การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวา เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอล

Production of sugar from water hyacinth for ethanol precursor

โดย

ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

วีระชัย บัญชรเทวกุล

กาญจนา กิติดี

ทุนวิจัยร่วมภาครัฐกับภาคเอกชน ปี 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

ธันวาคม 2553

การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวา เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอล

Production of sugar from water hyacinth for ethanol precursor

โดย

ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล M.Eng. (Chulalongkorn University)
วีระชัย บัญชรเทวกุล D.Eng. (Nagoya University)
กาญจนา กิติดี M.Sc. (Chulalongkorn University)

ทุนวิจัยร่วมภาครัฐกับภาคเอกชน ปี 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

ธันวาคม 2553

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2553 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และเจ้าหน้าที่กองการวัดกัมมันตภาพรังสี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์การฉายรังสีตัวอย่างผักตบชวา

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากผักตบชวาโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง พบว่าสามารถผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ > 40% โดยน้ำหนักของผักตบชวาเมื่อใช้โดสของรังสีแกมมาตั้งแต่ 300 kGy ขึ้นไป ร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ติดต่อกัน 5 ครั้ง การไฮโดรไลซ์ครั้งแรกใช้กรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 3% (มวลต่อปริมาตร) นาน 30 นาที การไฮโดรไลซ์ครั้งที่สองถึงครั้งที่ห้าใช้กรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 15% (มวลต่อปริมาตร) นานครั้งละ 60 นาที กับกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งต้น ปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ผลิตได้เมื่อใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่ 300, 500, และ 900 kGy คือ 42.0, 41.5 และ 45.6 กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม คิดเป็น 69.55%, 68.8% และ 75.4% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่างผักตบชวา ตามลำดับ

Abstract

Production of monosaccharide sugars from Water hyacinth at various gamma irradiation doses followed by dilute sulfuric acid hydrolyses was studied. At a gamma dose ≥ 300 kGy, monosaccharide sugars >40% by weight could be obtained after 5 times hydrolyses of the sample or remaining residue at 121 degree Celsius. The optimum hydrolyses condition was 3% sulfuric acid (w/v) for 30 minute for the 1st hydrolysis and 15% sulfuric acid (w/v) for 60 minutes for the 2nd hydrolysis up to the 5th time hydrolyses. At a gamma dose of 300, 500, and 900 kGy, the total monosaccharide sugars of 42.0, 41.5, and 45.6 gram per 100 gram of dry sample which were equivalent to 69.6%, 68.8%, and 75.4% of cellulose & hemicellulose in the sample were obtained.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ..... ก

บทคัดย่อภาษาไทย..... ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ค

สารบัญ……..... ง

สารบัญตาราง..... ฉ

สารบัญรูปภาพ..... ซ

บทนำ..... 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2

ขอบเขตของโครงการวิจัย…… 2

ผักตบชวา..... 3

โครงสร้างเซลลูโลส..... 7

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส..... 7

โครงสร้างลิกนิน..... 8

การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวา..... 9

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid Hydrolysis)..... 10

การย่อยสลายโมเลกุลด้วยรังสี..... 13

วิธีการดำเนินการวิจัย..... 15

1. การเตรียมตัวอย่างผักตบชวา..... 15

2. การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในตัวอย่างผักตบชวา..... 15

3. การวิเคราะห์หาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC..... 15

4. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี แกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก..... 16

4.1 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 100 °C..... 16

4.2 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย กรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 121 °C..... 16

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3 การไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 1 ของผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy..... 17
5. การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100, 300, 700 และ 900 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก..... 17
6. การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวา โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริกจากสภาวะที่เหมาะสม..... 18
ผลการวิจัย..... 20
1. ผลการหาปริมาณเยื่อใยในผักตบชวา..... 20
2. ผลการหาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)..... 21
3. ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์โมเลกุลผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก..... 22
3.1 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 100 °C..... 22
3.2 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสี 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 121 °C..... 24
3.3 การไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2-5 ของผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy 28
4. ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100, 300, 700 และ 900 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก..... 33
5. ผลการผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาจากสภาวะที่เหมาะสม..... 39
สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ..... 42
เอกสารอ้างอิง..... 43
ภาคผนวก ก..... 45

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง……	6
2	เงื่อนไขในการวิเคราะห์น้ำตาลจากสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์……	15
3	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณเยื่อใยในผักตบชวา……	20
4	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	22
5	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย 5% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	23
6	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย 7% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 °C …….	23
7	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 3% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C.....	25
8	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 5% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C.....	25
9	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 7% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C…….	26
10	ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 10% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที……	28
11	ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที……	28
12	ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 3, 4 และ 5 ของผักตบชวา ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 1 ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 °C และไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที	31

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
13	ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 3, 4 และ 5 ของผักตบชวาที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 1 ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 °C และไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 120 นาที……	31
14	ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C (ไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 60 นาที)…….	31
15	ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ที่ไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C (ไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 120 นาที)……...	32
16	ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C …….	34
17	ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C ……..	35
18	ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C ……..	36
19	ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C ……..	37
20	ปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100-900 kGy ……	38
21	ผลการผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาจากสภาวะที่เหมาะสม จากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C ……...	39
22	ผลการผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาจากสภาวะที่เหมาะสม จากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C …….....	40

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะผักตบชวา…….	3
2	สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส……	7
3	สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส……..	8
4	สูตรโครงสร้างของลิกนิน…….	9
5	กลไกของปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก…….	10
6	กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจาง……	12
7	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสเมื่อได้รับรังสี……...	13
8	พีคของน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC……..	21
9	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 3%, 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ100°C…….	24
10	ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา ที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 3%, 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 121 °C……	26
11	ปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยอุณหภูมิ 100 °C และ 121 °C ด้วยความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ……....	27
12	ปริมาณน้ำตาลกลูโคสจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 10% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที……	29
13	ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 10% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที ……	29
14	ปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100-900 kGy.....	38
15	วิธีการวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชตัวอย่าง โดยวิธีของ Van Soest.....	46

บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและปริมาณประชากรของโลกที่เพิ่มขึ้น ฟอสซิลในรูปของถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ต้องอาศัยเวลาและสภาวะของโลกที่เหมาะสมนานนับล้านปีในการสังเคราะห์ ในขณะที่ฟอสซิลถูกเปลี่ยนรูปกลายเป็นพลังงานในระยะเวลาสั้นๆ (จากการสันดาป) ส่งผลให้แหล่งสำรองของฟอสซิลที่มีอยู่ลดลงอย่างรวดเร็ว พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานทางเลือกแบบต่างๆที่นำมาใช้เพื่อช่วยลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานทดแทนจากชีวมวลก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดการใช้แหล่งพลังงานจากฟอสซิลได้ เช่น น้ำมันจากพืช (ปาล์ม มะพร้าว ถั่ว สบู่ดำ เป็นต้น) ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ก๊าซมีเทน(จากการหมักมูลสัตว์ด้วยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศ) และแอลกอฮอล์(จากการหมักน้ำตาลหรือแป้งด้วยยีสต์หรือแบคทีเรีย) เป็นต้น

ประเทศไทยก็เป็นอีกประเทศหนึ่งของโลกที่พยายามลดการพึ่งพาพลังงานจากฟอสซิลโดยเน้นการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวล ในรูปของน้ำมันจากพืช ก๊าซมีเทน และแอลกอฮอล์ แต่เนื่องจากวัตถุดิบหลักสำหรับใช้ในการผลิตพลังงานทดแทนเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่ใช้ในการดำรงชีพของมนุษย์ด้วยเช่นกัน ปริมาณความต้องการวัตถุดิบหรือผลิตผลทางการเกษตรเหล่านี้จึงเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็วเกินกว่าความสามารถในการเพิ่มผลผลิต ผลที่เกิดตามมาก็คือผลิตผลทางการเกษตรสำหรับบริโภคมีราคาสูงขึ้นแต่มีปริมาณน้อย ในขณะเดียวกันต้นทุนของวัตถุดิบก็มีราคาสูงขึ้นตามไปด้วย การหาแหล่งวัตถุดิบใหม่ๆที่มีราคาถูกและมีปริมาณมากเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอลกำลังได้รับความสนใจ ผักตบชวาเป็นวัชพืชน้ำชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากมีขึ้นอยู่ทั่วไปตามแม่น้ำลำคลอง หนอง บึง ขยายพันธุ์ง่าย โตเร็ว สามารถตัดลำต้นมาใช้ได้ตลอดทั้งปีและไม่มีมูลค่าจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอล เนื่องจากผักตบชวามีเยื่อใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส ไซโลส เพื่อนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอล ในอนาคตผักตบชวาอาจเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอลแทนการใช้มันสำปะหลัง ข้าวโพด และอ้อยได้เป็นอย่างดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการเปลี่ยนเยื่อใยที่เป็นองค์ประกอบในผักตบชวาให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อผลิตสารตั้งต้นสำหรับนำไปใช้ผลิตเอทานอลเช่น กลูโคส ไซโลส จากผักตบชวา

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. หาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในผักตบชวาให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด
2. วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดด้วยวิธีทางเคมี และ/หรือ เครื่องมือวิเคราะห์
3. ผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส ไซโลส จากสภาวะที่เหมาะสม

ผักตบชวา

ผักตบชวา (Water Hyacinth) จัดอยู่ในวงศ์ผักตบชวา (FAMILY PONTEDERIACEAE) มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Eichhornia crassipes Solms*. เป็นพืชน้ำพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ ถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ชื่อสามัญภาษาอังกฤษของผักตบชวา ถือกำเนิดมาจากดอกที่มีสีสวย และช่อดอกคล้ายกับดอก HYACINTH ด้วยความสวยงามของดอกผักตบชวานี้เองทำให้มีผู้นำผักตบชวาไปปลูกยังที่ต่างๆ ทั่วโลก ในปี พ.ศ. 2424 ชาวดัทช์ที่ปกครองประเทศอินโดนีเซียได้นำผักตบชวาไปปลูกเลี้ยงไว้ในสวนพฤกษศาสตร์ที่เมืองโบเกอร์ ต่อมาไม่นานก็แพร่กระจายไปตามลำน้ำต่างๆ ทั่วประเทศ

ผักตบชวาเริ่มเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกในปี พ.ศ. 2444 โดยการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย หรือเมืองชวา จึงได้ตั้งชื่อว่า “ผักตบชวา” ครั้งแรกนำมาปลูกลงในสระน้ำและกระถางบัว ในวังสระปทุม ต่อมาเมื่อเกิดน้ำท่วมวังสระปทุมกอผักตบชวาได้หลุดลอยไปสู่ลำคลองภายนอก และแพร่กระจายไปตามลำน้ำต่างๆ อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีผู้นิยมนำไปปลูกไว้ดูเล่นปลูกเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์บ้าง ผักตบชวาซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะแวดล้อมของเมืองไทย จึงได้ระบาดแพร่หลายในที่ต่างๆ ทั่วประเทศ

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ลักษณะทั่วไปของผักตบชวาเป็นพืชที่เจริญอยู่ที่ผิวน้ำ จัดเป็นพืชลอยน้ำ (Floating plant) ชนิดหนึ่ง โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินใต้น้ำ เว้นแต่น้ำนั้นค่อนข้างตื้นรากก็หยั่งถึงพื้นดินได้ ลักษณะของผักตบชวา แสดงดังในรูปที่ 1

รูปที่ 1 ลักษณะผักตบชวา

ต้น

ลักษณะเป็นกอ ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงตัวกันเป็นวง (rosette) ต้นหนึ่งๆ จะมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไป กอต้นแต่ละกอจะสร้างลำต้นทอดไปตามผิวน้ำ เรียกว่า ไหล (stolon) ซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดไปตามผิวน้ำช่วยในการขยายตัวของผักตบชวา ต้นหนึ่งๆ ของผักตบชวาจะมีไหลแตกออกไปได้หลายอัน เมื่อไหลแตกออกไปแล้วก็จะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่แต่ก็ยังติดกับต้นเดิมอยู่ และเกิดเป็นกอขึ้นใหม่พร้อมทั้งรากก็เกิดขึ้นด้วย

ราก

รากของผักตบชวาจะเจริญอยู่ทางใต้กอต้น ลักษณะของรากเป็นแบบรากฝอย (fibrous root) คือ มีรากย่อยๆ แตกเป็นกระจุก รากที่แทงออกจะมีลักษณะอวบอ้วนขาว และเมื่อเจริญมากขึ้นจะมีรากแขนงแตกออกมาอีก รวมทั้งมีรากขนอ่อน (root hair) ที่มีสีน้ำตาลอ่อนเกิดขึ้นจำนวนมาก และเมื่อแก่รากขนอ่อนนี้จะเป็นสีน้ำตาลแก่จนถึงสีดำ ความยาวของรากจะแตกต่างกันไปบางครั้งพบว่ายาวเกือบหนึ่งเมตร ซึ่งพบว่าถ้าผักตบชวาขึ้นในน้ำที่มีธาตุอาหารมากรากจะสั้น

ใบ

ใบของผักตบชวาเป็นใบเดี่ยว (simple leaf) ประกอบด้วยแผ่นใบ (blade) และก้านใบ (petiole) ขนาดของแผ่นใบจะขึ้นกับขนาดของลำต้น แผ่นใบมีรูปร่างคล้ายรูปไตหรือรูปหัวใจ ขอบใบเรียบ ระบบเส้นใบแตกแบบขนาน ก้านใบกลมเรียวอวบน้ำ ตามปกติถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ในที่เบียดชิดกันมาก ก้านใบจะอ้วนกลมเรียวยาว แต่ถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ห่างไม่หนาแน่น ลำต้นจะเล็กเตี้ย ก้านใบพองเป็นกระเปาะใหญ่ทำหน้าที่เป็นทุ่นให้ลำต้นลอยน้ำได้อย่างอิสระ ใบอ่อนเกิดที่ตรงกลางกอ โดยในระยะแรกใบอ่อนจะม้วนหุ้มรอบโคนกาบใบที่เกิดก่อนและมีกาบใบบางใสหุ้มรองอีกทีหนึ่ง เมื่อก้านใบเจริญยาวขึ้นจะดันกาบในที่หุ้มนี้ออกไป แผ่นใบก็จะคลี่ออกเป็นใบใหม่ต่อไป ใบในระยะแรกสีเขียวอ่อนและต่อไปจะมีสีเขียวเข้มขึ้น

