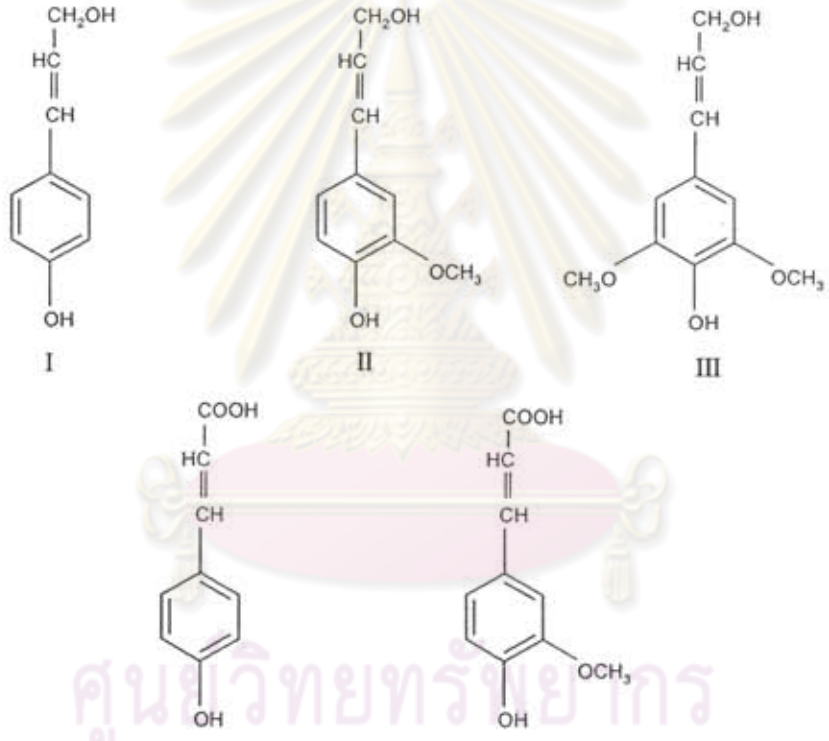
ค. Softwood hemicellulose [6]

รูปที่ 5 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงสร้างลิกนิน

ลิกนินไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต แต่จะทำหน้าที่เคลือบผนังเซลล์พืช เป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) หรือเรียกว่าเป็น ฟีโนลิกโพลีเมอร์ (phenolic polymer) โดยมีหน่วย ฟีนิลโพรเพน (phenyl propane unit) เรียงต่อกันแบบสุ่ม (random) ที่หน่วยฟีนอล (phenol unit) อาจเป็น กัวอิเอซิล (guaiacyl) หรือ ไซรินกิล (syringyl) ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่ตำแหน่งแอลฟาและเบตาของโมเลกุลลิกนิน อาจเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลหรือคาร์บอนในหน่วย ฟีนอล อาจเกิดพันธะกับคาร์บอนในอีกหน่วยหนึ่งภายในสายโพลีเมอร์ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลลิกนิน ทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เอทานอล (ethanol) หรือเมทานอล (methanol) ที่ร้อน และในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปกติลิกนินจะอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืชบริเวณรอบ ๆ เซลลูโลสโดยเป็นตัวป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยอีกด้วย



I = p-coumary alcohol
II = coniferry alcohol
III = sinapyl alcohol
IV = p-coumaric acid
V = feuric acid

รูปที่ 6 สูตรโครงสร้างของลิกนิน [5]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาทำการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ฟางข้าว และชานอ้อย โดยมีความน่าสนใจดังนี้

ฟางข้าว

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

ชานอ้อย

ปัจจุบันอ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีชาวไร่อ้อยมาก กว่า 100,000 ครอบครัว พื้นที่ปลูกกระจายในจังหวัดต่างๆ มากกว่า 40 จังหวัด ประมาณ 6 ล้านไร่ ผลผลิตอ้อยต่อปีประมาณ 45-70 ล้านตัน น้ำตาลที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มี 3 ชนิดคือ น้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ น้ำตาลต่าง ๆ ที่ได้จากกระบวนการถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์หลักของอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ส่วนที่เหลือนั้นสามารถนำไปใช้ภายในโรงงานน้ำตาล หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีก เรียกว่า ผลิตผลพลอยได้ (by-products) เช่น ชานอ้อย (bagasse) ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำที่ใช้ผลิตไฟฟ้าและกระบวนการผลิตน้ำตาล กากตะกอนหม้อกรอง (filter mud) จะนำไปใช้เป็นปุ๋ยใส่ในไร่อ้อย หรือนำไปทำเป็นปุ๋ยหมัก กากน้ำตาล (molasses) นำไปผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น เอทธิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol หรือ ethanol) ผงชูรส (monosodium glutamate) เป็นต้น

ชานอ้อย เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ด้วยกัน คือ

1. ส่วนกลางของต้นอ้อย (center portion) จะประกอบด้วย ขุยอ้อย หรือ parenchyma cell ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง (ไม่รวมน้ำอ้อย) ซึ่งขุยอ้อยนี้จะไม่มีลักษณะของเส้นใยส่วนใหญ่อยู่ตรงกลางของลำต้นมีทิศทางขนานไปกับความยาวของลำต้น แต่ขุยอ้อยบางส่วนจะมีทิศทางตามภาคตัดขวางของลำต้น โดยมีมัดเส้นใยเดี่ยวฝังอยู่ในส่วนขุยอ้อยนี้ บริเวณตรงกลางของต้นอ้อยมีมัดเส้นใยกระจายอยู่สูงถึงร้อยละ 15 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง เส้นใยที่พบมีทั้งแบบผนังเซลล์บาง ลูเมนกว้างและเส้นใยสั้นผนังหนา นอกจากนี้ยังพบ vessel element ที่มีผนังเซลล์หนาด้วย

2. ส่วนเนื้ออ้อยหรือแกนอ้อย ส่วนนี้ของต้นอ้อยประกอบด้วยส่วนที่เป็นมัดเส้นใยคุณภาพดี ประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักต้นอ้อยอบแห้ง ซึ่งรวมกันแน่นที่แกนของต้นอ้อย ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้นเพราะว่ามีโครงสร้างที่แข็งแรง มัดเส้นใยของต้นอ้อยนี้เรียงตัวขนานกับลำต้นของอ้อย ยกเว้นมัดเส้นใยซึ่งอยู่ที่ส่วนข้อของต้นอ้อย เส้นใยในชั้นของแกนนี้มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยที่อยู่ในส่วนขุยอ้อย และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาเคมีดีกว่า จากการที่มัดเส้นใยนี้ขนานกับลำต้นทำให้สามารถแยกจากกันได้ง่ายเมื่อเทียบกับส่วนขุยอ้อย ที่ส่วนแกนของต้นอ้อยมีเส้นใยรวมกันอยู่อย่างหนาแน่น โดยเส้นใยแต่ละเส้นจะเชื่อมติดกันตามความยาวของเส้นใย

3. ส่วนเปลือกอ้อย เป็นส่วนที่อยู่นอกสุดของต้นอ้อย เป็นส่วนซึ่งบางที่สุด แต่มีความหนาแน่นสูงมากประกอบด้วยไขมันและวัสดุอื่น ๆ ส่วนเปลือกอ้อยนี้มีประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย

1.1 นำตัวอย่าง ฟางข้าว และชานอ้อย ตัวอย่างละ 20 กิโลกรัม ไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 3-4 วัน จากนั้นนำเข้าเครื่องบดตัวอย่าง นำตัวอย่างที่บดมาร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1 มิลลิเมตร

1.2 แบ่งตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 เก็บไว้เพื่อทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก ส่วนกลุ่มที่ 2 ส่งฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 300, 500, 700, 900 และ 1100 kGy ตามลำดับ

2. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและปริมาณเยื่อใยในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย

2.1 นำตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยไปวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น วิธีวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก

2.2 นำตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยมาอย่างละ 1 กรัมไปวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van Soest [7] ดังแสดงใน ภาคผนวก ข

3. การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) **โดยใช้วิธี** ASTM E 1821 – 01 [8]

นำตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในตัวอย่าง ได้แก่ กลูโคส, ไซโลสและอราบิโนส วิธีวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก

การไฮไดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าวและชานอ้อยในรายงานนี้ แบ่งเป็น 2 วิธี คือ การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และอีกวิธีคือการฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยมาแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 นำไปไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น กลุ่มที่ 2 นำไปฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ และนำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง

กลุ่มที่ 1 ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น

1. การไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น โดยใช้ตัวอย่างฟางข้าวจำนวน 15 ตัวอย่าง และชานอ้อยจำนวน 15 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 10 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 77% จำนวน 15 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง เพื่อให้สัดส่วนระหว่างตัวอย่างต่อกรดเป็น 1:1.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผสมตัวอย่างกับกรดทำโดยค่อย ๆ เทกรดลงในขวดสำหรับไฮโดรไลซ์สลับกับตัวอย่างคนให้เข้ากันทำเช่นนี้จนหมดกรดและตัวอย่าง คนส่วนผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที จึงเติมน้ำ (42.75 มิลลิลิตร) เพื่อปรับความเข้มข้นของกรดให้เป็น 20% นำตัวอย่างที่ได้ไปทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20, 40, 60, 80 และ 110 นาที ตามลำดับ กรองตัวอย่างที่ไฮโดรไลซ์แล้วด้วยกระดาษกรอง จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรด ปรับค่า pH ของสารละลายของน้ำตาลที่ได้ด้วย $Ca(OH)_2$ ให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 วัดเปอร์เซ็นต์ความหวาน (%Brix) ของสารละลายของน้ำตาลหลังปรับ pH แล้วด้วยเครื่อง Refractometer และวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

2. การไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น โดยใช้ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยอย่างละ 30 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 10 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 77% จำนวน 15 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1 แต่ในขั้นตอนการปรับความเข้มข้นของกรดให้ปรับเป็นความเข้มข้น 30% และ 40% ตามลำดับ ก่อนการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 100 °C

กลุ่มที่ 2 การฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง

1. การฉายรังสีแกมมาในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย

นำตัวอย่างฟางข้าวจำนวน 5 ตัวอย่าง และชานอ้อยจำนวน 5 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 1 กิโลกรัม ไปฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 300, 500, 700, 900 และ 1100 kGy ตามลำดับจากนั้น นำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีไปไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรด

2. การหาเวลาที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริก

2.1 นำตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และ 1100 kGy มาอย่างละ 9 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 กรัม ใส่ในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 2% กรดซัลฟูริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำเข้าเครื่อง autoclave เพื่อไฮโดรไลซ์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ตัวอย่าง, 30 นาที จำนวน 3 ตัวอย่าง และ 60 นาที จำนวน 3 ตัวอย่าง กรองตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ จะได้สารละลายของน้ำตาลปนอยู่กับกรด ปรับค่า pH ของสารละลายของน้ำตาลที่ได้ด้วย $Ca(OH)_2$ ให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 วัดเปอร์เซ็นต์ความหวาน (%Brix) ของสารละลายของน้ำตาลหลังปรับ pH แล้วด้วยเครื่อง Refractometer และวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC เปรียบเทียบหาเวลาที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์

2.2 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์จากตัวอย่างในข้อ 2.1 ที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2% และ 15% กรดซัลฟูริก จำนวน 20 มิลลิลิตร โดย 2% กรดซัลฟูริก ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ส่วน 15% กรดซัลฟูริก ใช้เวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 °C กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5-6 และวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล

2.3 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์จากตัวอย่างในข้อ 2.2 ที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุด มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก จำนวน 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 °C กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์ มาวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล ส่วนกากที่เหลือนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์มาวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล

2.4 นำตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสีที่ 300 kGy, 700 kGy และ 900 kGy มาอย่างละ 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 กรัม ใส่ในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 2% กรดซัลฟูริก จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำเข้าเครื่อง autoclave ไฮโดรไลซ์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 °C โดยใช้เวลา 60 นาทีสำหรับฟางข้าว และ 30 นาทีสำหรับซานอ้อย กรองตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5-6 วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล

2.5 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์จากตัวอย่างในข้อ 2.4 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก จำนวน 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 °C กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5-6 วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล ส่วนกากที่เหลือนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์ มาวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล ทำการไฮโดรไลซ์กากที่เหลืออีกครั้งด้วย 15% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์ มาวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล

5. **การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง** HPLC

การหาชนิดและปริมาณน้ำตาลในสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเครื่อง HPLC ทำได้โดยนำสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ในข้อ 4 ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการวิเคราะห์น้ำตาลจากสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์

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

6. **การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเช่นกลูโคส ไซโลส จากสภาวะที่เหมาะสมในตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อย**

ทำการผลิตน้ำตาลกลูโคส ไซโลส จากฟางข้าวและซานอ้อยโดยการใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นและการฉายรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง

1. การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น

ใช้ตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยตัวอย่างละ 50 กรัมและกรดซัลฟูริกเข้มข้น 77%จำนวน 75 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง เพื่อให้สัดส่วนระหว่างตัวอย่างต่อกรดเป็น 1:1.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผสมตัวอย่างกับกรดทำโดยค่อย ๆ เทกรดลงในขวดสำหรับไฮโดรไลซ์สลับกับตัวอย่างคนให้เข้ากันทำเช่นนี้จนหมดกรดและตัวอย่าง คนส่วนผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที จึงเติมน้ำ (117.5 มิลลิลิตร) เพื่อปรับความเข้มข้นของกรดให้เป็น 30% นำตัวอย่างที่ได้ไปทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาทีสำหรับฟางข้าว และ 10 นาทีสำหรับซานอ้อย กรองตัวอย่างที่ไฮโดรไลซ์แล้วด้วยกระดาษกรอง จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรด ปรับค่า pH ของสารละลายของน้ำตาลที่ได้ด้วย $Ca(OH)_2$ ให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 และวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

2. การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยโดยการฉายรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง

2.1 นำตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยตัวอย่างละ 1 กิโลกรัมไปฉายรังสีแกมมา โดยตัวอย่างฟางข้าวใช้ปริมาณรังสี 500 kGy และชานอ้อยใช้ปริมาณรังสี 700 kGy

2.2 นำตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสีมาตัวอย่างละ 50 กรัม ใส่ในขวดขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 2 ใบ เติม 2% กรดซัลฟูริก จำนวน 500 มิลลิลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำเข้าเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับฟางข้าว และ 30 นาทีสำหรับชานอ้อย กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5-6 ด้วย $Ca(OH)_2$ วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล

2.3 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์จากตัวอย่างข้อ 2.2 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก จำนวน 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองสารละลายที่ได้จากไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 5-6 ด้วย $Ca(OH)_2$ วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาล

2.4 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์จากตัวอย่างข้อ 2.3 มาไฮโดรไลซ์ตามขั้นตอนในข้อ 2.3 ต่ออีก 2 ครั้ง

7. **การกำจัดกรดซัลฟูริกออกจากสารละลายของน้ำตาลโดยใช้** Ion exchange resin

การกำจัดกรดออกจากสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกโดยใช้ ion exchange resin งานวิจัยนี้เลือกใช้เรซินชนิด DOWEX M-43

การเตรียม ion exchange column นำเรซินประมาณ 150 มิลลิลิตร มาแช่ในน้ำปราศจากอิออน (deionize water) เป็นเวลา 30 นาที บรรจุเรซินลงในคอลัมน์ให้มีความสูงประมาณ 20 เซนติเมตรของคอลัมน์ โดยคอลัมน์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ (อย่าให้มีฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์) จากนั้นนำใยแก้ว (glass wool) มาปิดด้านบนของเรซินเพื่อป้องกันไม่ให้เรซินฟุ้งขึ้นมาขณะเติมสารละลายของน้ำตาล ทำการปรับสภาพเรซินโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2-4% ลงในคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากอิออนด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อล้างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือให้หมด จะได้เรซินที่พร้อมใช้งาน