ดอก

มีสีม่วงคราม ดอกออกเป็นช่อยาว มีดอกย่อยเกิดรอบๆ ก้านช่อดอก ขนาดของช่อดอกและจำนวนของดอกย่อยของแต่ละช่อดอกขึ้นอยู่กับขนาดของกอต้นผักตบชวา อาจเป็นช่อดอกใหญ่มีดอกย่อยถึง 60 ดอก หรือมีดอกย่อยช่อละ 4 - 5 ดอก ก็มี ช่อดอกจะเกิดตรงกลางๆ ลำต้น โดยช่อดอกอ่อนจะแทงออกมาจากก้านใบ ซึ่งในระยะแรกช่อดอกจะเจริญอยู่ภายในก้านใบ และค่อยๆ เจริญดันทะลุกาบใบบางที่หุ้มเอาไว้ส่งก้านด้านเจริญขึ้นเหนือกลุ่มใบ ดอกย่อยเมื่อแก่จะบานพร้อมกันทั้งช่อ โดยเริ่มบานตั้งแต่พระอาทิตย์เริ่มส่องแสง บานเต็มที่เมื่อแสงแดดจัดและหุบในเวลาเย็น ดอกจะบานเพียง 1–2 วัน หลังจากนั้นดอกก็จะหุบทั้งช่อ และก้านช่อดอกจะยืดตัวส่งช่อดอกทั้งหมดลงไปเจริญในน้ำ ผักตบชวาต้นหนึ่งๆ มีดอกหลายช่อทยอยกันออกดอกและบานติดต่อกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง ผักตบชวาที่เกิดในบริเวณเดียวกันจะมีดอกบานไล่เลี่ยกัน

ดอกไม้โดยทั่วไปจะมีกลีบสองชั้น คือ ชั้นกลีบเลี้ยงและชั้นกลีบดอก ส่วนดอกผักตบชวานั้น มีกลีบเลี้ยงเพียงชั้นเดียวจึงเรียกว่า กลีบรวม ซึ่งแยกได้เป็น 6 กลีบย่อย โดยกลีบย่อยทั้งหมดติดกันเป็นหลอดยาว และติดกับก้านช่อดอกอีกทีหนึ่ง กลีบรวมทั้งหมดสีม่วงคราม ขนาดต่างกัน และมีกลีบหนึ่งที่ขนาดใหญ่ที่สุด ตรงกลางมีแต้มสีเหลือง ตัดขอบด้วยสีม่วงเข้ม มีเกสรตัวผู้ 6 อัน ขนาดสั้น 3 ยาว 3 ติดอยู่ตรงโคนกลีบ ชั้นเกสรตัวผู้สีเหลืองสด เกสรตัวเมียมีส่วนปลายสุดเรียกยอดเกสรตัวเมียมีสีม่วงอ่อนอยู่บนก้านที่ติดกับรังไข่ รังไข่เมื่อได้รับการผสมพันธ์แล้วจึงเจริญเป็นผล

ผล

มีขนาดเล็กแบบผลแห้ง แก่แล้วแตก ภายในผลมีเมล็ดขนาดเล็ก สีน้ำตาลเข้ม ปกติแล้วการติดผลจนเจริญเป็นเมล็ดนั้นมีน้อยมาก

การสืบพันธ์และการเจริญเติบโตของผักตบชวา

โดยทั่วไปผักตบชวาไม่สืบพันธ์โดยเมล็ด นอกจากในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น ในตอนที่น้ำแห้งในฤดูแล้ง ซึ่งต้นผักตบชวาแห้งตายหมด พอถึงฤดูฝนเมล็ดที่พักตัวอยู่ในดินจะเริ่มงอกขึ้นมาเป็นต้นอ่อนและเจริญเติบโตต่อไป

การสืบพันธ์ของผักตบชวาที่พบเห็นอยู่ทั่วๆ ไปซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดก็คือการแตกไหลแล้วกลายเป็นลำต้นติดอยู่กับต้นแม่เป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นกอใหญ่ การแตกไหลออกรอบๆ กอต้นเดิม มีการแตกใบอ่อนอยู่เสมอ การเกิดใบอ่อนในระยะแรกเป็นตุ่มเล็กๆ สีขาวอยู่ภายในโคนด้านในของก้านใบแก่ซึ่งอยู่ทางด้านนอกของกอต้น มีกาบขนาดเล็กลักษณะบางภายในหุ้มรอบพร้อมทั้งมีเมือกลื่นๆ อยู่ด้วย หลังจากนั้นใบอ่อนจะเริ่มเจริญขึ้นเป็นแผ่นใบขนาดเล็กบนก้านใบสั้นๆ ต่อมาแผ่นใบจะขยายใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนก้านใบนี้จะยาวเพียงเล็กน้อย แผ่นใบจะม้วนหุ้มรอบโคนก้านใบที่อยู่ติดกัน ต่อจากนั้นก้านใบจะยาวขึ้นดันกาบที่ห่อหุ้มออกมา พร้อมทั้งแผ่นใบคลี่กางออก ใบเมื่อมีอายุมากขึ้นสีใบก็เข้มขึ้นด้วย กาบใบซึ่งมีสีเขียวแกมม่วงจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแกมม่วง ผักตบชวาที่เจริญอยู่กันห่างๆ ก้านใบจะพองป่องภายในมีช่องอากาศจำนวนมาก แต่ถ้าผักตบชวาเจริญในสภาพที่เบียดชิดกันมากๆ ก้านใบจะยาวเรียว

ผักตบชวาออกดอกปีละครั้งในช่วงระยะเวลาประมาณเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ ผักตบชวากอหนึ่งมีดอกได้หลายช่อ ช่อดอกอ่อนจะเกิดอยู่ภายในลำต้นที่ลักษณะเหมือนก้านใบ สังเกตได้ว่าบริเวณนั้นจะบวมพอง และเมื่อช่อดอกเจริญมากขึ้นก็จะแทงทะลุออกมาเจริญข้างนอก ดอกย่อยที่เรียงกันอยู่บนก้านช่อดอกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นพร้อมที่จะบานต่อไป เมื่อดอกเจริญเต็มที่แล้วจะเริ่มรับแสงอาทิตย์ที่ส่องในเวลาเช้า และเมื่อแสงอาทิตย์ส่องเต็มที่ดอกผักตบชวาก็จะบานเต็มที่ตลอดทั้งช่อดอกเช่นกัน ในเวลาเย็นดอกก็จะเริ่มหุบ ส่วนของกลีบดอกหุ้มปิดรังไข่ไว้ ต่อมา

ก้านช่อดอกจะเริ่มโค้งงอส่งช่อดอกลงไปที่ผิวน้ำหรือใต้ผิวน้ำ แต่โดยทั่วๆ ไปแล้วไม่ค่อยพบเมล็ดของผักตบชวา

องค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา [1]

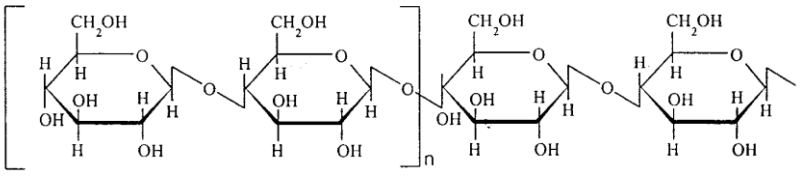
จากการศึกษาของกลุ่มงานวิเคราะห์อาหารสัตว์ กองอาหารสัตว์ พบว่าผักตบชวาสด (ใบและก้านใบ) ประกอบด้วยน้ำ 90 % โปรตีน 1% เถ้า 1.4 % และ เยื่อใย (NDF) 52.2% นอกจากนี้ยังได้ศึกษาวิเคราะห์ผักตบชวาแห้ง พบองค์ประกอบของผักตบชวาแห้งดังตารางที่ 1

ตารางที่1 องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง **[1]**

องค์ประกอบ	สัดส่วน (เปอร์เซ็นต์)		
	ใบ	ก้านใบ	ต้น (ใบและก้านใบ)
NDF	50.0	51.6	52.2
ADF	28.8	37.5	34.2
เซลลูโลส	27.2	35.9	32.7
เฮมิเซลลูโลส	21.2	14.1	18.0
ลิกนิน (ADL)	1.3	1.3	1.3
โปรตีน	16.8	6.5	10.4
แคลเซียม	2.1	1.9	2.0
ฟอสฟอรัส	0.5	0.5	0.4
กรดออกซาลิก	0.7	0.8	1.0

โครงสร้างเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช ช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่พืช โดยธรรมชาติจะไม่พบเซลลูโลสในรูปอิสระแต่มักรวมกับลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพนโตเซน (pentosan) กัม (gum) แทนนิน (tannin) ไขมัน(lipid) และสารเกิดสี (colouring matter) เป็นต้น และมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ เนื่องจากประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสต่อกันโดย β-1,4-glycosidic linkage เป็นเส้นตรง ไม่มีแขนง เรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบ โดยระหว่างสายแต่ละสายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) โดยเกิดขึ้นระหว่างเส้นสายเซลลูโลสอีกเส้นสายหนึ่ง พันธะไฮโดรเจนที่กล่าวมามีส่วนช่วยทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสซับซ้อน มั่นคง และยากต่อการย่อยสลายมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2 เซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ในกรดแก่ ถ้าการย่อยเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว



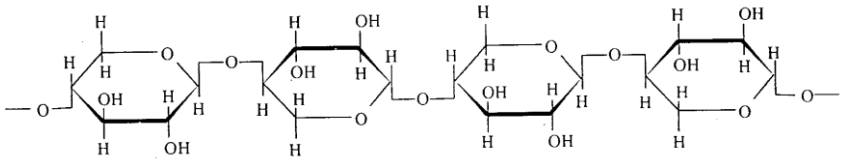
รูปที่ 2 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส **[2]**

โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

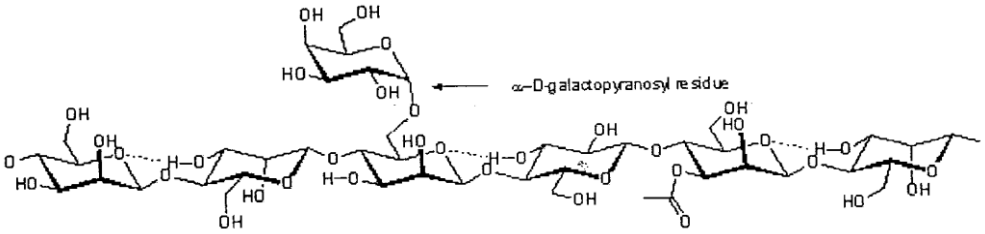
เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentose) ซึ่งส่วนมากเป็นดี-ไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (xylose) หลายๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะ β-1,4-glycosidic linkage ดังแสดงในรูปที่ 3 สายโพลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (heterogenous) ประกอบด้วยโพลีเซคคาไรด์หลายชนิดปนกัน คือ

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

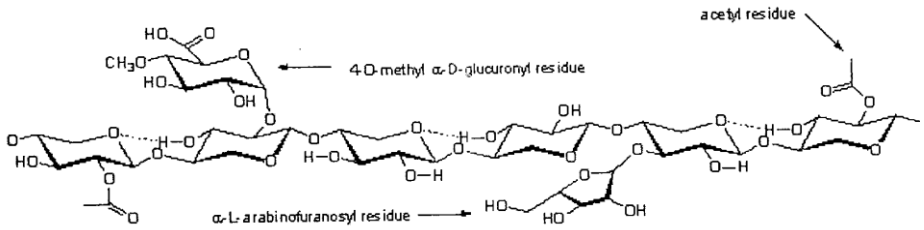
ข้อแตกต่างของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลส คือ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลด์ด้วยกรดเจือจาง ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้สายโพลีเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขามากกว่า และมีความยาวของสายโพลีเมอร์สั้นกว่า โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส



ก. Hemicellulose **[3]**



ข. Graminaceous hemicellulose **[4]**

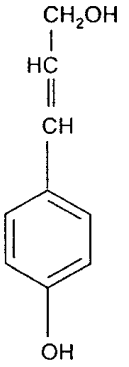


ค. Softwood hemicelluloses

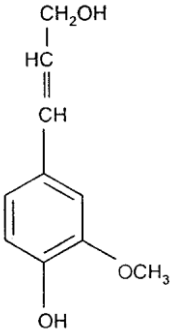
รูปที่ 3 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส **[4]**

โครงสร้างลิกนิน

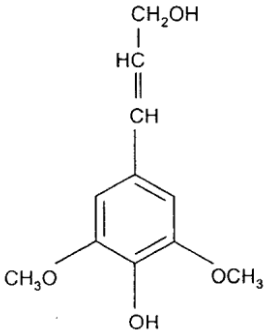
ลิกนินไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต แต่จะทำหน้าที่เคลือบผนังเซลล์พืช เป็นโพลีเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) หรือเรียกว่าเป็น ฟีโนลิกโพลีเมอร์ (phenolic polymer) โดยมีหน่วย ฟีนิลโพรเพน (phenyl propane unit) เรียงต่อกันแบบสุ่ม (random) ที่หน่วยฟีนอล (phenol unit) อาจเป็น กัวอิเอซิล (guaiacyl) หรือ ไซรินกิล (syringly) ดังแสดงในรูปที่ 4 ที่ตำแหน่งแอลฟา และเบตาของโมเลกุลลิกนิน อาจเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุล หรือคาร์บอนในหน่วย ฟีนอล อาจเกิดพันธะกับคาร์บอนในอีกหน่วยหนึ่งภายในสายโพลีเมอร์ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลลิกนิน ทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น ในเอทานอล (ethanol) หรือเมทานอล (methanol) ที่ร้อน และในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปกติ ลิกนินจะอยู่ในโครงสร้างของเซลล์พืชบริเวณรอบๆ เซลลูโลส โดยเป็นตัวป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยอีกด้วย