การเตรียมสารละลายของน้ำตาลก่อนนำมาผ่านเรซิน

กรณีที่ 1 สารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% ทำให้สารละลายของน้ำตาลที่ได้มีกรดเข้มข้น 30% ปนอยู่ ดังนั้นต้องนำสารละลายของน้ำตาลดังกล่าวมาเจือจางให้มีความเข้มข้นของกรดประมาณ 15% เนื่องจากเรซินสามารถจับกรดได้ในปริมาณจำกัด จึงไม่สามารถนำสารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรดเข้มข้น 30% ที่เตรียมได้มาผ่านเรซินโดยตรง

ดังนั้นจึงนำสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ จำนวน 38.5 มิลลิลิตร มาเติมน้ำปราศจากอิออนจำนวน 38.5 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายมีความเข้มข้นของกรด 15% ก่อนนำมา feed เข้า ion exchange column

ส่วนกรณีที่ 2 เป็นสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการใช้รังสีร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง ซึ่งเป็นการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก 15% ทำให้สารละลายของน้ำตาลที่ได้มีความเข้มข้นของกรด 15% จึงสามารถ feed เข้า ion exchange column ได้โดยตรง

นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากกรณีที่ 1 (ส่วนสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากกรณีที่ 2 ไม่ได้นำมาแยกเอากรดออกด้วยวิธีนี้ เนื่องจากผลที่ได้ใกล้เคียงกันจึงเลือกมาศึกษาเพียงกรณีเดียว) มา feed เข้า ion exchange column ที่หนึ่งด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที เรซินจะจับกรดและ neutralize กรดในเม็ดเรซินพร้อมกับปล่อยสารละลายของน้ำตาลออกมา จะได้สารละลายของน้ำตาลที่มีกรดปนอยู่เล็กน้อย ทำการเก็บสารละลายของน้ำตาลที่ออกจากคอลัมน์ที่ 1 และนำสารละลายของน้ำตาลดังกล่าว feed เข้า ion exchange column ที่ 2 ด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที กรดที่เหลืออยู่เล็กน้อยใน feed จะถูกจับด้วยเรซินจนหมด จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปราศจากกรด ทำการเก็บสารละลายของน้ำตาลที่ออกจาก ion exchange column ที่ 2 ทุก ๆ 10 มิลลิลิตร เพื่อวัดเปอร์เซ็นต์ความหวาน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ทั้งหมดมารวมกัน และนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. **ผลการหาปริมาณความชื้นและปริมาณเยื่อใยในฟางข้าวและชานอ้อย** แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย

ตัวอย่าง	ความชื้น (%)	NDF (%)	ADF (%)	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ฟางข้าว	8.1	70.58	41.02	35.62	29.57	2.99
ชานอ้อย	7.1	79.92	49.98	42.08	29.94	7.43

หมายเหตุ : ปริมาณเยื่อใยคิดเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างแห้ง

: ค่าที่ได้เป็นค่าฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ปริมาณความชื้นในฟางข้าวและชานอ้อย มีค่า 8.1% และ 7.1% ตามลำดับ

NDF คือ เยื่อใยทั้งหมด ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จากนั้นย่อยสลายโมเลกุลต่อด้วยกรดเจือจางทำให้เฮมิเซลลูโลสถูกย่อยสลายไปส่วนที่เหลืออยู่คือ ADF ซึ่งประกอบด้วยเยื่อใยของเซลลูโลส กั บลิกนิน ผ ลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในฟางข้าวและชานอ้อย ดังตารางที่ 1 พบว่าชานอ้อยมีค่า NDF สูงสุด คือ 79.92% รองลงมาคือฟางข้าวมีค่า 70.58% ตัวอย่างที่มีค่า ADF สูงสุด คือ ชานอ้อย มีค่าเท่ากับ 49.98% รองลงมาคือ ฟางข้าวมีค่า 41.02% ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส พบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสูงสุด คือ ชานอ้อย มีค่าเท่ากับ 42.08% และ 29.94% ตามลำดับ ส่วนฟางข้าวมีปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เท่ากับ 35.62% และ 29.57% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maiorella et al. [9], Garrote et al. [10] และ Saha et al. [11] พบปริมาณเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในฟางข้าวมีค่า 32-47%, 19-27% และ 5-24% ตามลำดับ

2. **ผลการหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย ตามวิธี ASTM E 1821 – 01**

ตารางที่ 3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย

	เปอร์เซ็นต์ของน้ำตาล	
	ฟางข้าว	ชานอ้อย
กลูโคส	50.76 ± 3.07	43.00 ± 2.03
ไซโลส	15.98 ± 0.74	25.02 ± 0.31
อราบิโนส	8.55 ± 1.55	9.23 ± 1.80

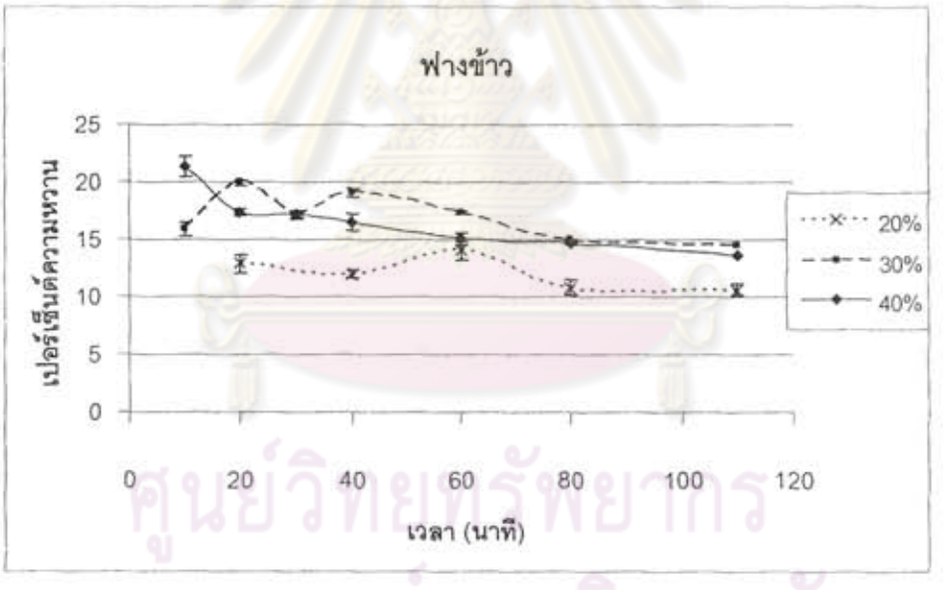
หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในตัวอย่างฟางข้าว พบว่ามีปริมาณน้ำตาลกลูโคส 50.76%,ไซโลส 15.98% และอราบิโนส 8.55% ส่วนในชานอ้อยมีปริมาณน้ำตาลกลูโคส 43.00% ไซโลส 25.02% และอราบิโนส 9.23% งานวิจัยของ Maiorella et al. [9] และ Roberto et al. [12] พบปริมาณคาร์โบไฮเดรตในฟางข้าวประกอบด้วย กลูโคส 41-43% ไซโลส 14.8-20.2% และอราบิโนส 2.7-4.5% ปริมาณกลูโคสและอราบิโนสในฟางข้าวจากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่า

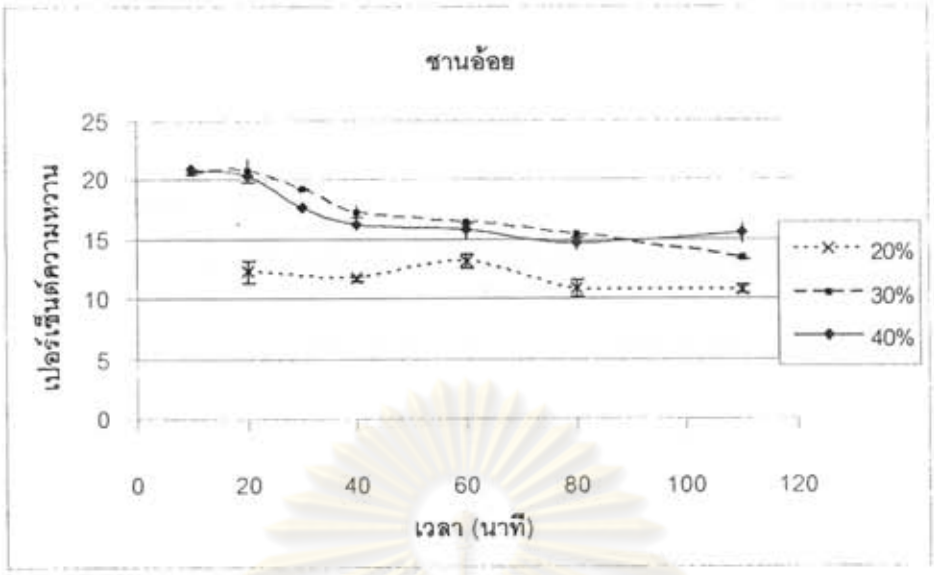
3. ผลการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น

ผลการย่อยสลายตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20-40% ที่ระยะเวลา 10-110 นาที (รูปที่ 7-8 และตารางที่ ง-1-2 แสดงในภาคผนวก ง) พบว่า การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% ได้สารละลายของน้ำตาล (Hydrolyzate) ที่มีเปอร์เซ็นต์ความหวาน (%Brix) สูงกว่าการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 40% และ 20% ตามลำดับ ในช่วงเวลา 20-110 นาทีของการไฮโดรไลซ์ ยกเว้นที่เวลา 10 นาที การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก 40% ให้เปอร์เซ็นความหวานสูงกว่าการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก 30%



รูปที่ 7 เปอร์เซ็นต์ความหวานในฟางข้าวที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 -110 นาที (ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8 เปอร์เซ็นต์ความหวานในชานอ้อยที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 -110 นาที (ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง)

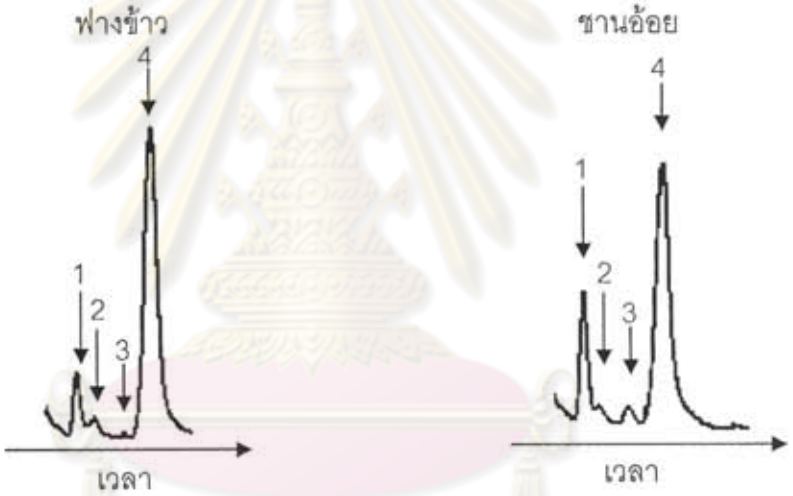
การไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% เป็นเวลา 10-110 นาที ได้สารละลายของน้ำตาลที่มีค่าความหวานสูงสุดที่เวลา 20 นาที มีค่าความหวาน 19.95 เปอร์เซ็นต์ และ 20.80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเพิ่มเวลาไฮโดรไลซ์นานขึ้นเป็น 40-110 นาที พบว่าเปอร์เซ็นต์ความหวานในสารละลายของน้ำตาลลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7 และ 8

การไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 40% สารละลายของน้ำตาลที่ได้มีค่าความหวานสูงสุดเมื่อทำการไฮโดรไลซ์เป็นเวลา 10 นาที ได้ค่าความหวาน 21.33 เปอร์เซ็นต์ และ 20.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซ์มากขึ้นค่าความหวานในสารละลายของน้ำตาลที่ได้กลับลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยที่ใช้ในการทดลองผ่านการบดจนมีขนาดเล็ก ทำให้กรดสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลสได้ง่ายและทั่วถึง จึงใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์เพียง 10-20 นาที จึงได้สารละลายของน้ำตาลที่มีเปอร์เซ็นต์ความหวานสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซ์ต่อไป น้ำตาลที่มีอยู่เปลี่ยนไปเป็นสารอื่น จึงมีความหวานลดลง ยกเว้นตัวอย่างชานอ้อยที่เวลาในการไฮโดรไลซ์ 110 นาที ให้ค่าความหวานของสารละลายของน้ำตาลสูงกว่าที่เวลา 80 นาทีเล็กน้อย

การไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% เป็นเวลา 20-110 นาที พบว่า เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 20 นาทีมีค่าเปอร์เซ็นต์ความหวานในสารละลายของน้ำตาลสูงกว่าที่ 40 นาทีเล็กน้อยและมีค่าเปอร์เซ็นต์ความหวานสูงสุดที่เวลา 60 นาที หลังจาก 60 นาทีค่าเปอร์เซ็นต์ความหวานของสารละลายของน้ำตาลลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของกรดลดลงเหลือ 20% ต้องใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์นานขึ้นเป็น 60 นาที จึงได้ค่าความหวานสูงสุด

4. **ผลการหาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง** High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก 30% และ 40% ไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่อง HPLC พบว่า ประกอบด้วยน้ำตาล 4 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนสและฟรุกโตส (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 พีคของน้ำตาลไซโลส (1), น้ำตาลอราบิโนส (2), น้ำตาลฟรุตโตส (3) และน้ำตาลกลูโคส (4) ในตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

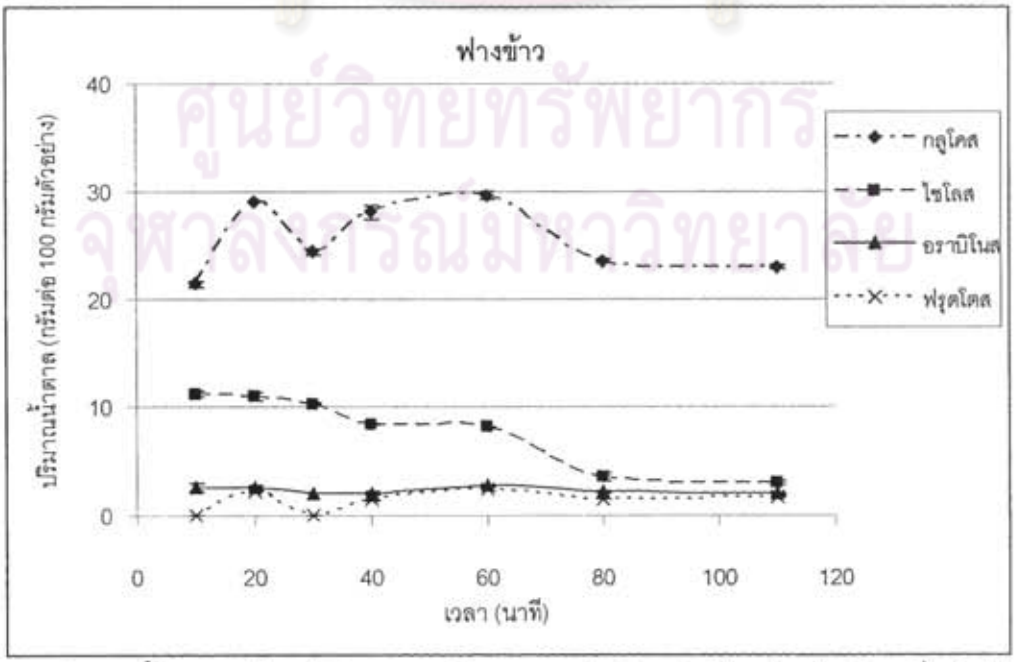
ตัวอย่างฟางข้าว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้ง 4 ชนิด ในตัวอย่างฟางข้าวที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 30% แสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 10 พบปริมาณกลูโคสสูงสุดในตัวอย่างฟางข้าวที่เวลา 60 นาที มีค่า 29.55 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 58.50 % ของปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณไซโลสสูงสุดที่เวลา 10 นาที มีค่า 11.25 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 70.43 % ของปริมาณไซโลสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณอราบิโนสสูงสุดที่เวลา 60 นาที มีค่า 2.70 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 31.64 % ของปริมาณอราบิโนสที่มีอยู่ในตัวอย่าง และปริมาณฟรุตโตสสูงสุดที่เวลา 60 นาที มีค่า 2.40 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าว ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ฟรุตโตส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
10	21.37 ± 0.30	11.25 ± 0.21	2.61 ± 0.35	0.00 ± 0.00
20	29.03 ± 0.08	10.95 ± 0.38	2.54 ± 0.18	2.32 ± 0.04
30	24.29 ± 0.25	10.28 ± 0.10	2.07 ± 0.04	0.00 ± 0.00
40	28.01 ± 0.58	8.46 ± 0.09	1.97 ± 0.20	1.40 ± 0.04
60	29.55 ± 0.43	8.10 ± 0.10	2.70 ± 0.13	2.40 ± 0.18
80	23.43 ± 0.25	3.53 ± 0.30	2.16 ± 0.13	1.45 ± 0.02
110	22.86 ± 0.21	2.96 ± 0.19	1.97 ± 0.05	1.64 ± 0.01