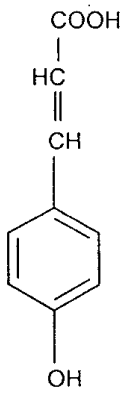
ก. p-coumary alcohol



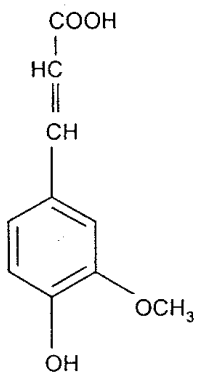
ข. coniferry alcohol



ค. sinapyl alcohol



ง. p-coumaric acid



จ. feuric acid

รูปที่ 4 สูตรโครงสร้างของลิกนิน **[3]**

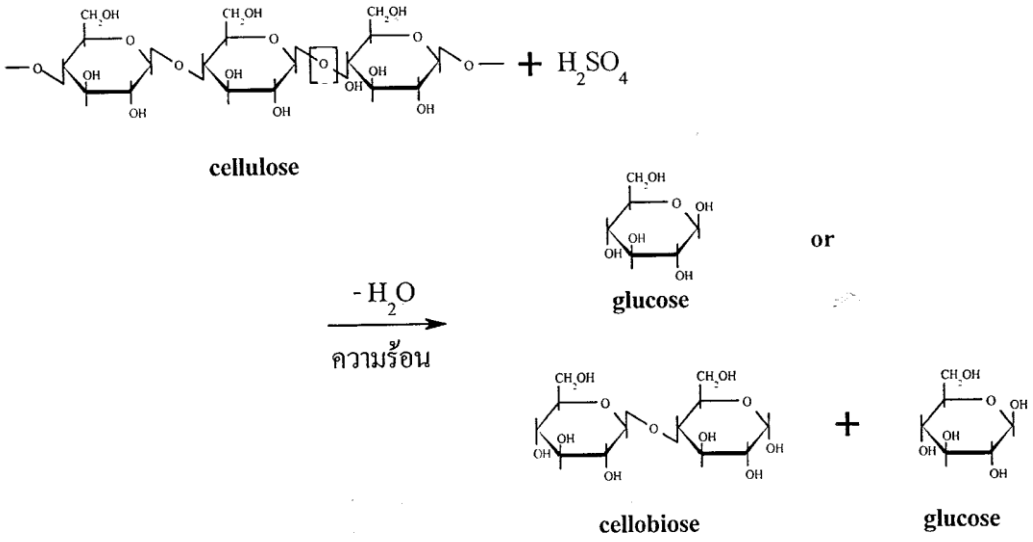
การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวา

ในปัจจุบันวัตถุดิบหลัก (feed stocks) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแอลกอฮอล์คือแป้งและน้ำตาล แป้งส่วนใหญ่ได้จากธัญพืช (ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ฯลฯ) มันเทศ มันสำปะหลัง ฯลฯ น้ำตาลส่วนใหญ่ได้จากอ้อย โมลาส บีทรูท มะพร้าว ตาลตะโนด ฯลฯ การใช้น้ำตาลเป็นวัตถุดิบจะต้องแยกสิ่งเจือปนต่างๆ ออกไปเหลือเพียงน้ำตาลบริสุทธิ์ชนิดที่ต้องการซึ่งมีความเข้มข้นเหมาะสมเพื่อป้อนสู่ขั้นตอนการหมัก การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบ (จากข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง) จำเป็นต้องไฮโดรไลซ์เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อนจึงนำไปหมักต่อ การใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบจำเป็นต้องทำการไฮโดรไลซ์เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อน จากนั้นจึงแยกน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ได้ (ออกจาก กรด/ด่าง/สิ่งเจือปน/สารที่เป็นพิษต่อจุลชีพที่ใช้ในการหมัก) เพื่อป้อนเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป เช่น การหมักหรือผลิตเป็นน้ำตาลผงโดยตรง ส่วนกรดที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์จะถูกแยกออกจากน้ำตาลและทำให้เข้มข้นเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

ผนังเซลล์ของพืชเป็นลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วยเซลลูโลส 35-50% เฮมิเซลลูโลส 20-35% และลิกนิน 10-25% เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นห่วงโซ่ของผลึกกลูโคส เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์แบบกิ่งก้านมีไซโลสเป็นหลักและมีน้ำตาลชนิดอื่นปนอยู่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช) โดยมีลิกนิน (เป็นโพลิเมอร์แบบอโรเมติก) ทำหน้าที่ยึดโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าไว้ด้วยกัน การเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในผักตบชวาเพื่อให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทำได้หลายวิธีเช่น การใช้เอนไซม์ การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดหรือการใช้รังสีร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด

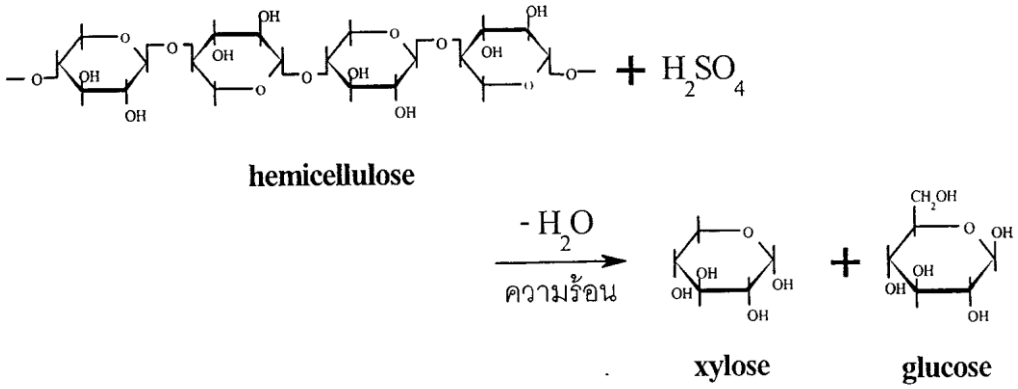
การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid Hydrolysis)

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นการย่อยด้วยสารละลายกรด ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการทำลายพันธะไกลโคสิดิกระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 กับออกซิเจน (oxygen) เนื่องจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาล เมื่อนำมาทำการย่อยจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) ถ้าเซลลูโลสถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ จะให้น้ำตาลกลูโคสเพียงอย่างเดียว ถ้าการย่อยไม่สมบูรณ์จะได้ทั้งกลูโคส เซลโลบิโอส (cellobiose) และโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) ปนกัน ส่วนเฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกย่อย จะให้น้ำตาลเพนโตสหลายชนิดปนกันขึ้นกับโครงร่างของเฮมิเซลลูโลส ดังรูปที่ 5



ก. การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกในโมเลกุลเซลลูโลส

รูปที่ 5 กลไกของปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก



ข. การไฮโดรไลซ์โมเลกุลเฮมิเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟูริก

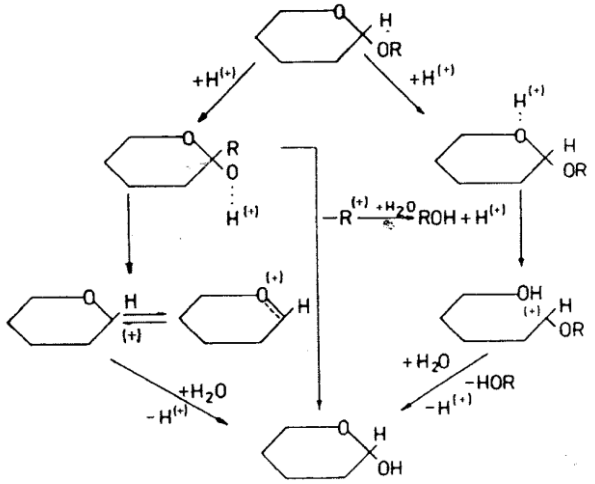
รูปที่ 5 กลไกของปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก

การไฮโดรไลซ์วัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยกรดมีสองแบบ คือ การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจาง และการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้น ตัวแปรในการไฮโดรไลซ์ ประกอบด้วย ชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ ความดัน ฯลฯ

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางสามารถไฮโดรไลซ์ได้เฉพาะเฮมิเซลลูโลส (เนื่องจากพันธะของเฮมิเซลลูโลสอ่อนแอกว่าพันธะของเซลลูโลส) การใช้กรดที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง และใช้เวลาสั้น (เป็นวินาที/นาที) จึงเหมาะกับกระบวนการผลิตต่อเนื่อง การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางมีข้อเสีย คือ ต้องบดย่อยให้วัสดุที่จะถูกไฮโดรไลซ์มีขนาดเล็ก (2-3 มิลลิเมตร) เพื่อให้กรดเข้าไฮโดรไลซ์ได้ง่าย และมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเกิดขึ้นหลายชนิด (ขึ้นกับชนิดของ feedstock) การไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงกว่าหนึ่งบรรยากาศส่งผลให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นเปลี่ยนเป็นสารอื่นได้ เช่น furfural ทำให้มี sugar yield ต่ำ (ประมาณ 50%) และวัสดุที่ใช้ทำภาชนะสำหรับไฮโดรไลซ์มีราคาแพง เนื่องจากต้องทนกรดที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง อีกทั้ง furfural ที่เกิดขึ้นอาจมีผลเสียหรือเป็นพิษต่อยีสต์หรือแบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการหมัก เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโพลิเซคคาไรด์ชนิดเพนโตสเป็นหลัก (ประกอบด้วยไซเลน และอะราแบน) และโพลียูโรไนด์เป็นส่วนน้อย น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นจึงมีไซโลสเป็นหลัก และมีอะราบิโนส แมนโนส กาแลกโตส กลูโคส และกรดยูโรนิก ปนอยู่เล็กน้อย

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจางดังรูปที่ 6 ซึ่งมีกลไกของปฏิกิริยาดังนี้ **[5]**

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



รูปที่ 6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเจือจาง **[6]**

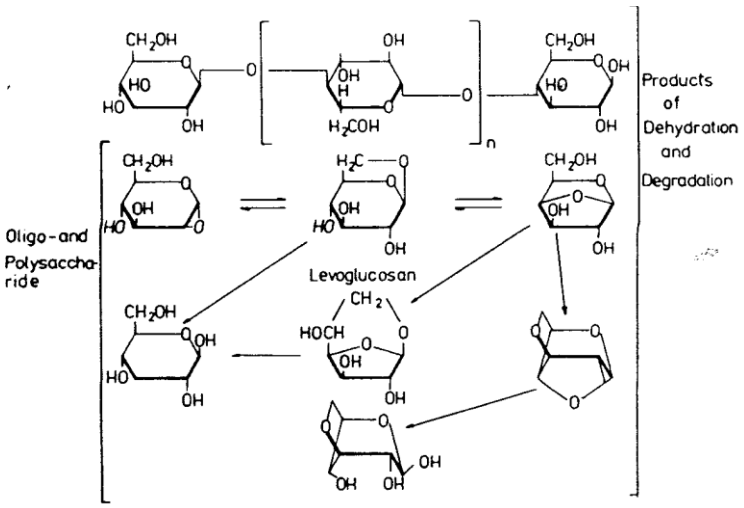
การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นประกอบด้วยการเติมกรดเข้มข้นลงในตัวอย่าง กรดจะตัด hydrogen bond ระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสส่งผลให้ โครงสร้างที่เป็นผลึกของเซลลูโลสเปลี่ยนเป็นอะมอฟัส (มีลักษณะคล้ายเจลาติน) จากนั้นเติมน้ำลงไปเพื่อเจือจางกรดให้มีความเข้มข้นประมาณ 20-30% แล้วทำการไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิปานกลาง จะได้กลูโคสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นจะไฮโดรไลซ์ทั้งเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสไปพร้อมๆกัน เมื่อเซลลูโลสถูกไฮโดรไลซ์อย่างสมบูรณ์ด้วยกรดเข้มข้นจะให้กลูโคสเพียงอย่างเดียวในขณะที่เฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นจะให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด การใช้กรดเข้มข้นขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและที่ความดันปกติ ทำให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นไม่เปลี่ยนเป็นสารอื่น ทำให้มีค่า sugar yield สูง (>90%) วัสดุที่ใช้ทำภาชนะสำหรับทำการไฮโดรไลซ์ หาได้ง่ายและมีราคาถูก (เช่นไฟเบอร์กลาส) ข้อเสียของการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นคือต้องใช้กรดเข้มข้นซึ่งมี

ราคาแพง มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า ใช้เวลานาน (เป็นชั่วโมง) เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำ และต้องมีการแยกกรดและน้ำตาลที่ไฮโดรไลซ์ได้ออกจากกัน เพื่อนำกรดที่เหลือมาเพิ่มความเข้มข้นและใช้ซ้ำเพื่อลดค่าใช้จ่าย (เป็นการหลีกเลี่ยงการกำจัดกรดที่เหลือด้วยการสะเทินซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้สะเทินกรด และค่าใช้จ่ายในการกำจัดผลิตผลจำนวนมากที่เกิดขึ้นจากการสะเทินกรด) เนื่องจาก feed stocks ทั่วไปจะมีเซลลูโลสมากกว่าเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเข้มข้นจึงมีกลูโคสเป็นหลัก มีไซโลสในปริมาณรองลงมา มีอะราบิโนส แมนโนส กาแลกโตส และกรดยูโรนิก ปนอยู่เล็กน้อย

การย่อยสลายโมเลกุลด้วยรังสี [7]

ผลของการย่อยสลายโมเลกุลด้วยรังสี คือ ทำให้เกิดการลดขนาดของโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การฉายรังสีเป็นการถ่ายเทพลังงานของรังสีไปสู่โครงสร้างโมเลกุล ซึ่งโดยมากจะประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ และเมื่อฉายรังสีที่ปริมาณรังสีสูงมากพอจะทำให้เกิดการย่อยสลายโมเลกุลจากโพลีแซคคาไรด์เป็นโมโนแซคคาไรด์ McManus และคณะ **[8]** พบว่า ปริมาณรังสีตั้งแต่ 250 kGy ขึ้นไปจะสามารถนำไปปรับปรุงอาหารหยาบคุณภาพต่ำหรือวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรเพื่อนำไปเลี้ยงแกะได้ และ Yu และคณะ **[9]** รายงานว่าส่วนประกอบของผนังเซลล์ (cell-wall constituents, NDF) ในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จะละลายได้ 50% ถ้าใช้ปริมาณรังสี 100 MGy รังสีจะถ่ายเทพลังงานให้แก่โมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้สายโซ่ของเซลลูโลสขาดออกจากกันที่ β -1, 4-glycosidic linkage ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสเมื่อได้รับรังสี **[6]**