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 10 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าว ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที

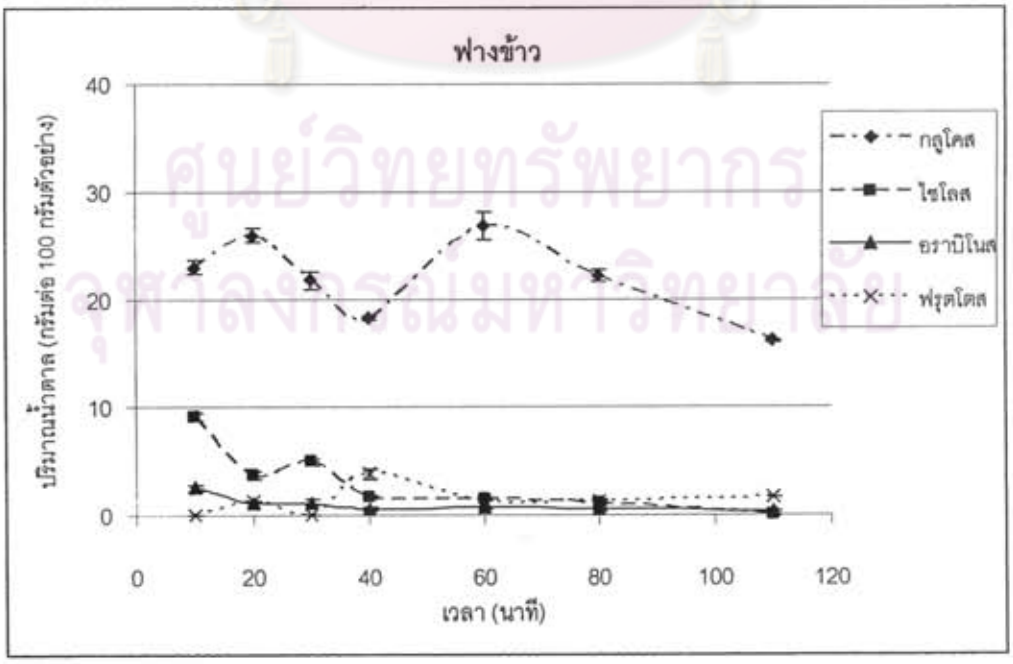
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้ง 4 ชนิด ในตัวอย่างฟางข้าวที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 40% แสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 11 พบปริมาณกลูโคสสูงสุดในตัวอย่างฟางข้าวที่เวลา 60 นาที มีค่า 26.83 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 53.12 % ของปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณไซโลสสูงสุดที่เวลา 10 นาที มีค่า 9.15 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 57.27 % ของปริมาณไซโลสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณอราบิโนสสูงสุดที่เวลา 10 นาที มีค่า 2.55 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 29.28 % ของปริมาณอราบิโนสที่มีอยู่ในตัวอย่าง และปริมาณฟรุตโตสสูงสุดที่เวลา 40 นาทีมีค่า 3.85 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 5 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าว ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ฟรุตโตส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
10	22.93 ± 0.64	9.15 ± 0.39	2.55 ± 0.26	0.00 ± 0.00
20	25.93 ± 0.60	3.79 ± 0.38	1.15 ± 0.12	1.31 ± 0.07
30	21.69 ± 0.79	4.95 ± 0.29	1.17 ± 0.28	0.00 ± 0.00
40	18.25 ± 0.14	1.69 ± 0.12	0.62 ± 0.18	3.85 ± 0.44
60	26.83 ± 1.33	1.47 ± 0.05	0.69 ± 0.10	1.36 ± 0.08
80	22.07 ± 0.54	1.04 ± 0.10	0.48 ± 0.02	1.35 ± 0.04
110	16.13 ± 0.08	0.00 ± 0.00	0.34 ± 0.02	1.65 ± 0.05

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 11 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าว ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 แสดงผลรวมของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนสและฟรุตโตสที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30-40% ในตัวอย่างฟางข้าว พบว่าที่เวลา 20 นาที มีปริมาณน้ำตาลรวมทั้ง 4 ชนิดสูงสุดที่ความเข้มข้นของกรด 30% คือ 44.84 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 59.56% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง แต่เมื่อเพิ่มเวลาไฮโดรไลซ์นานขึ้นเป็น 30-110 นาที พบว่าน้ำตาลทั้ง 4 ชนิดมีปริมาณลดลง ส่วนปริมาณน้ำตาลรวมทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้น 40% มีค่าน้อยกว่าที่ 30% ในทุกช่วงเวลาของการไฮโดรไลซ์

ตารางที่ 6 ผลรวมของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30%-40% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที

% H_2SO_4	เวลา (นาที)	น้ำตาล (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)
30	10	35.23
30	20	44.84
30	30	36.63
30	40	39.83
30	60	42.75
30	80	30.57
30	110	29.43
40	10	34.63
40	20	32.18
40	30	27.81
40	40	24.41
40	60	30.35
40	80	24.94

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

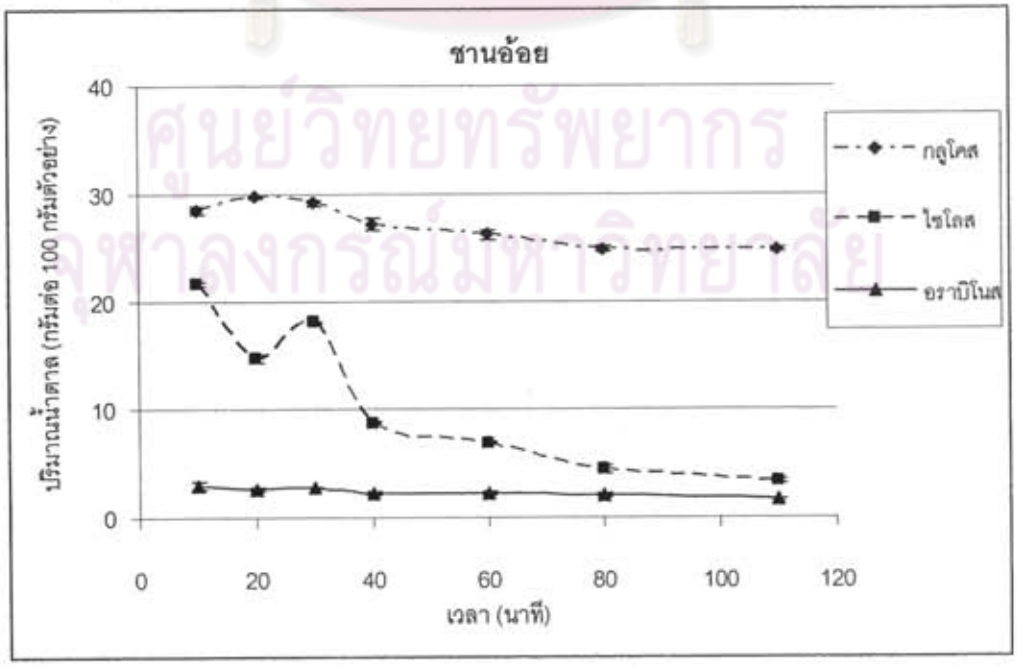
ตัวอย่างชานอ้อย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้ง 4 ชนิด ในตัวอย่างชานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 30% แสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 12 พบปริมาณกลูโคสสูงสุดในตัวอย่างชานอ้อยที่เวลา 20 นาที มีค่า 29.69 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 69.03 % ของปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณไซโลสสูงสุดที่เวลา 10 นาที มีค่า 21.60 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 86.31% ของปริมาณไซโลสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณอราบิโนสสูงสุดที่เวลา 10 นาที มีค่า 2.95 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 31.95 % ของปริมาณอราบิโนสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลฟรุคโตสไม่พบ

ตารางที่ 7 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุคโตส ในตัวอย่างชานอ้อย ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ฟรุคโตส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
10	28.45 ± 0.75	21.60 ± 1.16	2.95 ± 0.22	0.00 ± 0.00
20	29.69 ± 0.41	14.71 ± 0.59	2.54 ± 0.13	0.00 ± 0.00
30	29.16 ± 0.01	18.04 ± 0.25	2.75 ± 0.18	0.00 ± 0.00
40	27.16 ± 0.38	8.77 ± 0.02	2.18 ± 0.01	0.00 ± 0.00
60	26.15 ± 0.35	6.90 ± 0.21	2.25 ± 0.07	0.00 ± 0.00
80	24.78 ± 0.08	4.45 ± 0.17	2.04 ± 0.06	0.00 ± 0.00
110	24.72 ± 0.28	3.43 ± 0.31	1.72 ± 0.12	0.00 ± 0.00

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 12 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุคโตส ในตัวอย่างชานอ้อย ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 30 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที

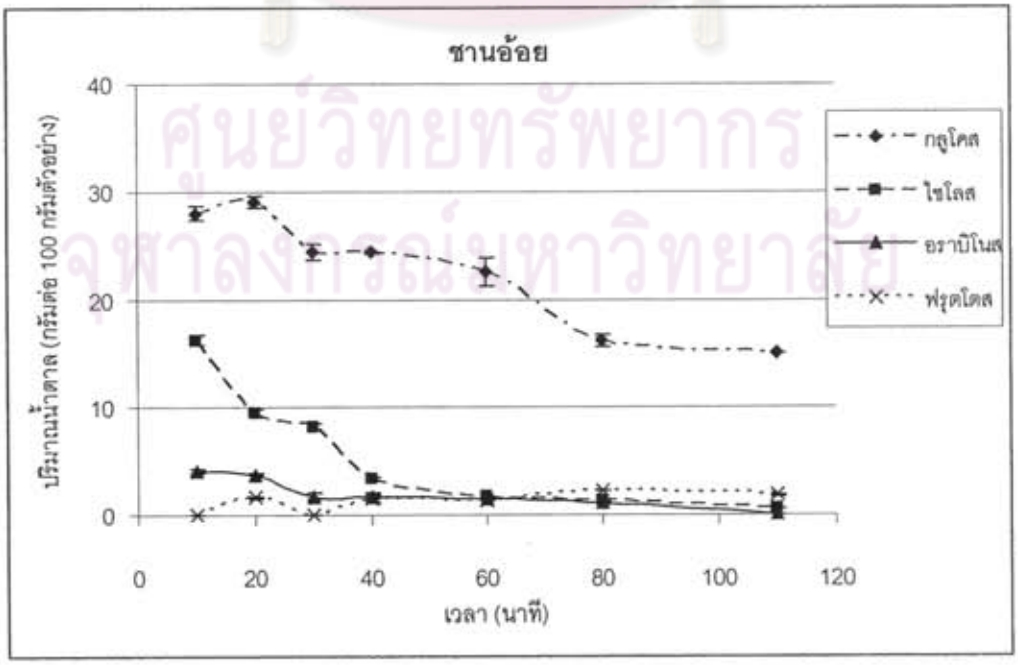
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้ง 4 ชนิด ในตัวอย่างขานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรด 40% แสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 13 พบปริมาณกลูโคสสูงสุดในตัวอย่างขานอ้อยที่เวลา 20 นาที มีค่า 29.05 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 67.57 % ของปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณไซโลสสูงสุดที่เวลา 10 นาที มีค่า 16.26 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 65.00 % ของปริมาณไซโลสที่มีอยู่ในตัวอย่าง ปริมาณอราบิโนสสูงสุดที่เวลา 10 นาที มีค่า 4.10 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 44.66 % ของปริมาณอราบิโนสที่มีอยู่ในตัวอย่าง และปริมาณฟรุตโตสสูงสุดที่เวลา 80 นาที มีค่า 2.27 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 8 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างขานอ้อย ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ฟรุตโตส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
10	27.92 ± 0.67	16.26 ± 0.05	4.10 ± 0.83	0.00 ± 0.00
20	29.05 ± 0.46	9.53 ± 0.83	3.79 ± 0.11	1.62 ± 0.06
30	24.39 ± 0.30	8.22 ± 0.79	1.76 ± 0.21	0.00 ± 0.00
40	24.33 ± 1.35	3.37 ± 0.74	1.69 ± 0.15	1.55 ± 0.07
60	22.52 ± 1.08	1.69 ± 0.38	1.47 ± 0.16	1.34 ± 0.21
80	16.13 ± 1.61	1.22 ± 0.03	1.04 ± 0.01	2.27 ± 0.24
110	15.06 ± 1.00	0.54 ± 0.86	0.00 ± 0.00	1.80 ± 0.04

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 13 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างขานอ้อย ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 40 % ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10-110 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 แสดงผลรวมของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนสและฟรุตโตสในตัวอย่างชานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก พบว่าที่เวลา 10 นาที มีปริมาณน้ำตาลรวมทั้ง 4 ชนิดสูงสุดที่ความเข้มข้นของกรด 30% คือ 53.00 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 68.60% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง แต่เมื่อเพิ่มเวลาไฮโดรไลซ์นานขึ้นเป็น 20-110 นาที พบว่าน้ำตาลทั้ง 4 ชนิดมีปริมาณลดลง ส่วนปริมาณน้ำตาลรวมทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้น 40% มีค่าน้อยกว่าที่ 30% ในทุกช่วงเวลาของการไฮโดรไลซ์และมีค่าสูงสุดที่เวลา 10 นาที

ตารางที่ 9 ผลรวมของน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อราบิโนส และฟรุตโตส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30%-40% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-110 นาที

% H_2SO_4	เวลา (นาที)	น้ำตาล (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)
30	10	53.00
30	20	46.94
30	30	49.95
30	40	38.11
30	60	35.29
30	80	31.27
30	110	29.87
40	10	48.29
40	20	44.00
40	30	34.38
40	40	30.94
40	60	27.01
40	80	20.65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยที่เวลาต่าง ๆ พบว่า การไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวที่เวลา 20 นาที และ 60 นาที ได้ปริมาณกลูโคสสูงใกล้เคียงกัน คือ ที่ความเข้มข้นของกรด 30% มีค่า 29.03 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 29.55 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของกรด 40% มีค่า 25.93 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 26.83 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ แต่ในตัวอย่างชานอ้อย พบว่า ที่เวลา 20 นาทีเท่านั้นที่ให้ปริมาณกลูโคสสูงสุดทั้งความเข้มข้นของกรด 30% และ 40% มีปริมาณ 29.65 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 29.05 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ไม่สามารถอธิบายได้ควรทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกลไกของปฏิกิริยาต่อไป

จากการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความหวานและปริมาณกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย พบเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% เป็นเวลา 20 นาที ปริมาณน้ำตาลสูงสุด ประกอบด้วยกลูโคส ไซโลส อราบิโนสและฟรุตโตส 44.84 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 59.56% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง ส่วนเงื่อนไขที่ดีของการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยคือ กรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% เป็นเวลา 10 นาที ได้ปริมาณน้ำตาล 53 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 68.60% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Clausen et al. [13] ได้ทำการไฮโดรไลซ์เปลือกข้าวโพดโดยใช้ 70% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเจือจางให้ความเข้มข้นของกรดเป็น 31-45% แล้วนำไปไฮโดรไลซ์ต่อที่ 100°C เป็นเวลาประมาณ 15 นาทีพบว่าสามารถ เปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลได้เกือบหมด

5. ผลการย่อยสลายโมเลกุลฟางข้าวและชานอ้อยด้วยรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก

การฉายรังสีทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีขนาดเล็กลง เนื่องจากรังสีจะตัดพันธะกลูโคสิดิกของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้สั้นลง [14,15] โดยขึ้นกับปริมาณรังสีที่ได้รับ การตัดโมเลกุลของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต้องใช้ปริมาณรังสีสูงมาก ซึ่งไม่คุ้มทุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300-1100 kGy จากนั้นนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดเพื่อให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

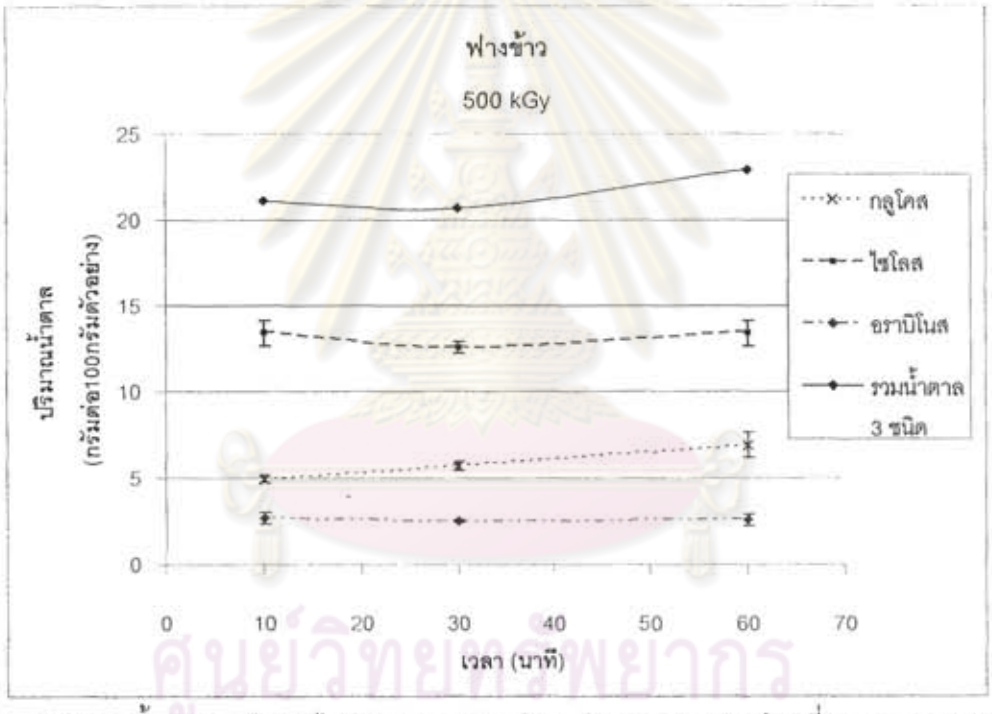
5.1 ผลการย่อยสลายโมเลกุลฟางข้าวด้วยรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก

ผลการย่อยสลายตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 และ 1100 kGy และไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10, 30 และ 60 นาที (ตารางที่ 10-11 และรูปที่ 14-15) พบว่า เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลสและอราบิโนสรวมสูงสุด คือ 22.92 และ 28.24 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ ที่เวลาดังกล่าวได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสสูงสุด แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซ์ต่อไปน้ำตาลไซโลสที่มีอยู่จะสลายตัวไปเป็นสารอื่น ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวฉายรังสีด้วย 2% กรดซัลฟูริก คือ 60 นาที

ตารางที่ 10 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
10	4.95 ± 0.23	13.43 ± 0.74	2.70 ± 0.35	21.08
30	5.67 ± 0.28	12.56 ± 0.36	2.51 ± 0.10	20.73
60	6.92 ± 0.75	13.41 ± 0.74	2.59 ± 0.34	22.92

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



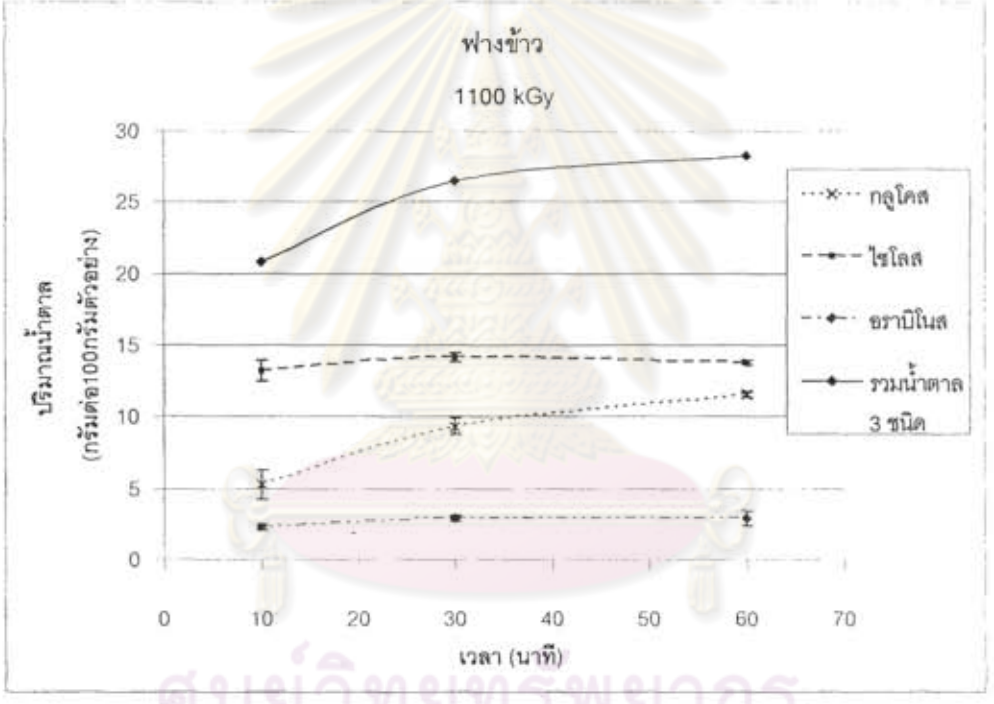
รูปที่ 14 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 11 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
10	5.28 ± 0.99	13.22 ± 0.71	2.27 ± 0.19	20.77
30	9.36 ± 0.60	14.16 ± 0.33	2.92 ± 0.22	26.44
60	11.56 ± 0.21	13.77 ± 0.16	2.91 ± 0.55	28.24

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 15 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

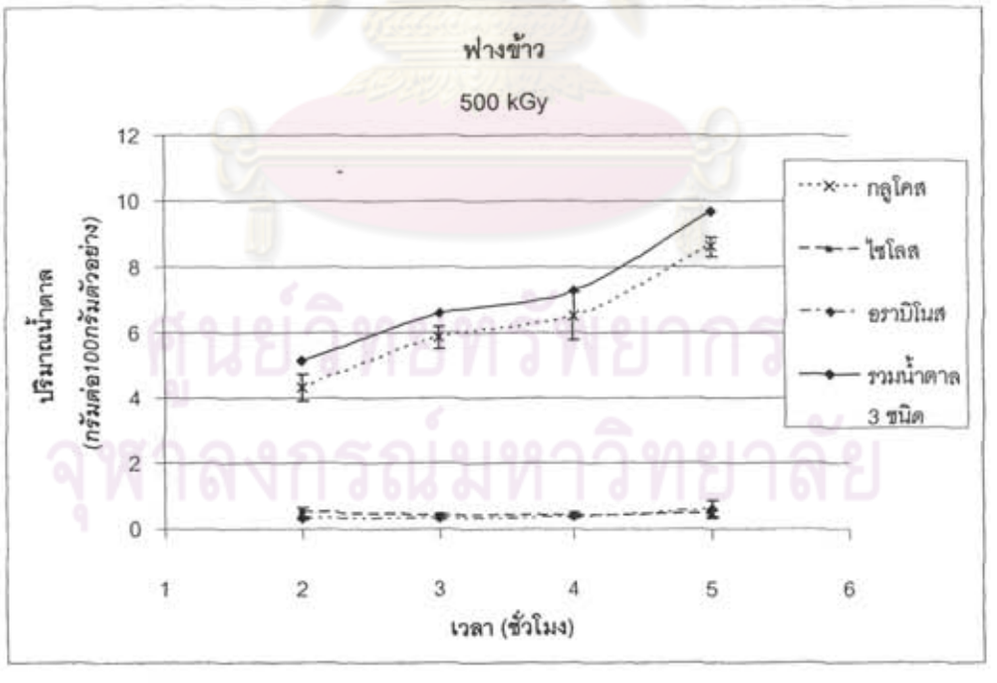
จากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 60 นาที ได้น้ำตาลรวมประมาณ 23% และ 28% ตามลำดับ และมีกากเหลืออยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งในกากดังกล่าวยังมีเซลลูโลสเหลืออยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นจึงนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อโดยแยกเป็น 2 วิธี คือ การไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 2-5 ชั่วโมง และการไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง

ผลการนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 2-5 ชั่วโมง (ตารางที่ 12-13 และรูปที่ 16-17) พบว่า ได้น้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและได้น้ำตาลกลูโคสสูงสุดที่เวลา 5 ชั่วโมง ได้น้ำตาล 3 ชนิดรวมกันสูงสุด คือ 9.66 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 10.56 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ 12 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
2	4.32 ± 0.43	0.50 ± 0.12	0.30 ± 0.01	5.12
3	5.85 ± 0.33	0.42 ± 0.05	0.33 ± 0.04	6.6
4	6.50 ± 0.72	0.42 ± 0.09	0.36 ± 0.00	7.27
5	8.62 ± 0.28	0.45 ± 0.08	0.60 ± 0.27	9.66

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



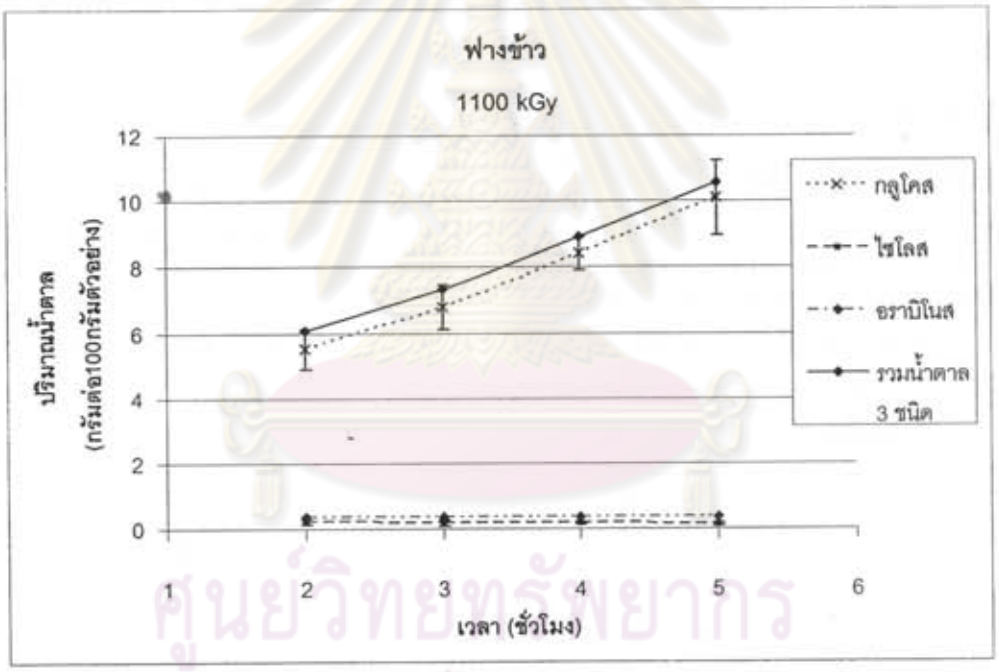
รูปที่ 16 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 13 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
2	5.51 ± 0.60	0.21 ± 0.06	0.37 ± 0.13	6.09
3	6.78 ± 0.68	0.19 ± 0.08	0.37 ± 0.09	7.34
4	8.42 ± 0.49	0.16 ± 0.04	0.35 ± 0.04	8.93
5	10.10 ± 1.15	0.12 ± 0.05	0.34 ± 0.06	10.56

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 17 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการนำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 60 นาที มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง (ตารางที่14-15) พบว่า เวลา 1 ชั่วโมงให้ปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกันสูงสุดคือ 17.79 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง และ 16.86 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
1	15.59 ± 0.35	1.07 ± 0.03	1.13 ± 0.08	17.79
2	14.10 ± 0.61	1.05 ± 0.06	1.05 ± 0.03	16.20

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 15 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
1	15.94 ± 0.56	0.14 ± 0.07	0.78 ± 0.04	16.86
2	13.71 ± 0.37	0.15 ± 0.05	0.76 ± 0.02	14.61

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ที่เวลา 1 ชั่วโมงให้ปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกันสูงกว่าที่เวลาไฮโดรไลซ์ 2 ชั่วโมง และสูงกว่าการไฮโดรไลซ์ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ดังนั้นจากการไฮโดรไลซ์ครั้งแรกด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 60 นาที และนำกากที่เหลือมาทำการไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณน้ำตาลรวมสูงสุด จากนั้นนำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาไฮโดรไลซ์ต่อเป็นครั้งที่ 3 อีก 1 ชั่วโมง (ตารางที่ 16-17) พบปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกัน 10.60 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 3.83 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ และนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อเป็นครั้งที่ 4 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก อีก 1 ชั่วโมง ได้น้ำตาล 3 ชนิดรวม 4.86 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 1.70 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการนำตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และ 1100 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 4 ครั้ง ด้วย 2% และ 15% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 16-17 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 34.20 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 31.24 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 17.79 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 16.56 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ และปริมาณอราบิโนสรวมทั้งหมด 3.75 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง และ 0.78 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

ผลการย่อยสลายโมเลกุลฟางข้าวที่ฉายรังสี 500 kGy และ 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริก ได้ปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกัน 55.74 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 48.58 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 74.03% และ 64.53% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง

ตารางที่ 16 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	1	7.02 ± 0.41	15.47 ± 0.64	0.00 ± 0.00
2	15	1	15.59 ± 0.35	1.07 ± 0.03	1.13 ± 0.08
3	15	1	8.05 ± 0.49	1.25 ± 0.00	1.30 ± 0.02
4	15	1	3.54 ± 0.59	0.00 ± 0.00	1.32 ± 0.00
	รวม		34.20	17.79	3.75