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

$$G(S) = \frac{9.65 \times 10^3}{D}\left(\frac{1}{M_n} - \frac{1}{M_{n,0}}\right)$$

เมื่อ $\overline{M}_{n,0}$ คือขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของโพลิเมอร์ก่อนการฉายรังสี

$\overline{M}_n$ คือขนาดโมเลกุลเฉลี่ยของโพลิเมอร์หลังการฉายรังสี

D คือปริมาณรังสีดูดกลืน หน่วย MGy

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

ค่า G(S) ของเซลลูโลสที่ถูกรังสีเหนี่ยวนำให้เกิด degradation ที่อุณหภูมิห้องสภาวะไร้ออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 7.0

ปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจนจะเกิดระหว่างการฉายรังสีหรือหลังการฉายรังสี ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำโพลิเมอร์ที่ฉายรังสีแล้วด้วยความร้อน ทำให้เกิด peroxy radicals (RO_2^*), hydro peroxides (RO_2H) และ peroxides (ROOR) ซึ่งผลของออกซิเจนมีผลต่อการเกิด degradation ในโพลิเมอร์ต่างๆกันจะไม่เหมือนกัน 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 จำนวนพลังงานที่สูญเสียไปต่อระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ 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, polymethacrylonotrile เป็นต้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างผักตบชวา

1.1 ตัวอย่างผักตบชวาที่นำมาใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ต้น ใบ และราก นำตัวอย่างผักตบชวามาล้างให้สะอาด นำไปตากแดดให้แห้ง จากนั้นนำไปอบด้วยตู้อบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บดตัวอย่างผักตบชวาที่อบแห้ง และนำมาร่อนผ่าน sieve ขนาด 710 µm

1.2 แบ่งตัวอย่างผักตบชวาที่เตรียมไว้ในข้อ 1.1 เป็น 5 ส่วน ส่วนละ 300 กรัม นำไปฉายรังสีแกมมา 100, 300, 500, 700 และ 900 kGy ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างที่ฉายรังสีแล้วไปอบด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปเก็บไว้ใน desicator เพื่อป้องกันความชื้น จะได้ตัวอย่างผักตบชวาที่พร้อมจะนำไปทดลองต่อไป

2. การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในตัวอย่างผักตบชวา

นำตัวอย่างผักตบชวาที่ยังไม่ได้ฉายรังสีแกมมา จำนวน 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 1 กรัมไปวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van Soest **[10]** ดังแสดงในภาคผนวก ก

3. การวิเคราะห์หาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

การหาชนิดและปริมาณน้ำตาลในสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ด้วยเครื่อง HPLC ทำได้โดยนำสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ และปรับค่า pH แล้ว ไปวิเคราะห์หาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการวิเคราะห์น้ำตาลจากสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์

เงื่อนไข	
Column	Lichrocart - NH_2 ขนาด 250 x4 mm
Mobile phase	89% acetonitrile in H_2O
Injection volume	20 µl
Detector	ELSD

4. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก

4.1 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 100 °C

4.1.1 นำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy จำนวน 10 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 กรัม ใส่ในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำไปไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 100 °C ใน water bath เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง, 20 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง, 30 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง, 40 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง และ 60 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง กรองตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรด และกากที่เหลือ ปรับค่า pH ของสารละลายของน้ำตาลที่ได้ด้วย $Ba(OH)_2$ ให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล

4.1.2 ทำการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างผักตบชวาเช่นเดียวกับข้อ 1 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเป็น 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ตามลำดับ

4.1.3 นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากข้อ 2.1.1 และ 2.1.2 ไปวิเคราะห์หาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

4.2 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 121 °C

4.2.1 นำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy จำนวน 10 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 กรัม ใส่ในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำเข้าเครื่อง autoclave เพื่อไฮโดรไลซ์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง, 30 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง, 40 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง และ 60 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง กรองตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรด และกากที่เหลือ ปรับค่า pH ของสารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรดด้วย $Ba(OH)_2$ ให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล

4.2.2 ทำการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างผักตบชวาเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเป็น 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ตามลำดับ

4.2.3 นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 ไปวิเคราะห์หาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

4.2.4 กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ในข้อ 4.2.1 จะนำไปไฮโดรไลซ์ในขั้นตอนต่อไป

4.3 การไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 1 ของผักตบชวา

4.3.1 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 ที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 10% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการ ไฮโดรไลซ์ 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 121 ºC จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรด และกากที่เหลือ กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

4.3.2 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 4.3.1 ที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

4.3.3 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 4.3.2 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

4.3.4 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 4.3.3 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

5. การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100, 300, 700 และ 900 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก

5.1 นำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100, 300, 700 และ 900 kGy มาอย่างละ 10 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 กรัม ใส่ในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำเข้าเครื่อง autoclave เพื่อไฮโดรไลซ์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 121 ºC เป็นเวลา 30 นาที กรองตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรด และกากที่เหลือ ปรับค่า pH ของสารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรดด้วย $Ba(OH)_2$ ให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

5.2 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 5.1 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

5.3 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 5.2 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

5.4 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 5.3 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

5.5 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 5.4 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 20 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

6. การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวา โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก จากสภาวะที่เหมาะสม

6.1 นำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 และ 900 kGy อย่างละ 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 8 กรัม ใส่ในขวดขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 80 มิลลิลิตร ลงในแต่ละตัวอย่าง นำเข้าเครื่อง autoclave เพื่อไฮโดรไลซ์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 นาที กรองตัวอย่างที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ จะได้สารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรดและกากที่เหลือ ปรับค่า pH ของสารละลายของน้ำตาลที่ปนอยู่กับกรดด้วย $Ba(OH)_2$ ให้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

6.2 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 6.1 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 80 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของ

น้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

6.3 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 6.2 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 80 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

6.4 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 6.3 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 80 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

6.5 นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างในข้อ 6.4 มาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จำนวน 80 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 121 ºC กรองสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5-6 กรองสารละลายของน้ำตาลเพื่อแยกออกจากตะกอนที่เกิดขึ้น จะได้สารละลายของน้ำตาล นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. ผลการหาปริมาณเยื่อใยในผักตบชวา แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณเยื่อใยในผักตบชวา

ตัวอย่าง	NDF (%)	ADF (%)	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ผักตบชวา	65.37	36.54	31.57	28.83	3.31

หมายเหตุ : ปริมาณเยื่อใยคิดเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างแห้ง
: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในผักตบชวา ดังตารางที่ 3 พบว่าเมื่อต้มพืชตัวอย่าง (ผักตบชวา) ด้วยสารละลาย detergent ที่เป็นกลาง (neutral detergent) ทำให้ส่วนประกอบภายในเซลล์ และเพคตินจะละลายออกมา ส่วนที่เหลืออยู่เป็นส่วนที่ไม่ละลาย คือ ผนังเซลล์ที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เรียกว่า neutral detergent fiber (NDF) มีค่าเท่ากับ 65.37% ต่อจากนั้นนำส่วนที่เหลืออยู่ไปต้มในสารละลาย detergent ที่เป็นกรด (acid detergent) ซึ่งจะไฮโดรไลซ์เฮมิเซลลูโลสที่อยู่เป็นอิสระและที่อยู่รวมกับลิกนินออกมา ซึ่งส่วนที่เหลืออยู่ คือ เซลลูโลสและลิกนิน เรียกว่า acid detergent fiber (ADF) มีค่าเท่ากับ 36.54% จากนั้นนำส่วนที่เหลือย่อยต่อด้วยกรดกำมะถัน ซึ่งจะละลายเซลลูโลสออกมา ส่วนที่เหลือคือ ลิกนิน

ปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส คำนวณจาก

% Hemicellulose = % NDF - % ADF

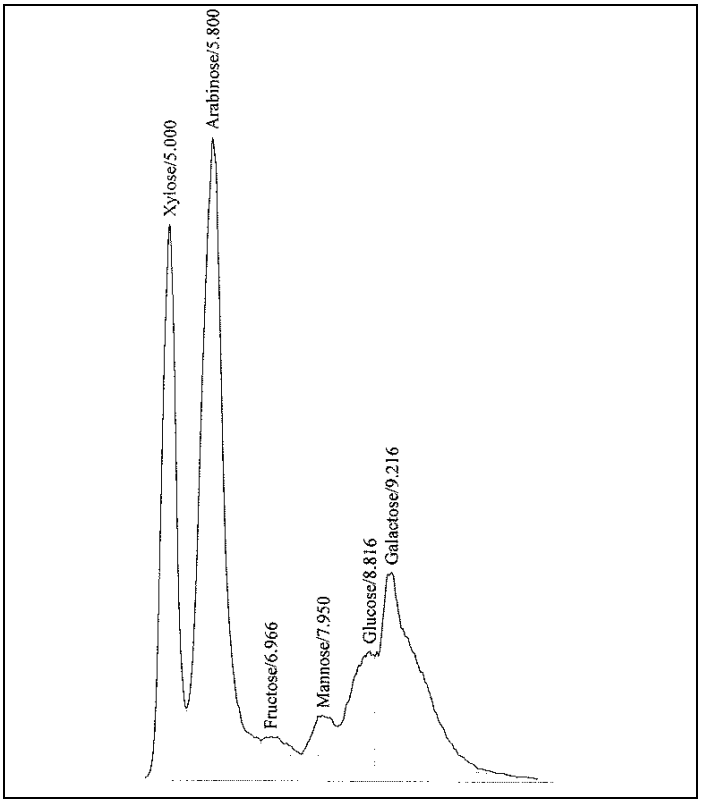
% cellulose = (น.น.ADF - น.น. เยื่อใยหลังย่อยด้วยกรด และอบแห้ง) x 100 / น.น. ตัวอย่าง

จากการคำนวณพบว่า ผักตบชวามีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เท่ากับ 31.57%, 28.83% และ 3.31% ตามลำดับ จากการศึกษาของกองอาหารสัตว์ **[1]** ได้วิเคราะห์เยื่อใยของผักตบชวาซึ่งประกอบด้วยใบ และก้านใบพบว่าปริมาณ NDF, ADF เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน มีค่าเท่ากับ 52.2%, 34.2%, 18.0%, 32.7% และ 1.3% ตามลำดับ จากการศึกษาของ A. Kumar และคณะ **[11]** พบว่าผักตบชวาที่แห้งแล้ว (total solids: TSs) จะคิดเป็น 5.2-7.8% ของน้ำหนักเปียก และประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และโปรตีน เท่ากับ 18.4 ± 0.018%, 49.2 ± 0.024%, 3.55 ± 0.05% และ12.6± 0.018 % ของ TSs ตามลำดับ จากการศึกษาของ Poddar และคณะ **[12]** พบว่าผักตบชวาประกอบด้วย เซลลูโลส 25.61% เฮมิเซลลูโลส 18.42% และลิกนิน 9.93% จาก

การศึกษาของ Nigam JN **[13]** พบว่าผักตบชวาประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส 48.7% เซลลูโลส 18.2% และลิกนิน 3.5% จากการศึกษาของ Bhole AG **[14]** พบว่าผักตบชวาประกอบด้วย เซลลูโลส 21.2% และการศึกษาของ Bolenz และคณะ**[15]** พบว่าผักตบชวาประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส 22% เซลลูโลส 31% และลิกนิน 7% จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยในตัวอย่างผักตบชวาแตกต่างกัน เนื่องมาจากตัวอย่างผักตบชวาที่นำมาวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยมาจากต่างสถานที่ ต่างสายพันธ์ ซึ่งมีการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ส่วนประกอบของผักตบชวาที่นำมาวิเคราะห์ก็แตกต่างกันด้วย งานวิจัยนี้ใช้ต้น ใบ และรากของผักตบชวา จึงทำให้มีปริมาณเยื่อใยสูงกว่า ยกเว้นงานวิจัยของ A. Kumar และคณะ **[11]** และ Nigam JN **[13]** พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

2. ผลการหาชนิด และปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

นำสารละลายของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริกไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่อง HPLC พบว่า ประกอบด้วยน้ำตาล 6 ชนิด ได้แก่ กลูโคส ไซโลส อะราบิโนส ฟรุกโตส กาแลคโตส และแมนโนส ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 พีคของน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

3. ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก

3.1 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 100 °C

ผลการย่อยสลายตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy แล้วไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริก 3%, 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10, 20, 30, 40 และ 60 นาที แสดงดังตาราง ที่ 4-6 และ รูปที่ 9 พบว่าสารละลายน้ำตาลที่ได้ประกอบด้วยน้ำตาล 6 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ไซโลส อะราบิโนส ฟรุกโตส กาแลคโตส และแมนโนส ปริมาณน้ำตาลโดยรวม 6 ชนิด จะเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ที่นานขึ้นในทุกความเข้มข้นของกรด และพบว่าเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ที่ความเข้มข้นของกรด 3% และ 5% (มวลต่อปริมาตร) ให้ปริมาณน้ำตาลโดยรวมสูงที่สุดประมาณ 21 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลโดยรวมจากการไฮโดรไลซ์ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก และเวลาต่างๆ พบว่าเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 60 นาที ด้วยกรดซัลฟูริก 5 % (มวลต่อปริมาตร) ให้ปริมาณน้ำตาลรวมสูงสุด คือ 21.807 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 4.531, อะราบิโนส 8.149, กลูโคส 1.839, กาแลคโตส 5.893, ฟรุกโตส 0.804 และแมนโนส 0.591 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 °C

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่อุณหภูมิ 100 °C (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)						
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส	แมนโนส	น้ำตาลรวม
10	2.981±0.002	3.662±0.136	1.139±0.007	2.302±0.836	0.603±0.003	0.591±0.000	11.278
20	3.166±0.017	5.759±0.292	1.875±0.017	1.601±0.016	1.326±0.022	0.591±0.000	14.318
30	3.914±0.108	6.286±0.047	1.134±0.000	4.977±0.182	0.829±0.014	0.591±0.000	17.731
40	4.601±0.020	6.770±0.089	1.429±0.096	5.471±0.890	0.786±0.007	0.591±0.000	19.648
60	5.266±0.060	7.423±0.041	1.421±0.002	5.875±0.136	0.815±0.002	0.591±0.000	21.391

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 5 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย 5% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 °C

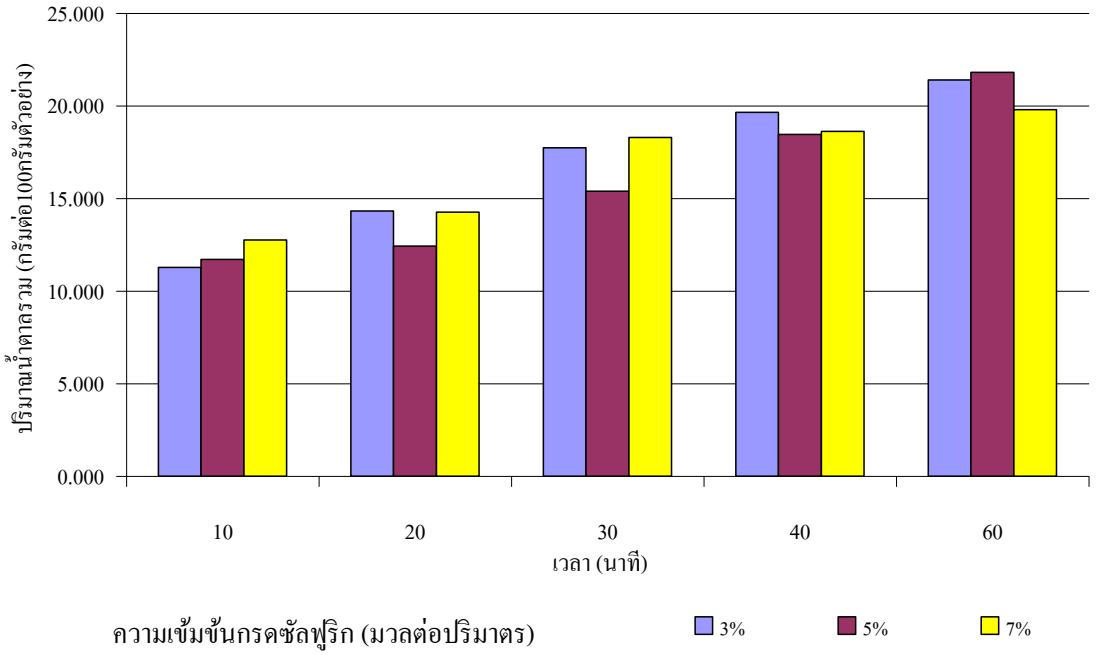
เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่อุณหภูมิ 100 °C (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)						
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส	แมนโนส	น้ำตาลรวม
10	1.561±0.006	5.220±0.697	1.861±0.375	1.571±0.000	0.853±0.377	0.651±0.002	11.718
20	1.883±0.094	5.642±0.534	1.296±0.172	2.033±0.328	0.987±0.119	0.591±0.000	12.432
30	2.553±0.013	6.273±0.285	1.240±0.149	4.039±0.367	0.626±0.052	0.670±0.007	15.401
40	3.673±0.514	7.130±0.008	1.559±0.153	4.400±0.576	0.801±0.171	0.895±0.158	18.458
60	4.531±0.118	8.149±0.149	1.839±0.033	5.893±0.287	0.804±0.014	0.591±0.000	21.807

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 6 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วย 7% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 °C

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่อุณหภูมิ 100 °C (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)						
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส	แมนโนส	น้ำตาลรวม
10	1.764±0.120	5.859±0.942	1.665±0.539	1.837±0.330	1.051±0.374	0.591±0.000	12.766
20	2.474±0.286	6.172±0.968	1.448±0.143	2.474±0.185	1.096±0.075	0.591±0.000	14.254
30	3.921±0.211	7.673±0.055	1.784±0.026	2.646±0.016	1.683±0.129	0.591±0.000	18.297
40	3.917±0.654	7.775±0.275	2.041±0.059	2.734±0.077	0.962±0.070	1.201±0.000	18.630
60	4.715±0.134	8.147±0.003	2.400±0.089	2.657±0.080	0.872±0.122	1.005±0.007	19.796

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง



รูปที่ 9 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 3%, 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 100 °C

3.2 การไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสี 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 121 °C

ผลการย่อยสลายตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy แล้วไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริก 3%, 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 10, 30, 40 และ 60 นาที แสดงดังตาราง ที่ 7-9 และรูปที่ 10 พบว่าสารละลายน้ำตาลที่ได้ประกอบด้วยน้ำตาล 6 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ไซโลส อะราบิโนส ฟรุกโตส กาแลคโตส และแมนโนส การไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จะได้ปริมาณน้ำตาลโดยรวมสูงเมื่อใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์นาน 30 นาที ส่วนการไฮโดรไลซ์ด้วย 5% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จะได้ปริมาณน้ำตาลโดยรวมสูงใกล้เคียงกันในทุกช่วงเวลาของการไฮโดรไลซ์ การไฮโดรไลซ์ด้วย 7% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) จะให้ปริมาณน้ำตาลโดยรวมสูงในเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เพียง 10 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลานานขึ้น ปริมาณน้ำตาลที่ได้เริ่มลดลง เนื่องจากน้ำตาลบางตัวเริ่มสลายตัวไปเป็นสารอื่น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลโดยรวมจากการไฮโดรไลซ์ที่ความเข้มข้นกรดซัลฟูริก และเวลาต่างๆ พบว่าเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ 30 นาที ด้วยกรดซัลฟูริก 3 % (มวลต่อปริมาตร) ให้ปริมาณน้ำตาลรวมสูงสุด คือ 26.765 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 5.835,

อะราบิโนส 8.401, กลูโคส 3.359, กาแลคโตส 7.8799, ฟรุกโตส 0.700 และแมนโนส 0.591 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 7 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 3% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่อุณหภูมิ121 °C (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)						
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส	แมนโนส	น้ำตาลรวม
10	5.296±0.259	7.751±0.447	1.134±0.000	8.4301±0.2241	0.725±0.007	0.591±0.000	23.926
30	5.835±0.063	8.401±0.056	3.359±0.064	7.8799±0.0975	0.700±0.041	0.591±0.000	26.765
40	5.583±0.068	7.812±0.117	3.490±0.006	7.9295±0.3624	0.602±0.011	0.591±0.000	26.007
60	5.866±0.357	9.014±0.476	7.815±0.483	1.5710±0.0000	0.753±0.013	0.591±0.000	25.608

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 8 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 5% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C

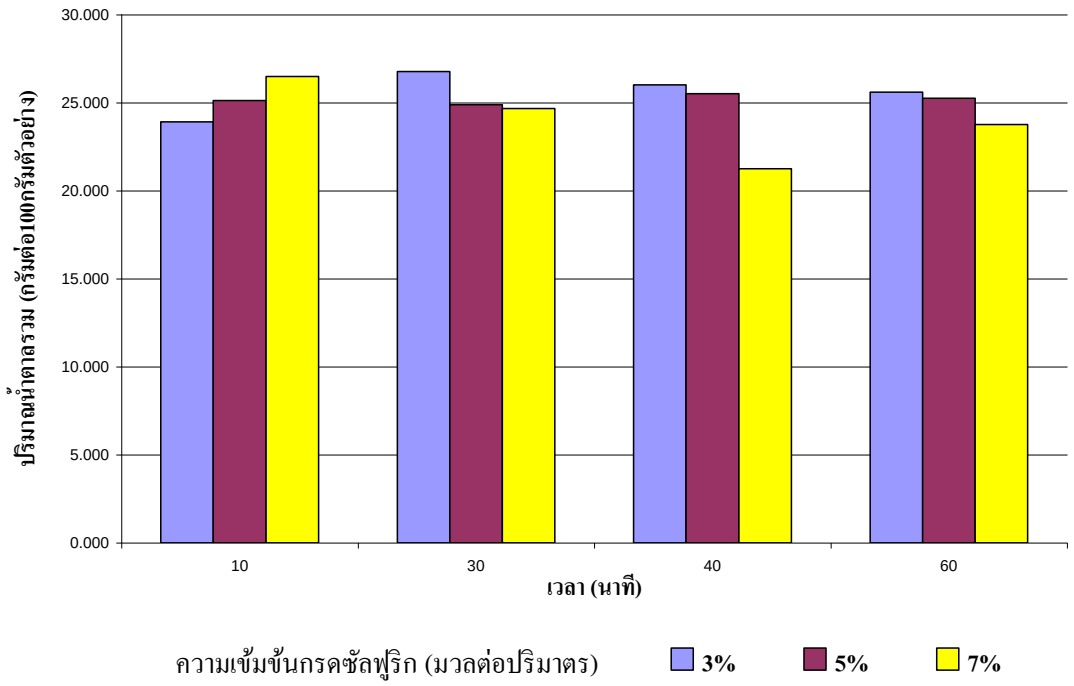
เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่อุณหภูมิ 121 °C (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)						
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส	แมนโนส	น้ำตาลรวม
10	5.339±0.470	7.830±0.651	1.134±0.000	9.665±0.972	0.568±0.000	0.591±0.000	25.127
30	5.502±0.019	8.837±0.250	7.312±0.077	1.571±0.000	1.072±0.004	0.591±0.000	24.885
40	5.395±0.017	7.695±0.200	5.427±0.011	5.782±0.980	0.635±0.062	0.591±0.000	25.525
60	5.611±0.121	9.189±0.155	7.543±0.298	1.571±0.000	0.765±0.051	0.591±0.000	25.270

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 9 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 7% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C

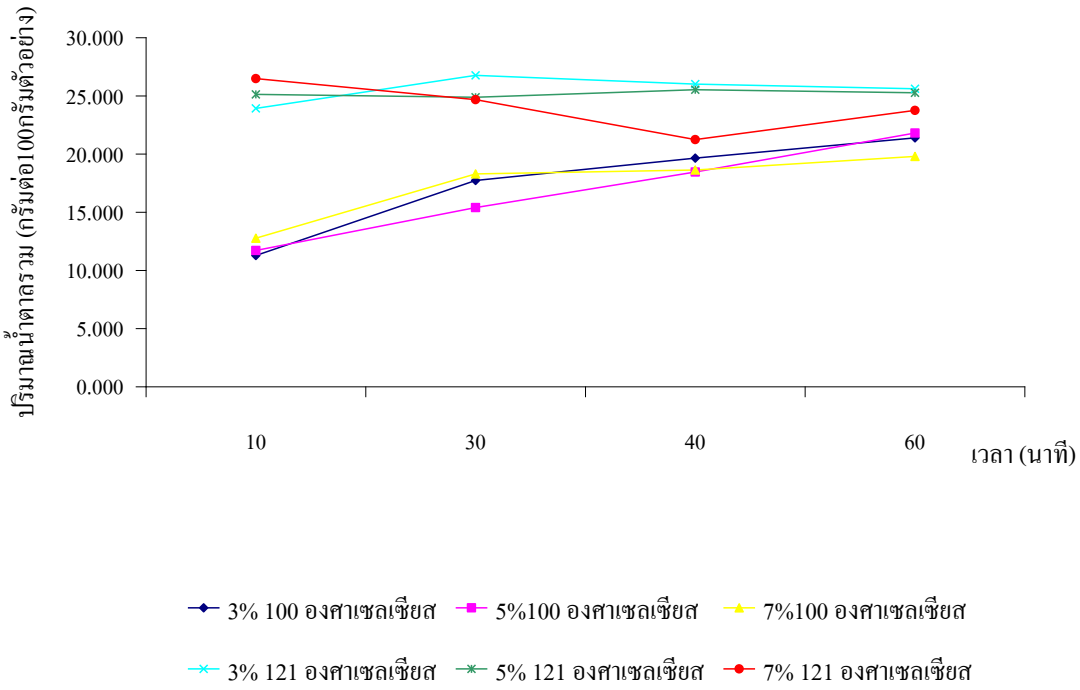
เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่อุณหภูมิ 121 °C (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)						
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส	แมนโนส	น้ำตาลรวม
10	5.548±0.232	7.797±0.575	1.134±0.000	10.846±0.611	0.568±0.000	0.591±0.000	26.484
30	5.129±0.016	8.538±0.241	7.885±0.194	1.571±0.000	0.966±0.053	0.591±0.000	24.680
40	4.527±0.169	7.437±0.435	5.913±0.372	1.571±0.000	0.784±0.076	1.017±0.061	21.249
60	5.001±0.383	8.040±0.428	6.582±0.383	2.507±0.124	0.810±0.016	0.815±0.003	23.756

หมายเหตุ : ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง



รูปที่ 10 ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา ที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก 3%, 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 121 °C

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยอุณหภูมิ 100 °C และ 121 °C ด้วยความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นต่างๆ ดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาด้วยอุณหภูมิ 100 °C ในทุกความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดน้อยกว่าการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาด้วยอุณหภูมิ 121 °C ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา คือ 121 °C ส่วนความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกสามารถใช้ได้ทั้ง 3 ความเข้มข้นคือ 3%, 5% และ 7% (มวลต่อปริมาตร) กล่าวคือ ถ้าใช้ 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ควรทำการไฮโดรไลซ์เป็นเวลา 30 นาที เป็นอย่างน้อย ถ้าใช้ 5% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ควรทำการไฮโดรไลซ์เป็นเวลา 10 นาที และถ้าใช้ 7% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ควรทำการไฮโดรไลซ์เป็นเวลา 10 นาที แต่การวิจัยในขั้นตอนต่อไปจะเลือกใช้กรดซัลฟูริก 3% (มวลต่อปริมาตร) ทำการไฮโดรไลซ์เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ประหยัดต้นทุน



รูปที่ 11 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากไฮโดรไลซ์โมเลกุลผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy ด้วยอุณหภูมิ 100 °C และ 121 °C ด้วยความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกต่างๆ

จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ฉายรังสี 500 kGy ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 นาที ได้น้ำตาลรวม (ไซโลส, อะราบิโนส, กลูโคส, กาแลคโตส, แมนโนส) สูงสุดประมาณ 27 % คิดเป็น 44.7 % ของปริมาณเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่างผักตบชวา ดังนั้นจะยังคงมีกากเหลืออยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งในกากดังกล่าวยังมีเซลลูโลสเหลืออยู่ใน