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 17 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	1	9.76 ± 0.60	16.43 ± 0.43	0.00 ± 0.00
2	15	1	15.94 ± 0.56	0.14 ± 0.07	0.78 ± 0.04
3	15	1	3.83 ± 0.32	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
4	15	1	1.70 ± 1.70	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	รวม		31.24	16.56	0.78

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ดังนั้นในการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy, 700 kGy และ 900 kGy ทำได้โดยนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 4 ครั้ง ด้วย 2% และ 15% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ผลไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy (ตารางที่ 18) พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 28.07 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 15.34 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลอราบิโนสไม่พบ

ตารางที่ 18 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	1	4.67 ± 0.55	15.08 ± 0.80	0.00 ± 0.00
2	15	1	11.78 ± 0.00	0.26 ± 0.00	0.00 ± 0.00
3	15	1	7.76 ± 1.18	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
4	15	1	3.86 ± 0.47	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	รวม		28.07	15.34	0.00

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ผลไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy (ตารางที่ 19) พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 31.70 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 16.27 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลอราบิโนสไม่พบ

ตารางที่ 19 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	1	8.56 ± 0.50	16.27 ± 1.48	0.00 ± 0.00
2	15	1	16.09 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
3	15	1	5.04 ± 1.18	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
4	15	1	2.01 ± 0.47	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
รวม			31.70	16.27	0.00

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ผลไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy (ตารางที่ 20) พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 32.02 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 16.33 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลอราบิโนสไม่พบ

ตารางที่ 20 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างฟางข้าวทีผ่านการฉายรังสี 900 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	1	10.39 ± 0.50	16.33 ± 1.48	0.00 ± 0.00
2	15	1	15.56 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
3	15	1	3.69 ± 1.18	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
4	15	1	2.38 ± 0.47	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
รวม			32.02	16.33	0.00

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลฟางข้าวฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy ดังตารางที่ 21 พบว่า ปริมาณกลูโคส ไซโลส และอราบิโนสมีค่าสูงสุดที่ปริมาณรังสี 500 kGy และที่ปริมาณรังสีมากกว่า 500 kGy ปริมาณน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่ปริมาณรังสี 900 kGy ปริมาณกลูโคสมีค่าสูงกว่าที่ปริมาณรังสี 700 และ 1100 kGy เล็กน้อย

ตารางที่ 21 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลฟางข้าวฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy

ปริมาณรังสี (kGy)	กลูโคส (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)
300	28.07	15.34	0.00
500	34.20	17.79	3.75
700	31.70	16.27	0.00
900	32.02	16.33	0.00
1100	31.24	16.56	0.78

ตารางที่ 22 แสดงปริมาณน้ำตาลรวม 3 ชนิด ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลฟางข้าวฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 – 1100 kGy พบว่า ที่ปริมาณรังสี 500 kGy ให้ปริมาณน้ำตาลรวมสูงสุดที่ 55.74 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 74.03% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในฟางข้าว ดังนั้นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับฉายรังสีฟางข้าว คือ 500 kGy

ตารางที่ 22 ปริมาณน้ำตาลรวม 3 ชนิด ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลฟางข้าวฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy

ปริมาณรังสี (kGy)	ปริมาณน้ำตาลรวม (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)
300	43.41
500	55.74
700	47.96
900	48.35
1100	48.58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

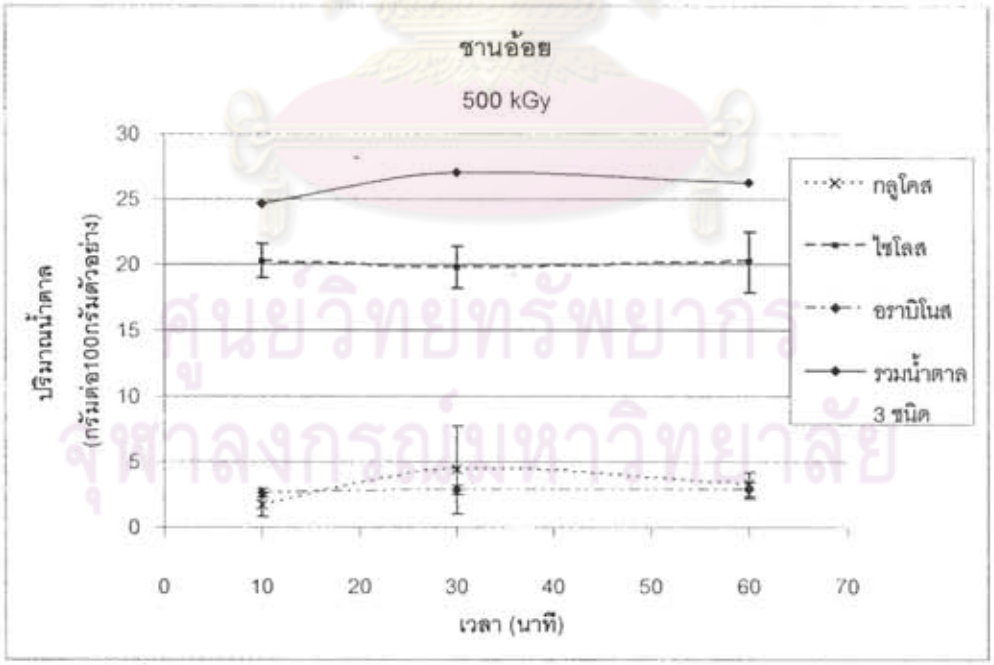
5.2 ผลการย่อยสลายโมเลกุลชานอ้อยด้วยรังสีร่วมกับกรดซัลฟูริก

ผลการย่อยสลายตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 และ 1100 kGy และไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10, 30 และ 60 นาที (ตารางที่ 23-24 และรูปที่ 18-19) พบว่า เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 30 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลสและอราบิโนสรวมสูงสุด คือ 27.01 และ 32.18 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยฉายรังสีด้วย 2% กรดซัลฟูริก คือ 30 นาที

ตารางที่ 23 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
10	1.72 ± 0.88	20.28 ± 1.33	2.62 ± 0.31	24.63
30	4.38 ± 3.38	19.79 ± 1.60	2.85 ± 0.36	27.01
60	3.24 ± 0.91	20.20 ± 2.33	2.80 ± 0.61	26.24

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



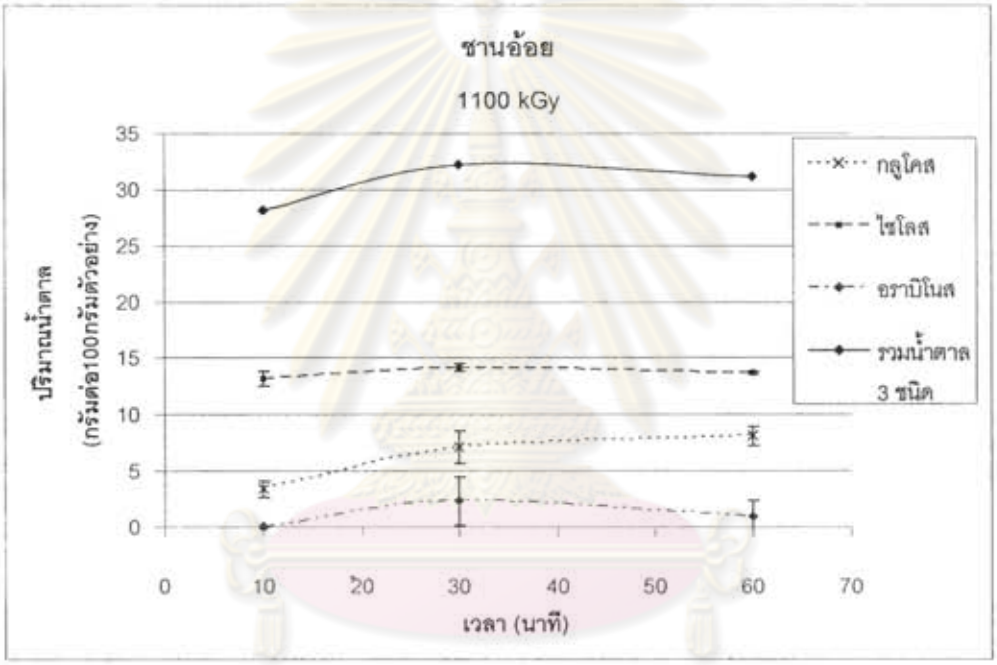
รูปที่ 18 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 24 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

เวลา (นาที)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
10	3.41 ± 0.75	13.22 ± 0.71	0.00 ± 0.00	28.09
30	7.12 ± 1.43	14.16 ± 0.33	2.34 ± 2.21	32.18
60	8.14 ± 0.88	13.77 ± 0.16	0.88 ± 1.52	31.15

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 19 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10-60 นาที

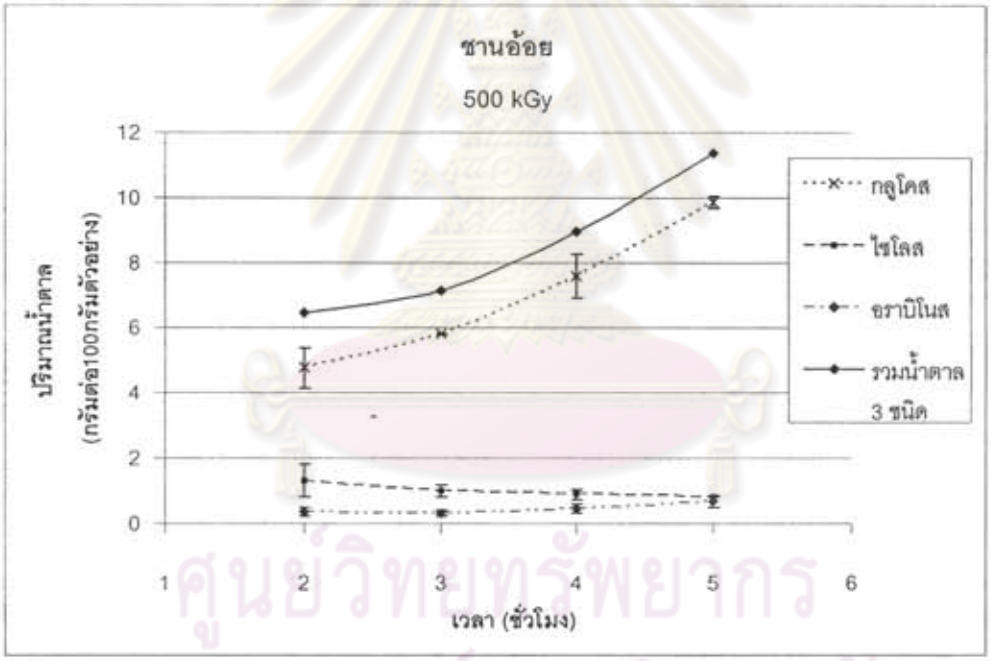
จากการไฮโดรไลซ์ซานอ้อยที่ฉายรังสี 500 และ 1100 kGy ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 30 นาที ได้น้ำตาลรวมประมาณ 27% และ 32% ตามลำดับ และนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อเหมือนกับการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวที่ฉายรังสีโดยแยกเป็น 2 วิธี คือ การไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 2-5 ชั่วโมง และการไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง

ผลการนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นระยะเวลา 2-5 ชั่วโมง (ตารางที่ 25-26 และรูปที่ 20-21) พบว่า ได้น้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและได้น้ำตาลกลูโคสสูงสุดที่เวลา 5 ชั่วโมง ได้น้ำตาลรวมกันสูงสุด คือ 11.35 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง และ 12.58 กรัมต่อ 100กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ 25 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
2	4.76 ± 0.62	1.32 ± 0.51	0.37 ± 0.14	6.45
3	5.80 ± 0.04	0.99 ± 0.18	0.34 ± 0.09	7.13
4	7.58 ± 0.68	0.90 ± 0.16	0.46 ± 0.13	8.94
5	9.86 ± 0.20	0.83 ± 0.03	0.66 ± 0.16	11.35

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



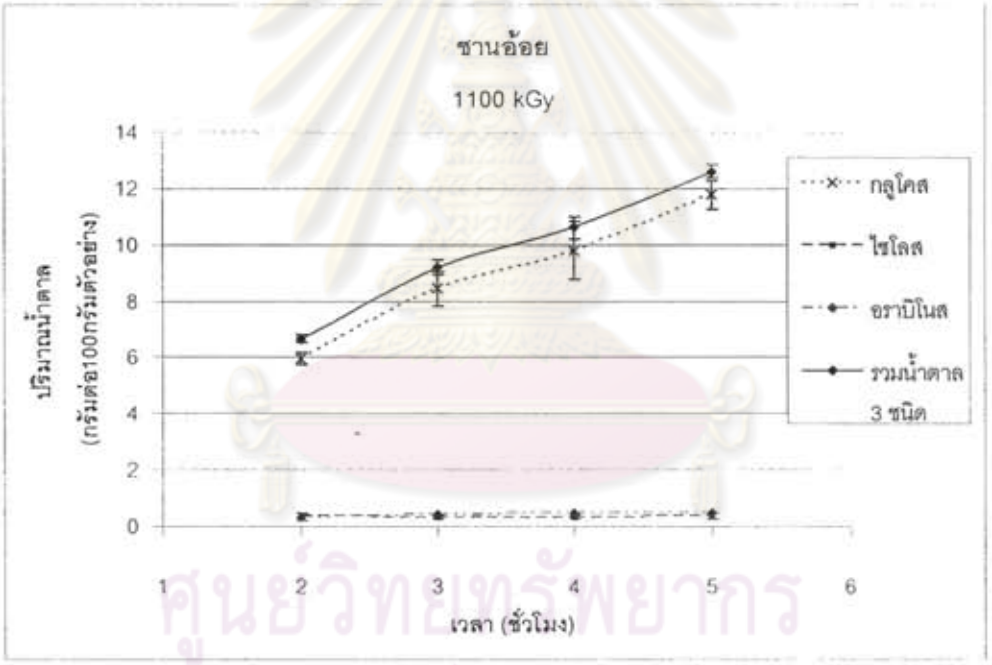
รูปที่ 20 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 26 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
2	5.98 ± 0.21	0.36 ± 0.13	0.33 ± 0.06	6.66
3	8.43 ± 0.61	0.32 ± 0.06	0.43 ± 0.10	9.18
4	9.79 ± 1.03	0.33 ± 0.07	0.48 ± 0.07	10.60
5	11.77 ± 0.50	0.35 ± 0.11	0.46 ± 0.11	12.58

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 21 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 2%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการนำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ด้วย 2%กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 30 นาที มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง (ตารางที่ 27-28) พบว่า เวลา 1 ชั่วโมงให้ปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกันสูงสุด คือ 22.20 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่างสำหรับตัวอย่างชานอ้อยที่ฉายรังสี 1100 kGy ส่วนชานอ้อยที่ฉายรังสี 500 kGy พบว่าที่ 1 และ 2 ชั่วโมงมีค่าใกล้กันคือ 19.37 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 19.55 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 27 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
1	18.38 ± 0.61	0.31 ± 0.03	0.67 ± 0.05	19.37
2	18.78 ± 0.31	0.16 ± 0.07	0.61 ± 0.07	19.55

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ตารางที่ 28 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ชานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15%กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	รวมน้ำตาล 3 ชนิด (กรัมต่อ100กรัม ตัวอย่าง)
1	21.23 ± 0.06	0.10 ± 0.05	0.87 ± 0.02	22.20
2	19.12 ± 1.22	0.07 ± 0.01	0.90 ± 0.09	20.09