ปริมาณมาก จึงนำกากที่เหลือไปไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 10 %และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ

3.3 การไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2-5 ของผักตบชวาที่ฉายรังสีแกมมา 500 kGy

ผลการนำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 1 ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 °C มาไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 10 % และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30, 60 และ 120 นาที แสดงดังตารางที่ 10-11 พบว่าสารละลายของน้ำตาลที่ได้ประกอบด้วยน้ำตาล 3 ชนิด คือ ไซโลส อะราบิโนส และกลูโคส น้ำตาลที่พบมากที่สุดคือน้ำตาลกลูโคส

ตารางที่ 10 ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 10% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที

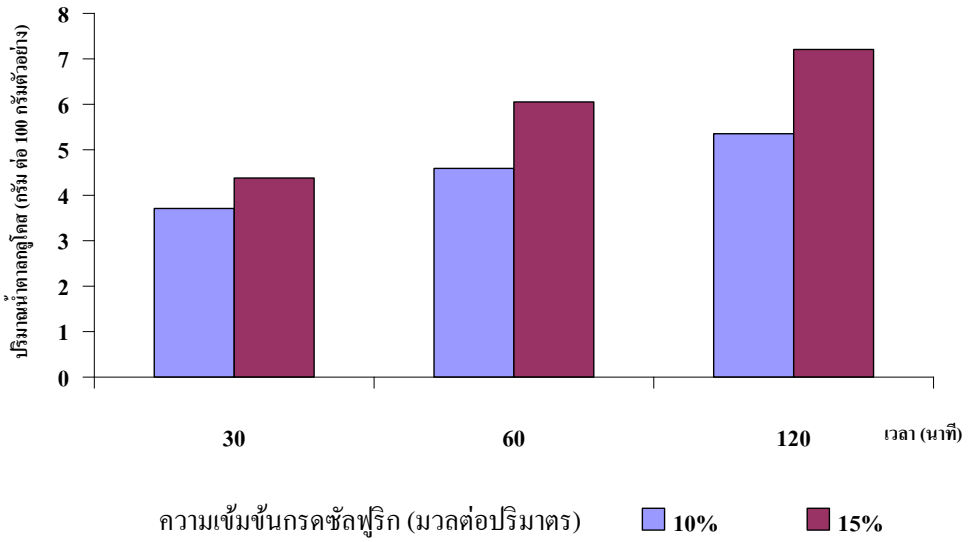
เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)			
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	น้ำตาลรวม
30	1.767±0.0056	2.907±0.0010	3.709±0.0879	8.383
60	1.713±0.0052	2.869±0.0258	4.590±0.0275	9.172
120	1.677±0.0520	2.875±0.0948	5.353±0.4702	9.905

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

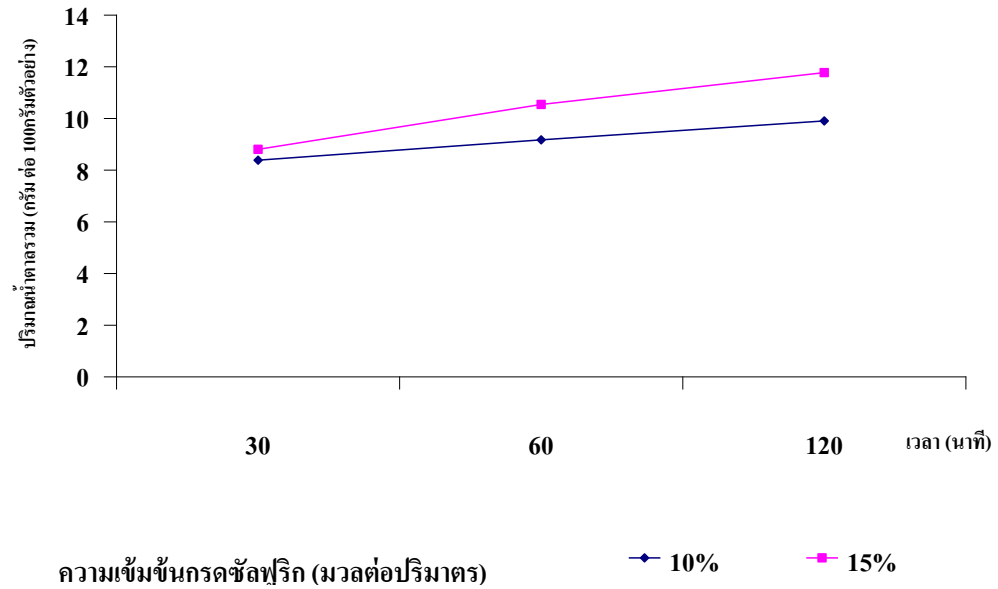
ตารางที่ 11 ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)			
	ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	น้ำตาลรวม
30	1.636±0.0466	2.789±0.0315	4.378±0.3121	8.803
60	1.647±0.142	2.844±0.0509	6.051±0.2970	10.542
120	1.659±0.0087	2.911±0.0141	7.205±0.0639	11.775

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง



รูปที่ 12 ปริมาณน้ำตาลกลูโคสจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 10% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที



รูปที่ 13 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 10% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการไฮโดรไลซ์ พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงสุดจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งได้น้ำตาลกลูโคสเท่ากับ 7.205 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง รองลงมาคือน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาทีซึ่งได้น้ำตาลกลูโคสเท่ากับ 6.051 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ของผักตบชวา ด้วย 10% กรดซัลฟูริก กับ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 30-120 นาที ดังรูปที่ 13 พบว่าทุกระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก ให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมากกว่าการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 10% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) และปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 สูงที่สุด คือการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 120 นาที ได้น้ำตาลรวมเท่ากับ 11.775 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 1.659, อะราบิโนส 2.911และ กลูโคส 7.205 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง รองลงมาคือการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ได้น้ำตาลรวมเท่ากับ 10.542 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 1.647, อะราบิโนส 2.844 และ กลูโคส 6.051 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ซึ่งจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 จากทั้งสองสภาวะ คือ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลรวมไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 คือ การไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 120 นาที และการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที

หลังจากไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 พบว่ายังมีกากเหลืออยู่จำนวนหนึ่งซึ่งในกากดังกล่าวยังมีเซลลูโลสเหลืออยู่ ดังนั้นจึงนำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงไปไฮโดรไลซ์ต่อเป็นครั้งที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ คือ นำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์กากครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 120 นาที ไปไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ดังตารางที่ 12-13

จากตารางที่ 12-13 ผลการนำกากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ไปไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่าประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเพียงชนิดเดียว ไม่พบน้ำตาลไซโลส และน้ำตาลอะราบิโนส

ตารางที่ 12 ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 3, 4 และ 5 ของผักตบชวา ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 1 ด้วย 3%กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 °C และไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 60 นาที

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	น้ำตาลกลูโคส (กรัม ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)
3	15	60	4.510 ± 0.254
4	15	60	2.076 ± 0.020
5	15	60	1.299 ± 0.005

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 13 ผลการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 3, 4 และ 5 ของผักตบชวา ที่ผ่านไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 1 ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 °C และไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นระยะเวลา 120 นาที

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	น้ำตาลกลูโคส (กรัม ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)
3	15	120	3.496 ± 0.133
4	15	120	1.794 ± 0.027
5	15	120	1.279 ± 0.010

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 14 ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C (ไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 60 นาที)

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)			
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	ฟรุกโตส
1	3	30	6.032 ± 0.0353	9.584 ± 0.2352	7.661 ± 0.0301	1.178 ± 0.0135
2	15	60	1.647 ± 0.142	2.844 ± 0.0509	6.051 ± 0.2970	0.00 ± 0.00
3	15	60	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	4.510 ± 0.254	0.00 ± 0.00
4	15	60	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	2.076 ± 0.020	0.00 ± 0.00
5	15	60	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.299 ± 0.005	0.00 ± 0.00
รวม			7.679	12.428	21.597	1.178
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 42.882 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง						

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 15 ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C (ไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 120 นาที)

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)			
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	ฟรุกโตส
1	3	30	6.343 ± 0.1632	9.974 ± 0.3161	7.218 ± 0.1420	1.291 ± 0.0443
2	15	120	1.659 ± 0.0087	2.911 ± 0.0141	7.205 ± 0.0639	0.00 ± 0.00
3	15	60	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	3.496 ± 0.133	0.00 ± 0.00
4	15	60	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.794 ± 0.027	0.00 ± 0.00
5	15	60	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	1.279 ± 0.010	0.00 ± 0.00
รวม			8.002	12.885	20.992	1.291
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 43.17 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง						

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ผลการนำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 5 ครั้ง ด้วย 3% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C แยกเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 ในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิจัยแสดงในดังตารางที่ 14 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 5 ครั้ง ได้ปริมาณรวมทั้งหมด 42.882 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสรวมทั้งหมด 7.679 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนสรวมทั้งหมด 12.428 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคสรวมทั้งหมด 21.597 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างและน้ำตาลฟรุกโตสรวมทั้งหมด 1.178 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง วิธีที่ 2 ในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 120 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิจัยแสดงในดังตารางที่ 15 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 5 ครั้ง ได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด 43.17 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสรวมทั้งหมด 8.002 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนสรวมทั้งหมด 12.885กรัมต่อ

100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคสรวมทั้งหมด 20.992 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างและน้ำตาล ฟรุกโตสรวมทั้งหมด 1.291 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 5 ครั้ง วิธีที่ 1 ได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด 42.882 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และวิธีที่ 2 ได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด 43.17 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 71% และ 71.6% ของปริมาณเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่างผักตบชวา ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมดใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการย่อยสลายผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลสูง คือ วิธีที่ 1 โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที เพราะในการไฮโดรไลซ์ครั้งที่ 2 ใช้เวลาน้อยกว่า ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจะใช้สภาวะที่เหมาะสมนี้สำหรับหาปริมาณน้ำตาลจากตัวอย่างผักตบชวาที่ฉายรังสี 100, 300, 700 และ 900 kGy ต่อไป

4. ผลการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100, 300, 700 และ 900 kGy ด้วยกรดซัลฟูริก

ทำการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 100, 300, 700 และ 900 kGy ด้วยกรดซัลฟูริกตามสภาวะที่เหมาะสม คือในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งแรกด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่สองด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่สามด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่สี่ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที แสดงดังตารางที่ 16-19

ตารางที่ 16 ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 100 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)				
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส
1	3	30	6.164±0.201	9.022±0.315	1.912±0.009	8.072±0.156	0.598 ±0.002
2	15	60	1.553±0.009	2.650±0.010	3.041±0.015	0.000±0.000	0.000 ±0.000
3	15	60	0.000±0.000	0.000±0.000	2.681±0.058	0.000±0.000	0.000 ±0.000
4	15	60	0.000±0.000	0.000±0.000	2.173±0.054	0.000±0.000	0.000 ±0.000
5	15	60	0.000±0.000	0.000±0.000	1.871±0.081	0.000±0.000	0.000 ±0.000
รวม			7.717	11.672	11.679	8.072	0.598
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 39.738 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง							

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ผลการนำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 100 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 5 ครั้ง ด้วย 3% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 16 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 5 ครั้ง ได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด 39.738 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 7.717 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส 11.672 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 11.679 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกาแลคโตส 8.072 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลฟรุกโตส 0.598 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 17 ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)				
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส
1	3	30	6.380 ± 0.115	9.306 ± 0.211	2.324 ± 0.119	7.838 ± 0.762	0.647 ± 0.025
2	15	60	1.534 ± 0.019	2.635 ± 0.014	4.070 ± 0.160	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
3	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	3.296 ± 0.092	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
4	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	2.198±0.068	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
5	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	1.779±0.010	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
รวม			7.914	11.941	13.666	7.838	0.647
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 42.006 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง							

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ผลการนำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 300 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 5 ครั้ง ด้วย 3% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 17 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 5 ครั้ง ได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด 42.006 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 7.914 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส 11.941 กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 13.666 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกาแลคโตส 7.838 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลฟรุกโตส 0.647 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ตารางที่ 18 ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)				
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส
1	3	30	5.190 ± 0.051	7.229 ± 0.005	2.547 ± 0.286	8.288 ± 0.240	0.000 ± 0.000
2	15	60	1.578 ± 0.067	2.662 ± 0.080	6.166 ± 0.154	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
3	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	3.402 ± 0.152	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
4	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	1.803 ± 0.025	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
5	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	1.219 ± 0.022	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
รวม			6.768	9.891	15.138	8.288	0.000
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 40.085 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง							

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ผลการนำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 700 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 5 ครั้ง ด้วย 3% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 18 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 5 ครั้ง ได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด 40.085 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 6.767 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส 9.891 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 15.138 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลกาแลคโตส 8.288 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลฟรุกโตสไม่พบ

ตารางที่ 19 ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างผักตบชวา ที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)				
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส
1	3	30	5.827 ± 0.207	7.899 ± 0.201	3.357 ± 0.439	10.052 ±1.380	0.000 ± 0.000
2	15	60	1.542 ± 0.014	2.694 ± 0.006	7.504 ± 0.261	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
3	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	3.384 ± 0.182	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
4	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	1.459 ± 0.082	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
5	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
รวม			7.369	10.594	15.704	10.052	0.000
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 43.719 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง							

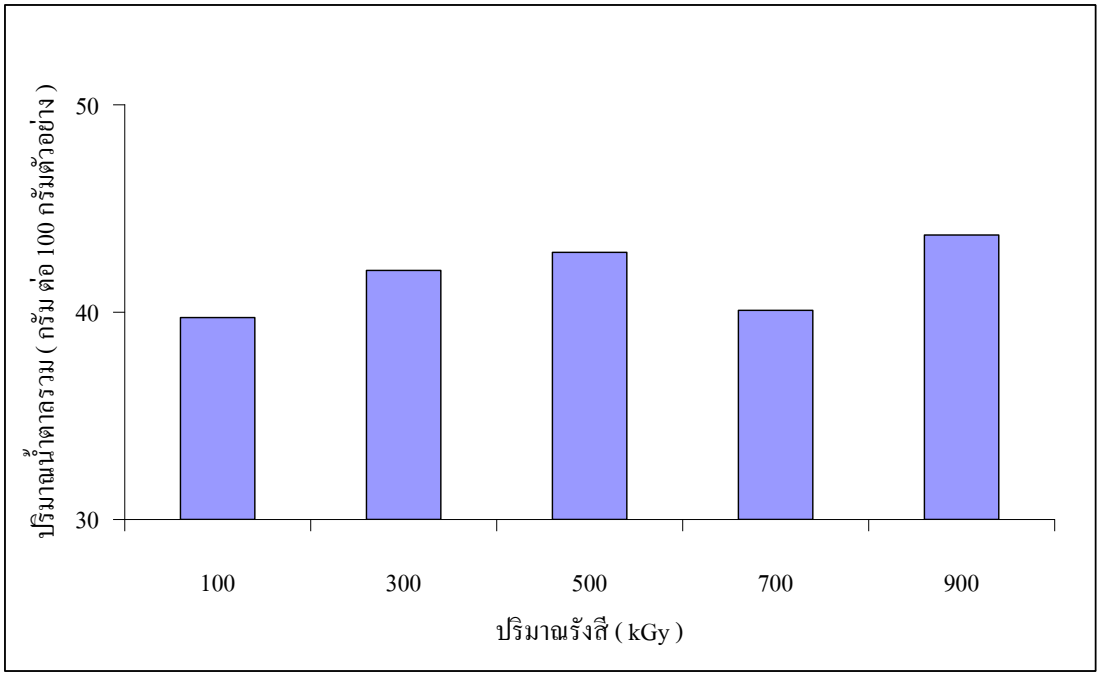
หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ผลการนำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy มาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 5 ครั้ง ด้วย 3% และ 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C โดยในครั้งแรกไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที ครั้งที่ 2 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 3 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่ 4 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ 5 ไฮโดรไลซ์ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 19 พบว่า จากการไฮโดรไลซ์ทั้ง 5 ครั้ง ได้ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด 43.719 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 7.369 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส10.594 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 15.707 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลกาแลคโตส 10.052 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลฟรุกโตสไม่พบ

ตารางที่ 20 และรูปที่ 14 แสดงปริมาณน้ำตาลรวม ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา ที่ฉายรังสีแกมมา 100-900 kGy พบว่า ที่ปริมาณรังสี 300, 500 และ 900 kGy ให้ปริมาณน้ำตาลรวมสูงใกล้เคียงกัน คือ 42.006, 42.882 และ 43.718 กรัม ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 69.58%, 71% และ 72.4% ของปริมาณเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่างผักตบชวา ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับฉายรังสีผักตบชวา คือ 300, 500 และ 900 kGy

ตารางที่ 20 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา ที่ฉายรังสีแกมมา 100-900 kGy

ปริมาณรังสี (kGy)	ปริมาณน้ำตาลรวม (กรัม ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)
100	39.737
300	42.006
500	42.882
700	40.085
900	43.718



รูปที่ 14 ปริมาณน้ำตาลรวมที่ได้จากการไฮโดรไลซ์ผักตบชวา ที่ฉายรังสีแกมมา 100-900 kGy

5. ผลการผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาจากสภาวะที่เหมาะสม

จากการวิจัยหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากผักตบชวาฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริก พบว่าปริมาณรังสีที่เหมาะสม คือ 300, 500 และ 900 kGy การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาที่สภาวะที่เหมาะสมจะเลือกทำการผลิตจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 และ 900 kGy

การผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 และ 900 kGy เพื่อทำให้โมเลกุลของผักตบชวามีขนาดเล็กลงทำให้ง่ายต่อการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด จากนั้นนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเป็นจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C โดยในครั้งแรก ไฮโดรไลซ์ด้วย 3% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส และนำกากที่เหลือมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 60 นาที จำนวน 4 ครั้ง เพื่อย่อยโมเลกุลของเซลลูโลสให้หมด ผลการทดลองดังตารางที่ 21-22

ตารางที่ 21 ผลการผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาจากสภาวะที่เหมาะสม จากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 500 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)				
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส
1	3	30	6.190 ± 0.359	8.573± 0.202	3.829 ± 0.156	3.942 ±1.590	0.000 ± 0.000
2	15	60	1.531± 0.007	2.626 ± 0.004	6.441 ± 0.021	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
3	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	4.718 ± 0.564	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
4	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	2.193 ± 0.158	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
5	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	1.500 ± 0.073	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
รวม			7.721	11.200	18.680	3.942	0.000
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 41.542 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง							

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

ตารางที่ 22 ผลการผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาจากสภาวะที่เหมาะสม จากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสี 900 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกจำนวน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 121 °C

ไฮโดรไลซ์ครั้งที่	กรดซัลฟูริก (%)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)				
			ไซโลส	อะราบิโนส	กลูโคส	กาแลคโตส	ฟรุกโตส
1	3	30	6.102 ± 0.130	8.403 ± 0.165	5.004 ± 0.083	6.882 ±0.920	0.000 ± 0.000
2	15	60	1.511 ± 0.012	2.638 ± 0.009	8.271 ± 0.175	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
3	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	4.116 ± 0.198	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
4	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	1.466± 0.016	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
5	15	60	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	1.170 ± 0.007	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
รวม			7.613	11.041	20.026	6.882	0.000
ปริมาณน้ำตาลรวมทั้งหมด = 45.562 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง							

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง

จากผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 และ 900 kGy ได้ทั้งหมด 41.542 และ 45.562 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 68.8% และ 75.4% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่างผักตบชวา ตามลำดับ ซึ่งน้ำตาลจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 7.721 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส 11.2 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 18.68 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลกาแลคโตส 3.942 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลฟรุกโตสไม่พบ และน้ำตาลจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 900 kGy ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสร 7.613 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส 11.041 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 20.026 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลกาแลคโตส 6.882 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลฟรุกโตสไม่พบ

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การศึกษาของ A. Kumar และคณะ **[11]** ทำการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาด้วยกรดซัลฟูริก (2% v/v) พบว่าได้น้ำตาล reducing sugar ทั้งหมด 18.8 กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่าง จากการศึกษาของ Nigam JN **[13]** ทำการไฮโดรไลซ์ผักตบชวาด้วยกรดซัลฟูริก (1% v/v) พบว่าได้น้ำตาลทั้งหมด 21% ของตัวอย่างผักตบชวาที่แห้งแล้ว ประกอบด้วยน้ำตาล D-xylose 12.4%, D-glocose 1.7%, L-arabinose 2.2%, D-galactose 1.2% และ D-mannose 3.5% และการศึกษาของ U.S. Aswathy และคณะ **[16]** ทำการวิจัยผลิตเอทานอลจากผักตบชวาโดยใช้เอนไซม์ โดยนำตัวอย่างผักตบชวาไปเข้าสู่กระบวนการทางเคมี (pretreated) ก่อนนำไปย่อยสลายต่อด้วยเอนไซม์ พบว่าได้น้ำตาล reducing sugar สูงสุด 639.42 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวอย่าง คิดเป็น

57% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่าง จะเห็นได้ว่ากระบวนการในการย่อยสลายเยื่อใยที่แตกต่างกันจะทำให้ได้น้ำตาลในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยนี้ทำการผลิตน้ำตาลโดยใช้รังสีร่วมกับกรดซัลฟูริกสามารถผลิตน้ำตาลได้มากกว่าวิธีอื่น

อย่างไรก็ตามการจะเลือกวิธีใดในการผลิตต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตเป็นหลัก วิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ผลผลิตน้ำตาลในปริมาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น แต่มีค่าใช้จ่ายในเรื่องการฉายรังสี สามารถแก้ได้โดยฉายรังสีด้วยกากกัมมันตรังสีที่เก็บไว้เพื่อรอการจัดการในอนาคต จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยมาก ส่วนกรดซัลฟูริกที่ใช้ควรนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการที่เหมาะสม เช่น ion exclusion, simulated moving bed chromatographic separation เป็นต้น

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

ผลการวิจัยการผลิตน้ำตาลจากผักตบชวา สามารถทำได้โดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเจือจาง ประกอบด้วยการนำผักตบชวาไปฉายรังสีแกมมา เพื่อถ่ายเทพลังงานของรังสีไปสู่โครงสร้างโมเลกุลของผักตบชวาซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ เมื่อฉายรังสีที่ปริมาณรังสีสูงมากพอจะทำให้โมเลกุลของโพลีแซคคาไรด์มีขนาดเล็กลง ทำให้ง่ายต่อการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด จากการทดลองพบว่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการฉายรังสีผักตบชวา คือ 300 500 และ 900 kGy จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริกเจือจางเป็นจำนวน 5 ครั้ง คือ ครั้งแรกทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไฮโดรไลซ์โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส ครั้งที่สองไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่หนึ่งด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15% (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่สามไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่สองด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 60 นาที ครั้งที่สี่ไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่สามด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 60 นาที และครั้งที่ห้าไฮโดรไลซ์กากที่เหลือจากการไฮโดรไลซ์ครั้งที่สี่ด้วย 15% กรดซัลฟูริก (มวลต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 60 นาที จากการทดลองผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 และ 900 kGy และนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรดซัลฟูริก 5 ครั้ง สามารถผลิตน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ 41.542 และ 45.562 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง คิดเป็น 68.8% และ 75.4% ของปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่ในตัวอย่างผักตบชวา ตามลำดับ ซึ่งน้ำตาลจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 500 kGy ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 7.721 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส 11.2 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 18.68 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลกาแลคโตส 3.942 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลฟรุกโตสไม่พบ และน้ำตาลจากผักตบชวาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 900 kGy ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส 7.613 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลอะราบิโนส 11.041 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง น้ำตาลกลูโคส 20.026 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และน้ำตาลกาแลคโตส 6.882 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ส่วนน้ำตาลฟรุกโตสไม่พบ

การผลิตน้ำตาลจากผักตบชวาโดยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดเจือจางสามารถผลิตน้ำตาลได้ปริมาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นและมีข้อดี คือ ใช้กรดซัลฟูริกเจือจาง 3% และ 15% (มวลต่อปริมาตร) ทำให้เสียค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการฉายรังสีแกมมาตัวอย่างก่อนนำมาไฮโดรไลซ์ต่อด้วยกรด ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีจากกากกัมมันตรังสีที่เก็บไว้เพื่อรอการจัดการในอนาคตในการฉายรังสีตัวอย่างผักตบชวา ส่วนกรดที่ใช้ควรนำกลับมาใช้ใหม่

เอกสารอ้างอิง

1. กองอาหารสัตว์. การใช้ผักตบชวาเป็นอาหารสัตว์ [online]. http://www.dld.go.th/nutrition/Nutrition_Knowlage/ARTICLE/Artilek.htm
2. ชมพูนุช หาญนันทวิวัฒน์. การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาร่วมกับกรดซัลฟูริค. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2005.
3. เมธา วรรณพัฒน์. โภชนาศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. กรุงเทพมหานคร: ฟันนี่พับบลิชชิ่ง, 2529.
4. Sinnott, Michael. “Synthesis of trifluoroethyl xyloologosaccharide glycisides as probes of binding to carbohydrate binding modules”, [online]. http:www.hud.ac.uk/schools/applied_sciences/research/bmsrc/sinnott.htm
5. Aguilar, R., Ramirez, J.A., Garrote, G. and Vazquez, M. Kinetic study of the acid hydrolysis of sugar cane bagasse. Journal of Engineering. 55(2002): 309-318.
6. Philipp, B. Degradation of Cellulose-Machanisms and Application. Pure and Applied Chemistry. 56(1984): 391-402.
7. ขวัญชนก จันทร์สว่าง. การย่อยโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2001.
8. McManus, W.R. and L. Manta. The effect of diet supplememts and gamma irradiation on dissimilation quality roughages by ruminants. 1. Studies on the terylene-bag technique effects of supplementation of base ration. J. Agric. Sci. 79(1972): 27-40.
9. Yu, Y., J.W. Thomas and R.S. Eemery. Estimated nutritive value of treted forages for ruminants. J. Anim. Sci. 41(1975): 1742-1749.
10. 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
11. A. Kumar, L.K. Singh, Sanjoy G. Bioconversion of lignocellulosic fraction of water-hyacinth *(Eichhornia crassipes)* hemicellulose acid hydrolysate to ethanol by *Pichia stipitis.* Bioresource Technol. 100(2009): 3293-3297.
12. Poddar, K., Mandal, L., Banerjee, G.C. Studies on water hyacinth *(Eichhornia crassipes)*-Chemical composition of plant and water from different habitats. Indian Veterinary Journal. 68(1991): 833-837.

13. Nigam JN. Bioconversion of water-hyacinth *(Eichhornia cressipes)* hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast. J Biotechnol. 97(2002): 107-116.

14. Ingole NW, Bhole AG. Utilization of water hyacinth relevant in water treatment and resource recovery with special reference to India. J. Water Supply Res. Technol. 51(2002): 283-295.

15. Bolenz,S., Omran, H., Gierschner, K. Treatments of water hyacinth tissue to obtain useful products. Biological Wastes. 33(1990): 263-274.

16. Aswathy U.S. et al. Bio-ethanol from hyacinth biomass: Anevaluation of enzymatic saccharication strategy. J Biotechnol. 101(2010): 925-930.