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ที่เวลา 1 ชั่วโมงให้ปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกันสูงกว่าที่เวลาไฮโดรไลซ์ 2 ชั่วโมง และสูงกว่าการไฮโดรไลซ์ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ดังนั้นจากการไฮโดรไลซ์ครั้งแรกด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 30 นาที และนำกากที่เหลือมาทำการไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณน้ำตาลรวมสูงสุด จากนั้นนำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาไฮโดรไลซ์ต่อเป็นครั้งที่ 3 อีก 1 ชั่วโมง (ตารางที่ 28-29) พบปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกัน 9.90 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 5.56 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ และนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อเป็นครั้งที่ 4 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก อีก 1 ชั่วโมง ได้น้ำตาล 3 ชนิดรวม 3.70 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 2.01 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

ผลการนำตัวอย่างขานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และ 1100 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 4 ครั้ง ด้วย 2% และ 15% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 29-30 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 35.63 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 36.26 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 25.92 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 25.46 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และปริมาณอราบิโนสรวมทั้งหมด 1.44 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 1.59 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

ผลการย่อยสลายโมเลกุลขานอ้อยที่ฉายรังสี 500 kGy และ 1100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริก ได้ปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดรวมกัน 62.99 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง และ 63.31 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 81.54 และ 81.96 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง

ตารางที่ 29 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างขานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	30 นาที	4.52 ± 0.42	25.50 ± 1.21	0.00 ± 0.00
2	15	1 ชั่วโมง	18.38 ± 0.61	0.31 ± 0.03	0.67 ± 0.05
3	15	1 ชั่วโมง	9.03 ± 0.20	0.10 ± 0.05	0.77 ± 0.02
4	15	1 ชั่วโมง	3.70 ± 0.25	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
รวม			35.63	25.92	1.44

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 30 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 1100 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	30 นาที	8.23 ± 0.11	25.31 ± 0.46	0.00 ± 0.00
2	15	1 ชั่วโมง	21.23 ± 0.06	0.10 ±0.05	0.87 ± 0.02
3	15	1 ชั่วโมง	4.78 ± 0.02	0.06 ± 0.07	0.72 ± 0.06
4	15	1 ชั่วโมง	2.01 ± 0.45	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	รวม		36.26	25.46	1.59

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ดังนั้นในการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy, 700 kGy และ 900 kGy ทำได้โดยนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 4 ครั้ง ด้วย 2% และ 15% กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 2% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ผลไฮโดรไลซ์ตัวอย่างซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy (ตารางที่ 31) พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 33.73 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 25.97 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลอราบิโนส 0.79 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 31 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างซานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	30 นาที	3.45 ± 0.23	25.50 ± 0.50	0.00 ± 0.00
2	15	1 ชั่วโมง	15.97 ± 0.78	0.48 ± 0.01	0.00 ± 0.00
3	15	1 ชั่วโมง	9.21 ± 0.19	0.00 ± 0.01	0.79 ± 0.06
4	15	1 ชั่วโมง	5.11 ± 0.18	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	รวม		33.73	25.97	0.79

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลไฮโดรไลซ์ตัวอย่างขานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy (ตารางที่ 32) พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 36.53 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 25.92 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลอราบิโนส 1.98 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 32 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างขานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	30 นาที	4.55 ± 0.20	25.25 ± 0.58	0.35 ± 0.00
2	15	1 ชั่วโมง	21.68 ± 0.97	0.58 ± 0.19	0.84 ± 0.11
3	15	1 ชั่วโมง	7.42 ± 0.37	0.10 ± 0.05	0.79 ± 0.07
4	15	1 ชั่วโมง	2.88 ± 0.55	0.00 ± 0.15	0.00 ± 0.07
รวม			36.53	25.92	1.98

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ผลไฮโดรไลซ์ตัวอย่างขานอ้อยที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy (ตารางที่ 33) พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้งได้ปริมาณกลูโคสรวมทั้งหมด 36.10 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลสรวมทั้งหมด 24.87 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลอราบิโนส 1.95 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 33 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ในตัวอย่างขานอ้อยทีผ่านการฉายรังสี 900 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 120 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา	กลูโคส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง)
1	2	30 นาที	6.75 ± 0.24	24.55 ± 0.59	0.35 ± 0.00
2	15	1 ชั่วโมง	21.97 ± 0.31	0.16 ± 0.05	0.81 ± 0.00
3	15	1 ชั่วโมง	5.00 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.79 ± 0.02
4	15	1 ชั่วโมง	2.38 ± 0.07	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
รวม			36.10	24.87	1.95

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลซานอ้อยฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy ดังตารางที่ 34 พบว่า ปริมาณกลูโคสและอราบิโนสที่ได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่มากขึ้นและเริ่มคงที่ที่ปริมาณรังสี 700 kGy ส่วนปริมาณไซโลสคงที่ (ไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น) ดังนั้นตัวแปรสำคัญ คือ ปริมาณกลูโคส ซึ่งมีปริมาณสูงสุดที่ 700 kGy มีค่า 36.53 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 34 ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลซานอ้อยฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy

ปริมาณรังสี (kGy)	กลูโคส (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)	ไซโลส (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)	อราบิโนส (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)
300	33.73	25.97	0.79
500	35.63	25.92	1.44
700	36.53	25.92	1.98
900	36.10	24.87	1.95
1100	36.26	25.46	1.59

ปริมาณน้ำตาลรวม 3 ชนิด ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลซานอ้อยฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 - 1100 kGy ดังตารางที่ 35 พบว่า ที่ปริมาณรังสี 700 kGy ให้ปริมาณน้ำตาลรวมสูงสุดที่ 64.43 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 83.41 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในซานอ้อย ดังนั้นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับฉายรังสีซานอ้อย คือ 700 kGy

ตารางที่ 35 ปริมาณน้ำตาลรวม 3 ชนิด ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลซานอ้อยฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 300 – 1100 kGy

ปริมาณรังสี (kGy)	ปริมาณน้ำตาลรวม (กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง)
300	60.49
500	62.99
700	64.43
900	62.92
1100	63.31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นของกรดต่างกัน พบว่า การไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อยที่ใช้กรดซัลฟูริกเจือจางไม่มีน้ำตาลฟรุตโตส แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดมากขึ้น (≥ 30%) พบว่ามีน้ำตาลฟรุตโตสเกิดขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากกลไกของปฏิกิริยาที่แตกต่างกันระหว่างกรดเข้มข้นและกรดเจือจางกับตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย ส่งผลให้เกิดฟรุตโตสเมื่อใช้กรดเข้มข้น

6. ผลการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเช่นกลูโคส ไซโลสจากสภาวะที่เหมาะสม

ตัวอย่างฟางข้าว

จากการวิจัยหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลกลูโคส ไซโลส จากฟางข้าว พบว่า มี 2 วิธี ได้แก่ การใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง ดังนั้นจึงทำการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจาก 2 วิธีดังกล่าว

1. การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น

การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากตัวอย่างฟางข้าวโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 77% ในอัตราส่วนฟางข้าวต่อกรดเท่ากับ 1:1.5 ในขั้นตอนนี้กรดจะทำหน้าที่เปลี่ยนฟางข้าวที่อยู่ในรูปผลึกให้เป็นอันยรูปซึ่งง่ายต่อการไฮโดรไลซ์ จากนั้นเจือจางกรดให้มีความเข้มข้น 30% และทำการไฮโดรไลซ์ต่อที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20 นาที จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอย่างสมบูรณ์ ผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตน้ำตาลได้ 43.05 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 57.18% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 28.27 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลไซโลส 11.13 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอราบิโนส 2.22 กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลฟรุตโตส 1.43 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และสารละลายของน้ำตาลที่ได้มีสีเหลืองซึ่งเป็นสีของฟางข้าวที่ละลายออกมา

2. การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง

การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากตัวอย่างฟางข้าวโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก ทำการฉายรังสีตัวอย่างฟางข้าวที่ 500 kGy เพื่อทำให้โมเลกุลของฟางข้าวมีขนาดเล็กลงทำให้ง่ายต่อการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด จากนั้นนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส และนำกากมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง เพื่อย่อยโมเลกุลของเซลลูโลสให้หมด โดยใช้อุณหภูมิ 120 °C ในการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้ง ผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตน้ำตาลได้ทั้งหมด 53.06 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 70.48% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 33.62 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลไซโลส 18.86 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลอราบิโนส 0.59 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตัวอย่างชานอ้อย

จากการวิจัยหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลกลูโคส ไซโลส จากชานอ้อย พบว่า มี 2 วิธี ได้แก่ การใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นและการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง ดังนั้นจึงทำการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจาก 2 วิธีดังกล่าว

1. การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น

การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากตัวอย่างชานอ้อยโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 77% ในอัตราส่วนชานอ้อยต่อกรดเท่ากับ 1:1.5 เหมือนกับการไฮโดรไลซ์ฟางข้าว จากนั้นเจือจางกรดให้มีความเข้มข้น 30% และทำการไฮโดรไลซ์ต่อที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอย่างสมบูรณ์ ผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตน้ำตาลได้ 51.13 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 66.18% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 27.30 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลไซโลส 22.47 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลอราบิโนส 1.36 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากชานอ้อยมีสีเหลืองอ่อนกว่าที่ได้จากฟางข้าว

2. การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง

การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากตัวอย่างชานอ้อยโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก ทำการฉายรังสีตัวอย่างชานอ้อยที่ 700 kGy เพื่อทำให้โมเลกุลของชานอ้อยมีขนาดเล็กลงเพื่อให้ง่ายต่อการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด จากนั้นนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2% เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส และไฮโดรไลซ์กากที่เหลือด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง เพื่อย่อยโมเลกุลของเซลลูโลสให้หมด โดยใช้อุณหภูมิ 120 °C ในการไฮโดรไลซ์ทั้ง 4 ครั้ง ผลการวิจัยนี้สามารถผลิตน้ำตาลได้ทั้งหมด 62.29 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 80.63% ของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 36.07 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลไซโลส 25.50 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลอราบิโนส 0.71 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

7. การกำจัดกรดซัลฟูริกออกจากสารละลายน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริก

จากการไฮโดรไลซ์ฟางข้าวด้วยกรดซัลฟูริกทำให้สารละลายของน้ำตาลที่ได้ปนอยู่กับกรดที่มีความเข้มข้น 30% (กรณีที่ใช้กรดเข้มข้น) และความเข้มข้น 15% (กรณีที่ใช้รังสีร่วมกับกรดเจือจาง) ทำให้ต้องแยกกรดออกจากน้ำตาล ในการกำจัดกรดมี 2 วิธี ได้แก่ การทำให้สารละลายเป็นกลาง โดยการสะเทินด้วยด่าง (Neutralize) หรือ การแยกกรดออกจากน้ำตาลโดยใช้ ion exchange resin งานวิจัยนี้เลือกใช้เรซินชนิด DOWEX M-43 เนื่องจากสามารถแยกกรดที่มีความเข้มข้นปานกลาง (15%) ออกจากสารละลายของน้ำตาล ทำให้ได้สารละลายน้ำตาลที่ปราศจากกรดและไม่มีตะกอนในสารละลาย ในขณะที่เรซินชนิดอื่นไม่สามารถทำได้

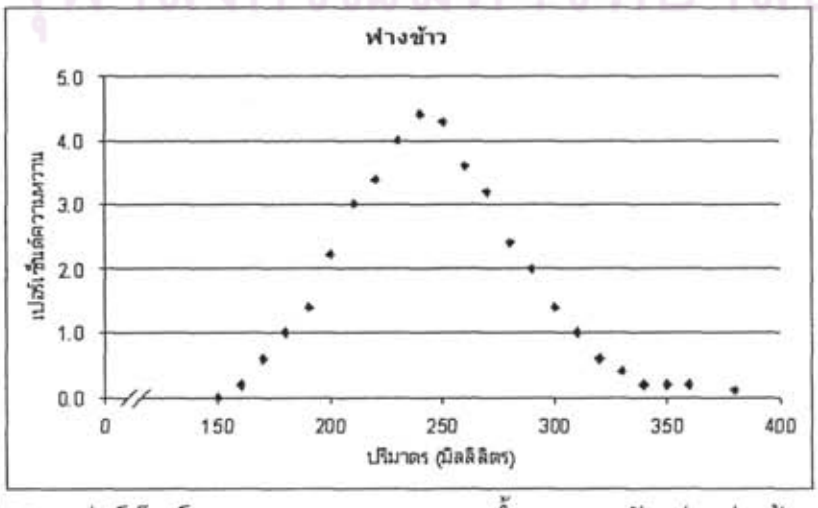
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจาก DOWEX M-43 จะจับกรดและสะเทินกรดใน resin bead ทำให้ไม่สามารถนำกรดกลับมา concentrate เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การศึกษาหาชนิดของเรซินที่เหมาะสมที่สามารถแยกกรดที่มีความเข้มข้นปานกลางออกจากสารละลายของน้ำตาลและสามารถนำกรดกลับมาใช้ใหม่เป็นเรื่องที่ควรศึกษาวิจัยต่อไป

ผลการกำจัดกรดซัลฟูริกออกจากสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย โดยใช้เรซินชนิด DOWEX M-43 มีดังนี้

<u>ตัวอย่างฟางข้าว</u>

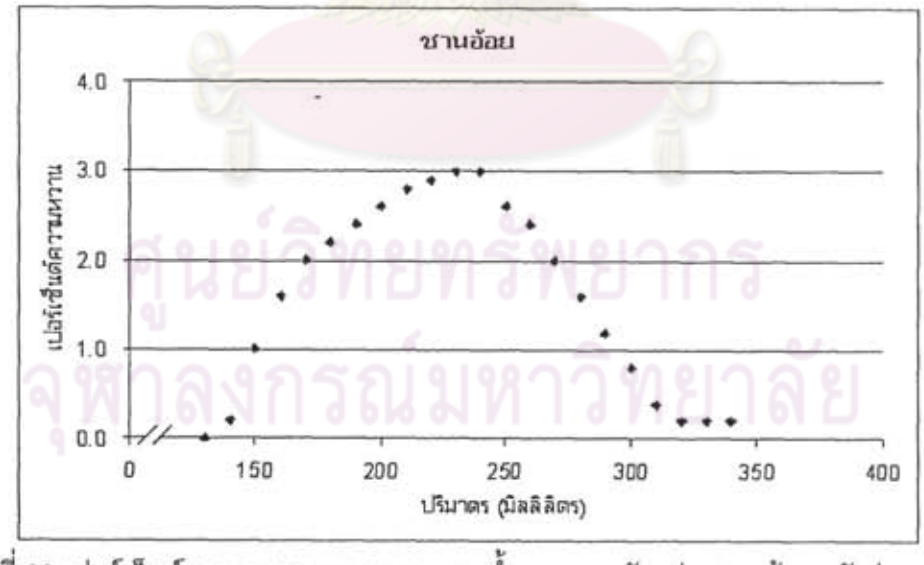
ผลการนำสารละลายน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที มาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของกรด 15% จากนั้นนำมาแยกเอากรดออกด้วย Ion exchange resin พบว่าต้องใช้เรซิน 2 bed volume (1 bed volume มีปริมาตร 98 มิลลิลิตร) จึงสามารถแยกกรดออกจากน้ำตาลได้หมด รูปที่ 22 แสดงเปอร์เซ็นต์ความหวานในสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากคอลัมน์ที่สองพบว่า สารละลายของน้ำตาลที่จัดเก็บที่ปริมาตร 160 มิลลิลิตรเริ่มวัดเปอร์เซ็นต์ความหวานได้ 0.2% จากนั้นเปอร์เซ็นต์ความหวานค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่เพิ่มขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์ความหวานสูงสุด 4.4% ที่ปริมาตร 240 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์ความหวานค่อย ๆ ลดลง จนถึงปริมาตรที่ 360 มิลลิลิตรจึงหยุดเก็บเนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความหวานน้อยมาก ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในสารละลายของน้ำตาลก่อนนำไปผ่านเรซินและหลังผ่านเรซิน พบว่า ปริมาณน้ำตาลก่อนการผ่านเรซินมีปริมาณกลูโคส 28.10 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลส 10.95 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณอราบิโนส 0.67 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และปริมาณฟรุตโตส 1.62 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และเมื่อผ่านเรซินพบว่ามีปริมาณกลูโคส 27.10 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลส 10.08 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณอราบิโนส 0.52 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่าง และปริมาณฟรุตโตส 1.57 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และเมื่อรวมปริมาณน้ำตาลทั้ง 4 ชนิดพบว่าปริมาณน้ำตาลก่อนผ่านเรซินมีค่า 41.35 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และหลังผ่านเรซินมีค่า 39.27 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ดังนั้นปริมาณน้ำตาลที่ได้หลังผ่านเรซินคิดเป็น 94.97% เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลก่อนผ่านเรซิน



รูปที่ 22 เปอร์เซ็นต์ความหวานของสารละลายน้ำตาลจากตัวอย่างฟางข้าวหลังผ่านเรซิน

ตัวอย่างซานอ้อย

ผลการนำสารละลายน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างซานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 30% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที มาเจือจางด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นของกรด 15% จากนั้นนำมาแยกเอากรดออกด้วย Ion exchange resin พบว่าต้องใช้เรซิน 2 bed volume (1 bed volume มีปริมาตร 98 มิลลิลิตร) จึงสามารถแยกกรดออกจากน้ำตาลได้หมด รูปที่ 23 แสดงเปอร์เซ็นต์ความหวานในสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากคอลัมน์ที่สองพบว่า สารละลายของน้ำตาลที่จัดเก็บที่ปริมาตร 130 มิลลิลิตรเริ่มวัดเปอร์เซ็นต์ความหวานได้ 0.2% จากนั้นเปอร์เซ็นต์ความหวานค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่เพิ่มขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์ความหวานสูงสุด 3.0% ที่ปริมาตร 230-240 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์ความหวานค่อย ๆ ลดลง จนถึงปริมาตรที่ 330 มิลลิลิตรจึงหยุดเก็บเนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความหวานน้อยมาก ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในสารละลายของน้ำตาลก่อนนำไปผ่านเรซินและหลังผ่านเรซิน พบว่า ปริมาณน้ำตาลก่อนการผ่านเรซินมีปริมาณกลูโคส 28.04 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลส 21.27 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และปริมาณอราบิโนส 1.41 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และเมื่อผ่านเรซินพบว่ามีปริมาณกลูโคส 27.48 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ปริมาณไซโลส 18.57 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และปริมาณอราบิโนส 1.20 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และเมื่อรวมปริมาณน้ำตาลทั้ง 3 ชนิดพบว่าปริมาณน้ำตาลก่อนผ่านเรซินมีค่า 50.72 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และหลังผ่านเรซินมีค่า 47.26 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ดังนั้น ปริมาณน้ำตาลที่ได้หลังผ่านเรซินคิดเป็น 93.17 % เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลก่อนผ่านเรซิน



รูปที่ 23 เปอร์เซ็นต์ความหวานของสารละลายน้ำตาลจากตัวอย่างซานอ้อยหลังผ่านเรซิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

ผลการวิจัยของการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนสจากฟางข้าวและชานอ้อย พบว่า สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การไฮโดรไลซ์โมเลกุลของตัวอย่างด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นและการฉายรังสีแกมมาตัวอย่างร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง

เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นประกอบด้วยการเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 77% ลงในตัวอย่าง (ฟางข้าวหรือชานอ้อย) กรดจะตัด hydrogen bond ระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลส ส่งผลให้ โครงสร้างที่เป็นผลึกของเซลลูโลส เปลี่ยนเป็นอะมอฟัส (มีลักษณะคล้ายเจลาติน) จากนั้นเติมน้ำลงไปเพื่อเจือจางกรดให้มีความเข้มข้นประมาณ 30% แล้วทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาทีสำหรับฟางข้าวและ 10 นาทีสำหรับชานอ้อย จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ฟางข้าว 100 กรัมสามารถผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ 44 .84 กรัม คิดเป็น 59.56% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง และชานอ้อย 100 กรัมสามารถผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ คือ 53.00 กรัม คิดเป็น 68.60% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง

การฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ประกอบด้วยการนำฟางข้าวและชานอ้อยไปฉายรังสีแกมมา เพื่อถ่ายเทพลังงานของรังสีไปสู่โครงสร้างโมเลกุลของฟางข้าวและชานอ้อย ซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ เมื่อฉายรังสีที่ปริมาณรังสีสูงมากพอจะทำให้โมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์มีขนาดเล็กลงและง่ายต่อการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด สำหรับปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการฉายรังสีฟางข้าวและชานอ้อย คือ 500 และ 700 kGy ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง โดยในครั้งแรกทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงสำหรับฟางข้าว (หรือ 30 นาทีสำหรับชานอ้อย) เพื่อไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส จากนั้นนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15% ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง เพื่อย่อยโมเลกุลของเซลลูโลสให้หมด วิธีการนี้ฟางข้าว 100 กรัม สามารถผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ 55.74 กรัม คิดเป็น 74.03% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่างและชานอ้อย 100 กรัมสามารถผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ คือ 64.43 กรัม คิดเป็น 83.41% ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง วิธีที่สองนี้สามารถผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้มากกว่าวิธีแรก 11% สำหรับฟางข้าวและชานอ้อย

ในการผลิตน้ำตาลโดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นต้องคำนึง ถึงการใช้กรดอย่างคุ้มค่า เพราะต้นทุนการผลิตน้ำตาลด้วยวิธีนี้ขึ้นกับปริมาณและราคาของกรดที่ใช้ การลดต้นทุนการผลิตทำได้โดยการแยกกรดออกจากสารละลายน้ำตาลเพื่อนำกรดที่เหลือมาทำให้เข้มข้นอีกครั้งและนำกลับไปใช้ใหม่ การแยกกรดออกจากน้ำตาล สามารถทำได้โดยใช้ ion exchange resin หรือ ion exclusion resin การแยกกรดออกจากน้ำตาลในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ion exchange resin ชนิด DOWEX M-43 ซึ่งพบว่าสามารถ

แยกกรดออกจากน้ำตาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถแยกสารละลายของน้ำตาลออกจากกรดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และได้ Recovery Yield ของน้ำตาล 93-95 เปอร์เซ็นต์ การแยกกรดออกจากน้ำตาลโดยวิธีนี้มีข้อเสียที่ไม่สามารถนำกรดกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงควรมีการศึกษาวิจัยต่อไปในเรื่องการแยกกรดออกจากน้ำตาลด้วยวิธีอื่น เช่น ion exclusion resin โดยไม่ทำให้ความเข้มข้นของน้ำตาลเจือจางลงและสามารถนำกรดกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การผลิตน้ำตาลโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดเจือจางมีข้อดีที่ใช้กรดเจือจาง 2% และ 15% ทำให้เสียค่าใช้จ่ายต่ำและได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวสูงกว่าวิธีการใช้กรดเข้มข้น แต่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการฉายรังสีแกมมาตัวอย่างก่อนนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรด

ในช่วงสุดท้ายของการวิจัยเป็นการนำผลการวิจัยถ่ายทอดให้กับเกษตรกรและผู้ที่เกี่ยวข้องโดยมีผู้มารับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าวและขานอ้อยประมาณ 40 คนดังภาพในภาคผนวก ฉ ซึ่งการถ่ายทอดเทคโนโลยีในครั้งนี้ได้รับผลสำเร็จด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Aguilar, R., Ramirez, J.A., Garrote, G. and Vazquez, M. " Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse", Journal of Engineering Vol. 55, 2002 pp. 309-318.
2. Philipp, B. "Degradation of Cellulose - Mechanisms and Applications", Pure and Applied Chemistry, Vol. 56, No. 3, 1984, pp. 391-402.
3. ขวัญชนก จันทร์สว่าง. "การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.
4. ชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์. "การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2005.
5. เมธา วรรณพัฒน์. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. กรุงเทพมหานคร : ฟันนี่พับบลิชชิ่ง, 2529.
6. 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
7. Van Soest, P.J. and Wine, R.H. "Determination of lignin and cellulose in acid-detergent fiber with permanganate", Journal of the Association of Official Analytical Chemists, Vol. 51, 1968, pp. 780-785
8. ASTM E 1821 – 01, Standard Test Method for Determination of Carbohydrates in Biomass by Gas Chromatography, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States
9. B.L. Maiorella, Ethanol. In: M. Young, Editor, Comprehensive biotechnology vol. 3, Pergamon Press, Oxford (1985), pp. 861–914.
10. G. Garrote, H. Dominguez and J.C. Parajo, "Autohydrolysis of corncob: study of non-isothermal operation for xylooligosaccharide production", Journal of Food Engineering 52, 2002, pp. 211–218.
11. B.C. Saha, "Hemicellulose bioconversion", Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology 30, 2003, pp. 279–291.

เอกสารอ้างอิง

12. I.C. Roberto, S.I. Mussatto and R.C.L.B. Rodrigues, "Dilute-acid hydrolysis for optimization of xylose recovery from rice straw in a semi-pilot reactor", Industrial Crops and Products 17, Issue 3, 2003, pp. 171–176.
13. Clausen. "Concentrated sulfuric acid process for converting lignocellulosic materials to sugars" United States Patent 5188673, 1993
14. Charlesby, A., 1960. Atomic Radiation and Polymers. Pergamon Press, London, p. 361.
15. Lee, L.K., 1987. Radiation chemistry of biopolymers. In:Farhataziz, Rogers, M.J. (Eds.), Radiation Chemistry, Principles and Applications. VCH, New York, p. 497

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างฟางข้าวและชานอ้อย

ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีในตัวอย่างซึ่งก็คือน้ำหนักของฟางข้าวและชานอ้อยที่สูญเสียไป เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 105±3 °C เป็นเวลาประมาณสองชั่วโมง

เครื่องมือทดสอบ

1. ภาชนะใส่ตัวอย่าง
2. เตาอบ
3. เครื่องชั่งละเอียด
4. Desiccator

วิธีทดสอบ

1. ภาชนะที่สะอาดและผ่านการอบแล้วนำมาชั่งน้ำหนักไว้
2. นำตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณความชื้น 2.0 กรัม ใส่ในภาชนะ ชั่งน้ำหนัก (Y)
3. อบที่อุณหภูมิ 105±3 °C ประมาณ 2 ชั่วโมง
4. เมื่อครบ 2 ชั่วโมงนำมาวางไว้ให้เย็นใน Desiccator ประมาณ 30 นาที
5. ชั่งน้ำหนัก (Z)

การคำนวณ

เปอร์เซ็นต์ความชื้น = (Y-Z)/Y x 100

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์หาเยื่อใยในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

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

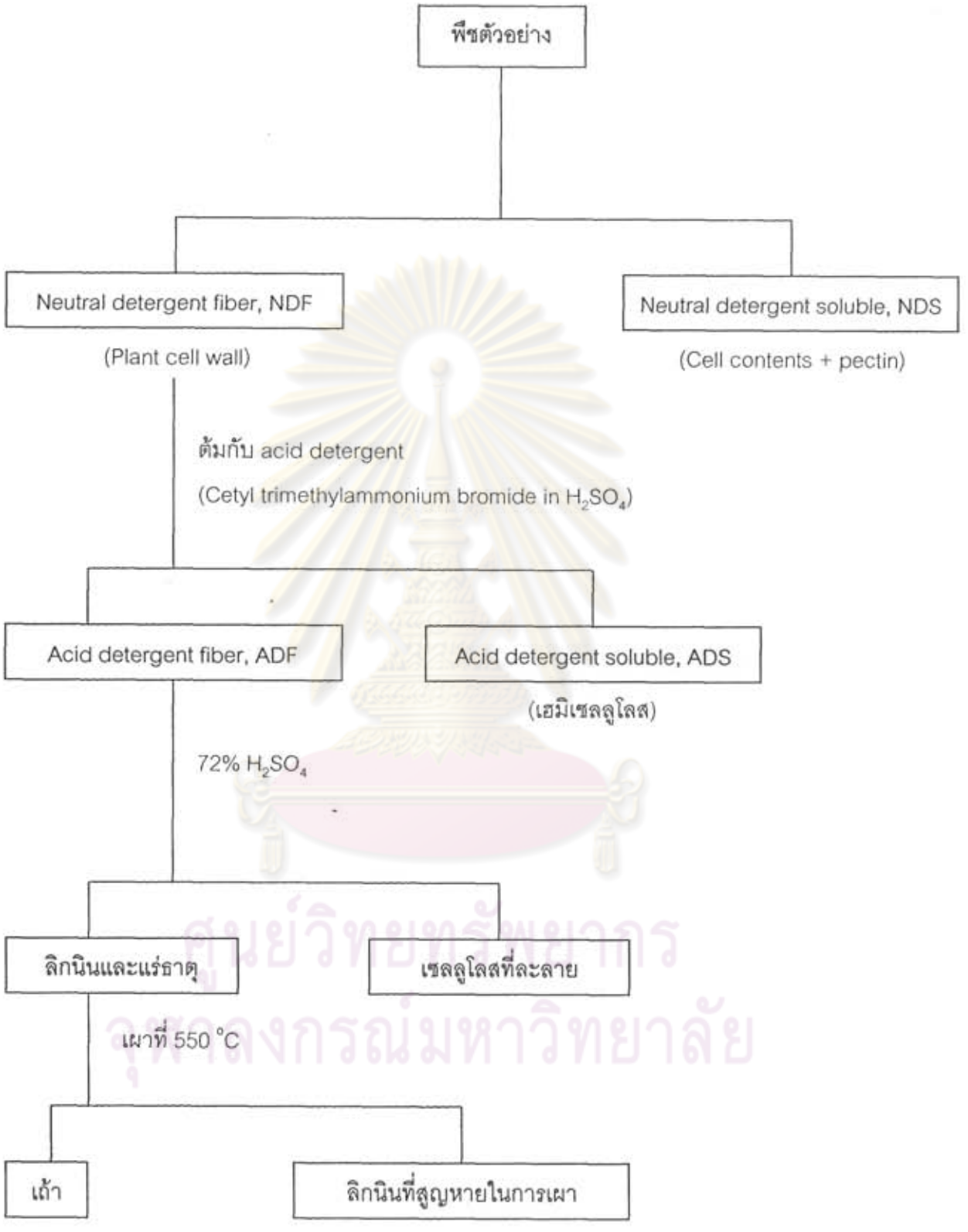
1. Structural carbohydrate ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืช ทำให้พืชคงรูปร่างอยู่ได้ คาร์โบไฮเดรตประเภทนี้คือเยื่อใยชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน คิวติน ซิลิกา ฯลฯ โดยมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 95% เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ประมาณ 3% ของเยื่อใยทั้งหมด

2. Non-structural carbohydrate อยู่ในรูปเป็นอาหารสะสมของพืช ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล

พืชทุกชนิดจะมีคาร์โบไฮเดรตทั้ง 2 ประเภทนี้ประกอบอยู่ แต่จะมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เช่น เมล็ดจะมีปริมาณแป้งมาก แต่ใบหรือลำต้นจะมีเยื่อใยมาก เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น การสะสมเยื่อใยก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันปริมาณโปรตีนและการย่อยได้ของวัตถุแห้งจะลดต่ำลง