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์หาเยื่อใยในผักตบชวา

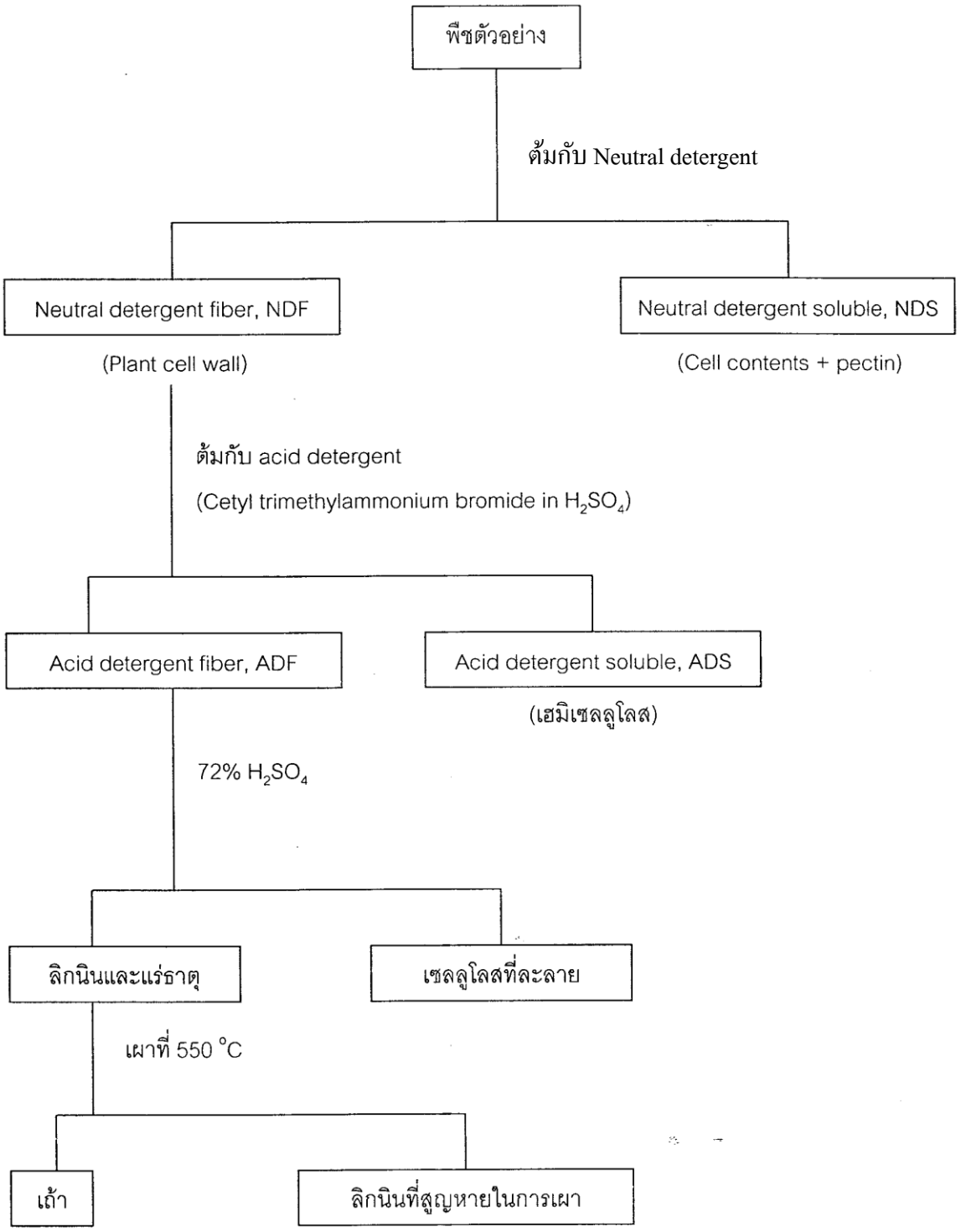
เยื่อใย (fiber) เป็นสารประกอบพวกอินทรียวัตถุที่ปราศจากไขมัน จัดอยู่ในพวกคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) มีอยู่ประมาณ 50-80% ของวัตถุแห้ง (dry matter) สูตรโครงสร้างประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยอัตราส่วนระหว่าง H : O เป็น 2 : 1 เท่ากับในโมเลกุลของน้ำ คาร์โบไฮเดรตแบ่งตามลักษณะและหน้าที่ได้เป็น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

1. Structural carbohydrate ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์พืช ทำให้พืชคงรูปร่างอยู่ได้ คาร์โบไฮเดรตประเภทนี้คือ เยื่อใยชนิดต่างๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน คิวติน ซิลิกา ฯลฯ โดยมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ประมาณ 95% และลิกนิน ประมาณ 3% ของเยื่อใยทั้งหมด
2. Non-structural carbohydrate อยู่ในรูปอาหารสะสมของพืช ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล

พืชทุกชนิดจะมีคาร์โบไฮเดรตทั้ง 2 ประเภทนี้ประกอบอยู่ แต่จะมีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เช่น เมล็ดจะมีปริมาณแป้งมาก แต่ใบหรือลำต้นจะมีเยื่อใยมาก เมื่อพืชมีอายุมากขึ้นการสะสมเยื่อใยก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันปริมาณโปรตีนและการย่อยได้ของวัตถุแห้งจะลดต่ำลง

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

หลักการในการวิเคราะห์ก็คือ เมื่อต้มพืชตัวอย่างด้วยสารละลาย detergent ที่เป็นกลาง (neutral detergent) ส่วนที่เป็นส่วนประกอบภายในเซลล์และเพคตินจะละลายออกมาเรียกว่า neutral detergent soluble (NDS) ส่วนที่เหลืออยู่เป็นส่วนที่ไม่ละลาย คือ ผนังเซลล์ที่ประกอบไปด้วย 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 สามารถสรุปเป็นขั้นตอน ดังรูปที่ 14



รูปที่ 15 วิธีการวิเคราะห์หาเยื่อใยในพืชตัวอย่าง โดยวิธีของ Van Soest

การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธีของ Van Soest

สารละลาย Neutral detergent (NDF)

สารเคมีที่ใช้

1. โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lairyl silfate, 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 °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 °C) ลงไปพอประมาณ คนให้ทั่วจนละลายหมด ถ้าละลายไม่หมดให้ใช้ความร้อนช่วย นำมาผสมกับสารละลายข้างต้น คนให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาณ 1 ลิตร

การวิเคราะห์หาปริมาณ NDF

1. นำ Crucible ที่ล้างสะอาดแล้วไปอบในตู้อบแห้ง (Oven) อุณหภูมิ 100°C นาน 1 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถอบแห้ง (Desiccator) ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ทรงสูง สำหรับวิเคราะห์หาเยื่อใยขนาด 600 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลาย Neutral detergent 100 มิลลิลิตร และ Na_2SO_3 0.5 กรัม
4. นำบีกเกอร์ไปตั้งบนเครื่องต้ม ต้มให้เดือดแล้วย่อยต่อไปอีก 60 นาที นับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือด

5. นำบีกเกอร์ออกจากเครื่องต้ม กรองเอาตัวอย่างโดยใช้ผ้าขาวบาง แล้วล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ใน บีกเกอร์ให้หมดโดยใช้น้ำร้อน (90 - 100 °C) จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 1200 มิลลิลิตร แล้วถ่ายตะกอนลง Crucible ที่วางบนขวดกรอง
6. แช่ตะกอนด้วยอะซีโตนประมาณ 30 นาที กรองอะซีโตนออก แล้วล้างตะกอนด้วยอะซีโตนจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจาก Crucible ไม่มีสี
7. นำ Crucible ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 6 ชั่วโมง หรือตลอดคืน
8. นำ Crucible ออกมาใส่ในโถอบแห้ง ทิ้งให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักของ Crucible คือ ปริมาณ NDF

<u>วิธีการคำนวณ</u>

% NDF = [(น.น. Crucible & น.น.เยื่อใย)- น.น. Crucible] x 100 / น.น.ตัวอย่าง

สารละลาย Acid detergent (ADF)

สารเคมีที่ใช้

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc.H_2SO_4, A.R., percent assay เท่ากับ 100)
2. ซิติลไตรเมททิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetly 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. เติมซิติลไตรเมททิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 20 กรัม เขย่าให้เข้ากัน

การวิเคราะห์หาปริมาณ ADF

1. นำ Crucible ที่ล้างสะอาดแล้วไปอบในตู้อบแห้ง (Oven) อุณหภูมิ 100°C นาน 1 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถอบแห้ง (Desiccator) ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก
2. นำตะกอนที่ได้จากการหา NDF นำมาถ่ายใส่บีกเกอร์ทรงสูง สำหรับวิเคราะห์หาเยื่อใย ขนาด 600 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลาย Acid detergent 100 มิลลิลิตร
4. นำบีกเกอร์ไปตั้งบนเครื่องต้ม ต้มให้เดือดแล้วย่อยต่อไปอีก 60 นาที นับเวลาตั้งแต่เริ่มเดือด
5. นำบีกเกอร์ออกจากเครื่องต้ม กรองเอาตัวอย่างโดยใช้ผ้าขาวบาง แล้วล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ใน บีกเกอร์ให้หมดโดยใช้น้ำร้อน (90-100 °C) จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 1200 มิลลิลิตร แล้วถ่ายตะกอนลง Crucible ที่วางบนขวดกรอง
6. แช่ตะกอนด้วยอะซีโตนประมาณ 30 นาที กรองอะซีโตนออก แล้วล้างตะกอนด้วยอะซีโตนจนกระทั่งสารละลายที่ไหลออกจาก 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] x 100 / น.น.ตัวอย่าง

% Hemicellulose = % NDF - % ADF

สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 72% (ADL)

<u>สารเคมีที่ใช้</u>

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4)
2. น้ำกลั่น

<u>วิธีเตรียมสารเคมี</u>

ตวงน้ำกลั่น 440 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ชั่งกรดซัลฟูริก 1200 กรัม ค่อยๆใส่ลงในบีกเกอร์ คนให้เข้ากัน ตั้งขวดไว้ในที่เย็น เติมกรดซัลฟูริคจนครบ วัดความถ่วงจำเพาะของสารละลายให้ได้เท่ากับ 1.634

<u>การวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน</u>

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

<u>วิธีการคำนวณ</u>

% ลิกนิน = (น.น.เยื่อใยหลังการอบ - น.น.เยื่อใยหลังการเผา) x 100 / น.น.ตัวอย่าง

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

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. ชื่อ นาง ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

2. รหัสประจำตัวนักวิจัย (ถ้ามี)

3. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

4. หน่วยงานที่ติดต่อได้พร้อมด้วยโทรศัพท์และโทรสาร

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพ ฯ 10330 โทรศัพท์ 02-2186777, 085-0664566 โทรสาร 02-2186780

5. e-mail address siriwattanab@gmail.com

6. ประวัติการศึกษา

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

7. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ กระบวนการทางรังสีและเคมีรังสี

8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอก โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือ ผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย เป็นต้น

8.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

8.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อแผนงานวิจัยหรือโครงการวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และสถานภาพในการทำวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย

1. Effect of urea-gamma treatments on cellulose degradation of Thai rice straw and corn stalk ตีพิมพ์ใน Radiation Physics and Chemistry 64 (2002) 417-422
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 เผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3
6. การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลไซโลส กลูโคส และอราบิโนส จากฟางข้าวและชานอ้อย โดยใช้รังสีแกมม่าร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอลหรือ ไซลิทอล
ยื่นจดสิทธิบัตร
7. การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากมันสำปะหลัง โดยการฉายรังสีแกมม่าร่วมกับการย่อยสลายด้วยกรด
ยื่นจดสิทธิบัตร
8. Production of Sugar from Molecular Degradation of Sugar Cane Bagasse by Using Sulfuric Acid. Research and Development Journal Volumn 17 No.4, 2006
9. A Gamma-Ray Film Dosimeter Based on Polyvinyl Alcohol and Dye Extracted from Chinese Rose. Journal of the Nuclear Society of Thailand Vol.6 No.1 , August 2005
10. การพัฒนาวัสดุหลอมตัวต่ำสำหรับกำบังรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา เผยแพร่ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 3
11. Determination of total fluorine in air by cyclic fast neutron activation technique : Submitted to the asahi glass foundation, Japan

โครงการวิจัยหัวข้อ 1-8 ในสถานสภาพหัวหน้าโครงการวิจัย

โครงการวิจัยหัวข้อ 9-11 ในสภาพผู้ร่วมวิจัย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นิสิตระดับบัณฑิตศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทางรังสีมากกว่า 15 เรื่อง

1. ชื่อ ดร.วีระชัย บัญชรเทวกุล

2. รหัสประจำตัวนักวิจัย (ถ้ามี)

3. ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัยอิสระ

4. หน่วยงานที่ติดต่อได้พร้อมด้วยโทรศัพท์และโทรสาร

105/9 หมู่ 5 ถ.พิบูลสงคราม ต.สวนใหญ่ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000 โทรศัพท์ 02-9665929, 081-3434863

5. e-mail address weerachaiban@gmail.com

6. ประวัติการศึกษา

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

7. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

1. การวิเคราะห์วัสดุด้วยเครื่องมือวิเคราะห์

2. Contamination Control and ESD Control (ในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์)

3. วัสดุอุตสาหกรรม, Cleanroom และ Deionized water

4. Industrial gloves reconditioning กระบวนการทางรังสีและเคมีรังสี

8. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอก โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือ ผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย เป็นต้น

8.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย

8.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อแผนงานวิจัยหรือโครงการวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และสถานภาพในการทำวิจัย

-งานวิจัย

1. งานพัฒนาเตาอาร์คพลาสมา (พ.ศ.2524-2525)

2. Vaporization study on Vanadium-Oxygen System (พ.ศ.2526-2529)

3. งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุกำบังรังสี (พ.ศ.2532-2533)

- โครงการวิจัยหัวข้อ การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลไซโลส กลูโคส และอราบิโนส จากฟางข้าวและชานอ้อย โดยใช้รังสีแกมม่าร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจาง เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตเอทานอลหรือ ไซลิทอล ในสภาพผู้ร่วมวิจัย
- ผู้ช่วยผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาฯ (พ.ศ.2532-2533)

รับผิดชอบงานทดสอบวัสดุ แก้ปัญหา ให้คำปรึกษาทางวิชาการและทำ Materials Failure Analysis มีผลงานตีพิมพ์ 2 เรื่อง Case Study ในงานวิเคราะห์เกี่ยวกับการแตกหัก และการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุวารสารโลหะ วัสดุ และแร่, ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 หน้า 8-16, มิถุนายน 2532. และประสบการณ์ในงานวิเคราะห์เกี่ยวกับการแตกหักและการศึกษาคุณสมบัติของโลหะและวัสดุ (II) วารสารวิศวกรรมศาสตร์ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 หน้า 66-72 กรกฎาคม-พฤศจิกายน 2532

1. ชื่อ นางสาวกาญจนา กิติดี

2. หน่วยงานที่ติดต่อได้ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพ ฯ 10330 โทรศัพท์ 02-2186777, 085-0664566 โทรสาร 02-2186780

4. ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	วท.บ.	รังสีเทคนิค	2549
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วท.ม.	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	2553