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

หลักการในการวิเคราะห์ก็คือ เมื่อต้มพืชตัวอย่างด้วยสารละลาย detergent ที่เป็นกลาง (neutral detergent) ส่วนที่เป็นส่วนประกอบภายในเซลล์ และเพคติน จะละลายออกมาเรียกว่า neutral detergent soluble (NDS) ส่วนที่เหลืออยู่เป็นส่วนที่ไม่ละลาย คือ ผนังเซลล์ ที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เรียกว่า neutral detergent fiber (NDF) ต่อจากนั้นนำไปต้มในสารละลาย detergent ที่เป็นกรด (acid detergent) จะไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสที่อยู่เป็นอิสระ และที่อยู่รวมกับลิกนินออกมาเรียกส่วนนี้ว่า acid detergent soluble (ADS) ส่วนที่เหลืออยู่ คือ เซลลูโลสและลิกนิน เรียกว่า acid detergent fiber (ADF) โดยจะถูกนำไปย่อยด้วยกรดกำมะถัน ซึ่งจะละลายเซลลูโลสออกมา ส่วนที่เหลือคือลิกนินและเถ้า ซึ่งเมื่อนำไปเผาก็สามารถทราบค่าของลิกนิน ซึ่งเรียกว่า ADL (acid detergent lignin) ได้ จากหลักการข้างต้นนี้ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 วิธีการวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชตัวอย่าง โดยวิธีของ Van Soest

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van soest

สารละลาย Neutral detergent (NDF)

สารเคมีที่ใช้

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

วิธีเตรียมสารเคมี

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์หาปริมาณ NDF

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

วิธีคำนวณ

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารละลาย Acid detergent (ADF)

สารเคมีที่ใช้

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

วิธีเตรียมสารเคมี

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

การวิเคราะห์หาปริมาณ ADF

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

วิธีคำนวณ

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

% Hemicellulose = % NDF - % ADF

สารละลายกรดซัลฟูริคเข้มข้น 72 % (ADL)

สารเคมีที่ใช้

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4)
2. น้ำกลั่น

วิธีเตรียมสารเคมี

ตวงน้ำกลั่น 440 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ชั่งกรดซัลฟูริค 1200 กรัม ค่อย ๆ ใส่ลงในบีกเกอร์ คนให้เข้ากัน ตั้งขวดไว้ในน้ำที่เย็น เติมกรดซัลฟูริกจนครบ วัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายให้ได้เท่ากับ 1.634

การวิเคราะห์หาปริมาณ Lignin

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

วิธีคำนวณ

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

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยใช้วิธี ASTM [8]

ขั้นตอนการทดลอง

1. บดตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยให้ละเอียด โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh แต่ไม่ผ่านขนาด 80 mesh
2. นำน้ำตาลมาตราฐานกลูโคส, ไซโลส และอราบิโนส อบที่อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บไว้ในโถอบแห้ง (desiccator)
3. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยอย่างละ 300 มิลลิกรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง ตัวอย่างละ 2 หลอด
4. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72% ลงในหลอดทดลองจำนวน 3 มิลลิลิตรต่อหลอด คนให้เข้ากันประมาณ 1 นาที แล้วนำไปใส่ใน water bath เพื่อทำการไฮโดรไลซ์โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30°C ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่งโมง ทำการคนทุก ๆ 15 นาที
5. ชั่งน้ำตาลมาตราฐานอย่างละ 300 มิลลิกรัมใส่ลงในหลอดทดลองแล้วทำตามขั้นตอนที่ 4
6. นำสารละลายของน้ำตาลได้จากการไฮโดรไลซ์มาปรับความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกให้เป็น 4% โดยเติมน้ำจำนวน 84 มิลลิลิตร
7. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 6 ใส่ลงในเครื่อง autoclave ทำการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
8. นำตัวอย่างที่ผ่านการไฮโดรไลซ์มาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 20 นาที
9. กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ และทำการปรับค่า pH ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 5-6 โดยใช้ calcium carbonate
10. นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปหาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวน

1. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลมาตราฐานที่เหลืออยู่เมื่อผ่านการไฮโดรไลซ์ 2 ครั้ง

$$\%\,\text{recovery}_{srs} = \frac{C_2}{C_1} \times 100\,\%$$

โดย

C_1 = ความเข้มข้นของน้ำตาลมาตราฐานก่อนการไฮโดรไลซ์ หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำตาลมาตราฐานหลังการไฮโดรไลซ์ที่วัดด้วยเครื่อง HPLC หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

2. นำ %recovery ของน้ำตาลมาตราฐานมาแก้ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลในตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยที่ผ่านการไฮโดรไลซ์

$$C_{corr} = \frac{C_{spl}}{\frac{\%R_{srs}}{100\,\%}}$$

โดย

$\%R_{srs}$ = เปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลมาตราฐานที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ในข้อ 1

C_{corr} = ความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อย หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

C_{spl} = ความเข้มข้นของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อยที่วัดด้วยเครื่อง HPLC หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำตาลในตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อย

$$\%\,\text{sugar} = \frac{C_{corr} \times V_F}{m_1 \times \frac{\%T_{105}}{100\,\%}} \times 100\,\%$$

m_1 = น้ำหนักของตัวอย่าง หน่วย มิลลิกรัม

V_F = ปริมาตรที่กรองได้ทั้งหมด 87.0 มิลลิลิตร

C_{corr} = ความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่าง ที่ได้จากข้อ 2 หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

$\%T_{105}$ = เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่อบที่อุณหภูมิ 105°C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่า $\%T_{105}$

1. อบบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่งโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถอบแห้ง
2. ชั่งตัวอย่างฟางข้าวและซานอ้อย 0.5 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้
3. นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่งโมง แต่ไม่เกิน 72 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถอบแห้ง ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ จากนั้นนำเข้าอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่งโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถอบแห้ง ทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ถ้าน้ำหนักที่ได้ต่างจากครั้งแรกเกิน 0.3 มิลลิกรัม ให้ทำการอบซ้ำอีกครั้งจนการน้ำหนักที่ได้ใน 2 ครั้งติดกันมีน้ำหนักต่างกันไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัม
4. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมดที่อบด้วยอุณหภูมิ 105°C

$$\%T_{105} = (m_{f1} - m_t)/(m_{i1} - m_t) \times 100\ \%$$

โดย

$\%T_{105}$ = เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่อบที่อุณหภูมิ 105°C

m_t = น้ำหนักของบีกเกอร์

m_{i1} = น้ำหนักของตัวอย่างรวมกับบีกเกอร์

m_{f1} = น้ำหนักของตัวอย่างรวมกับบีกเกอร์ หลังจากอบที่อุณหภูมิ 105°C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การไฮโดรไลซ์โมเลกุลของฟางข้าวและซานอ้อยด้วยกรดซัลฟูริก

ตารางที่ ง-1 เปอร์เซ็นต์ความหวานในฟางข้าวที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20 -110 นาที

% H_2SO_4	เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์ความหวาน
20	20	12.92 ± 0.81
20	40	11.98 ± 0.41
20	60	14.08 ± 0.83
20	80	10.78 ± 0.67
20	110	10.64 ± 0.48
30	10	15.93 ± 0.90
30	20	19.95 ± 0.60
30	30	17.23 ± 0.25
30	40	19.09 ± 0.33
30	60	17.38 ± 0.38
30	80	14.95 ± 0.11
30	110	14.57 ± 0.04
40	10	21.33 ± 0.58
40	20	17.37 ± 0.87
40	30	17.17 ± 0.29
40	40	16.52 ± 0.40
40	60	15.10 ± 0.76
40	80	14.70 ± 0.53
40	110	13.65 ± 0.09

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-2 เปอร์เซ็นต์ความหวานในซานอ้อยที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20% - 40% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 -110 นาที

% H_2SO_4	เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์ความหวาน
20	20	12.23 ± 0.97
20	40	11.68 ± 0.25
20	60	13.10 ± 0.58
20	80	10.91 ± 0.74
20	110	10.76 ± 0.38
30	10	20.67 ± 0.23
30	20	20.80 ± 0.96
30	30	19.26 ± 0.10
30	40	17.27 ± 0.47
30	60	16.34 ± 0.15
30	80	15.40 ± 0.24
30	110	13.43 ± 0.11
40	10	20.87 ± 0.12
40	20	20.27 ± 0.24
40	30	17.60 ± 0.00
40	40	16.26 ± 0.41
40	60	15.81 ± 0.87
40	80	14.72 ± 0.57
40	110	15.47 ± 0.74

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

DOWEX M-43 Ion Exchange Resin

DOWEX M-43 เป็นเรซินที่สามารถแยกกรด (เช่นกรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก) ออกจากสารละลายได้ โดยการนำสารละลายที่ต้องการแยกเอากรดออกมาผ่านเรซิน ใช้อัตราการไหลของ feed เท่ากับ 5-10 bed volumes ต่อชั่วโมง เรซินจะจับกรดพร้อมปรับสภาพกรดให้เป็นกลาง (neutralize) ทำให้ได้สารละลายของน้ำตาลที่ปราศจากกรด

<u>คุณสมบัติของ DOWEX M-43</u>

โครงสร้าง	Macroporous styrenic plastic beads
ความหนาแน่น	40 lbs/cubic foot (0.64 g/cc)
อุณหภูมิ	ไม่เกิน 150°F
pH	อยู่ในช่วง 0-14 เป็นช่วงที่เหมาะสม
ความสามารถ (ต่ำสุด) ในการจับกรดของเรซิน	เท่ากับ 1.55 equ/l
ความชื้น	40-50%

<u>การนำ DOWEX M-43 มาใช้ใหม่</u>

เรซินชนิด DOWEX M-43 สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2-4% ในปริมาณ 3-5 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุตของเรซิน นำมาผ่านเรซินโดยใช้อัตราการไหล 4-6 bed volumes ต่อชั่วโมง จากนั้นล้างเรซินด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวนมาก เพื่อล้างโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่เหลือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

การถ่ายทอดเทคโนโลยี การผลิตน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส จากฟางข้าวและชานอ้อยให้กับเกษตรกรและผู้เกี่ยวข้อง มีผู้เข้าร่วมโครงการจำนวน 40 คน

การถ่ายทอดเทคโนโลยี ประกอบด้วย การบรรยายและสาธิตการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าวทุกขั้นตอน เพื่อให้ผู้เข้าร่วมโครงการสามารถนำไปผลิตได้จริง การตอบปัญหาและการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นร่วมกันระหว่างคณะผู้วิจัยกับผู้เข้าร่วมโครงการ ดังภาพ ฉ-1 – 3

รูปที่ ฉ-1 การบรรยายหลักการและกระบวนการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าวและชานอ้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

การถ่ายทอดเทคโนโลยี การผลิตน้ำตาลกลูโคส ไซโลส และอราบิโนส จากฟางข้าวและชานอ้อยให้กับเกษตรกรและผู้เกี่ยวข้อง มีผู้เข้าร่วมโครงการจำนวน 40 คน

การถ่ายทอดเทคโนโลยี ประกอบด้วย การบรรยายและสาธิตการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าวทุกขั้นตอน เพื่อให้ผู้เข้าร่วมโครงการสามารถนำไปผลิตได้จริง การตอบปัญหาและการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นร่วมกันระหว่างคณะผู้วิจัยกับผู้เข้าร่วมโครงการ ดังภาพ ฉ-1 – 3

รูปที่ ฉ-1 การบรรยายหลักการและกระบวนการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าวและชานอ้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ฉ-2 การสาธิตการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าว

รูปที่ ฉ-2 การสาธิตการผลิตน้ำตาลจากฟางข้าว (ต่อ)

รูปที่ ฉ-3 การตอบปัญหาและการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น

ประวัติคณะวิจัย

1. **ชื่อ** นางศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล
2. **รหัสประจำตัวนักวิจัย**
3. **ตำแหน่งปัจจุบัน** รองศาสตราจารย์
4. **หน่วยงานที่ติดต่อได้** ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 02-218-6777 , 085-0664566 โทรสาร 02-218-6780
5. **ประวัติการศึกษา**

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ
มหาวิทยาลัยรามคำแหง	วท.บ.	เคมี	2521
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วศ.ม.	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	2524

6. **สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ** กระบวนการทางรังสีและเคมีรังสี
7. **ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกและสถานภาพในการวิจัย**
   - งานวิจัยที่ทำสำเร็จแล้ว :

   ชื่อโครงการวิจัย

   1. Effect of urea-gamma treatments on cellulose degradation of Thai rice straw and corn stalk ตีพิมพ์ใน Radiation Physics and Chemistry 64 (2002) 417-122
   2. กระบวนการหมักหญ้าด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อนุสิทธิบัตร เลขที่ 2442
   3. วัสดุกำบังรังสีที่ปั้นขึ้นรูปได้ สิทธิบัตร
   4. Measurement of Heavy water concentration by intermediate neutron moderation ตีพิมพ์ใน Thailand Engineering journal ปีที่ 48 เล่มที่ 8 ส.ค. 38
   5. การปรับปรุงคุณสมบัติของไม้ยาง โดยการอัดเมทิลเมทาคริเลทและโพลิเมอร์ไรซ์ด้วยรังสีแกมมา เผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 3

   โครงการวิจัยหัวข้อ 1-5 ในสถานภาพหัวหน้าโครงการวิจัย

   6. การพัฒนาวัสดุหลอมตัวต่ำสำหรับกำบังรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา เผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3
   7. Determination of total fluorine in air by cyclic fast neutron activation technique : Submitted to the asahi glass foundation , JAPAN

   โครงการวิจัยหัวข้อ 1-5 ในสถานภาพหัวหน้าโครงการวิจัย

   - อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นิสิตระดับบัณฑิตศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทางรังสี >10 เรื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. **ชื่อ** ดร. วีระชัย บัญชรเทวกุล
2. **สถานที่ติดต่อได้** 105/9 หมู่ 5 ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
   โทรศัพท์ 081-3434863 โทรสาร 02-965-1733
3. **ประวัติการศึกษา**

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วศ.บ.	วิศวกรรมโลหการ	2521
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วศ.ม.	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	2523
ม.นาโงยา (ประเทศญี่ปุ่น)	วศ.ด.	วิศวกรรมนิวเคลียร์	2529

4. **สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ**
   4.1 การวิเคราะห์วัสดุด้วยเครื่องมือวิเคราะห์
   4.2 Contamination Control and ESD Control (ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์)
   4.3 วัสดุอุตสาหกรรม, Cleanroom และ Deionized water
   4.4 Industrial gloves reconditioning
5. **ประสบการณ์**
   5.1 งานวิจัย
      5.1.1 งานพัฒนาเตาอาร์คพลาสมา (พ.ศ. 2524-2525)
      5.1.2 Vaporization study on Vanadium-Oxygen System (พ.ศ. 2526-2529)
      5.1.3 งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุกำบังรังสี (พ.ศ. 2532-2533)
   5.2 ผู้ช่วยผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาฯ (พ.ศ. 2532-2533) รับผิดชอบงานทดสอบวัสดุ แก้ปัญหา ให้คำปรึกษาทางวิชาการและทำ Materials Failure Analysis มีผลงานที่ตีพิมพ์ 2 เรื่อง Case Study ในงานวิเคราะห์เกี่ยวกับการแตกหักและการศึกษาและคุณสมบัติของวัสดุ วารสารโลหะ วัสดุ และแร่, ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 หน้า 8-16, มิถุนายน 2532. และประสบการณ์ในงานวิเคราะห์เกี่ยวกับการแตกหักและการศึกษาคุณสมบัติของโลหะและวัสดุ (II) วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 หน้า 66-72 กรกฎาคม –พฤศจิกายน 2532.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. **ชื่อ** นางสาวชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์
2. **หน่วยงานที่ติดต่อได้** ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 081-3761809 โทรสาร 02-218-6780
3. **ประวัติการศึกษา**

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ
มหาวิทยาลัยมหิดล	วท.บ.	รังสีเทคนิค	2543
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วท.ม.	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	2547

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย