



การสกัดน้ำตาลนอนรีดิวซ์ซึ่งจากเศษเหลือทิ้งของผลไม้เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน

Extraction of non-reducing sugars from fruit residues
from the fruit push carts รหัสโครงการ 67-2201-01

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

คณะผู้วิจัย

ชมภูนุช เผื่อนพิภพ

เกศรินทร์ เพ็ชรรัตน์

ธนาภ โสตรโยม

ดวงรัตน์ แซ่ตั้ง

นพพร สกุลยืนยงสุข

น้อมจิตต์ สุธิบุตร

วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์

ศุภักษร มาแสวง

สาวิณี เพียรชำนาญ

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



กิตติกรรมประกาศ

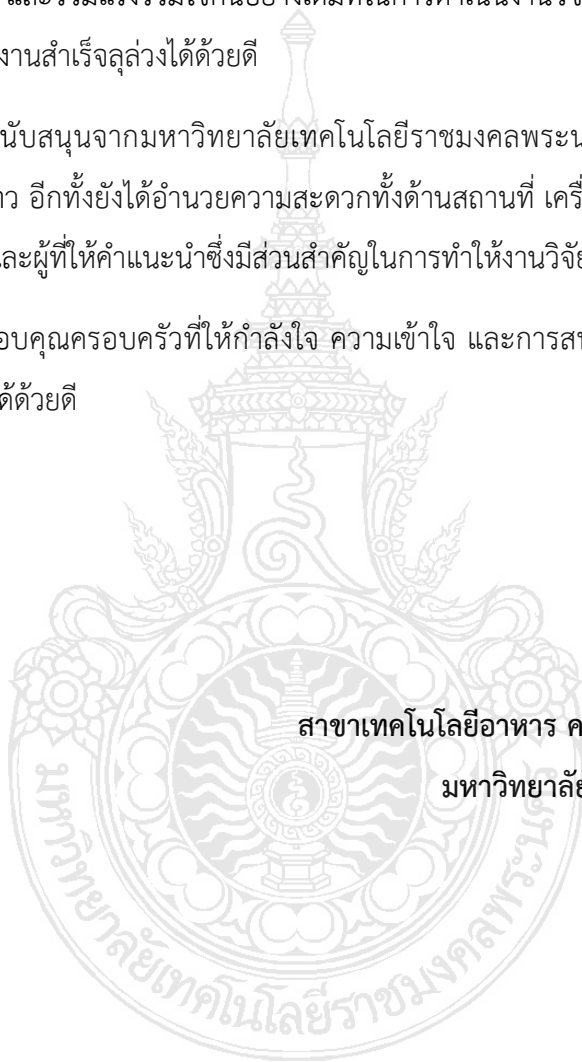
คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสมาชิกทุกท่านในทีมวิจัยของสาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่และนักศึกษาของสาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ที่ได้ร่วมกันระดมความคิด แบ่งปันความรู้ และร่วมแรงร่วมใจกันอย่างเต็มที่ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนการช่วยเหลือซึ่งกันและกันในทุกขั้นตอนจนงานสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะผู้วิจัยขอแสดงความซาบซึ้งในความเอื้อเฟื้อดังกล่าว อีกทั้งยังได้อำนวยความสะดวกทั้งด้านสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการทดลอง รวมถึงเพื่อนร่วมงานและผู้ที่ให้คำแนะนำซึ่งมีส่วนสำคัญในการทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวที่ให้อำนาจใจ ความเข้าใจ และการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

สาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

บทที่ 1	1 - 4
บทนำ	
บทที่ 2	5 - 19
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
บทที่ 3	20 - 27
วิธีดำเนินการ	
บทที่ 4	28 - 40
ผลการทดลองและการอภิปราย	
บทที่ 5	42 - 43
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
เอกสารอ้างอิง	44 - 49
ภาคผนวก	50 - 54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผลไม้เป็นโครงสร้างที่พัฒนามาจากรังไข่ของดอกไม้ที่สุกเต็มที่ ประกอบด้วยส่วนเพอริคาร์พ (pericarp) ซึ่งทำหน้าที่ห่อหุ้มเมล็ด ผลไม้ส่วนใหญ่เป็นแหล่งสารอาหารที่สำคัญ เช่น โยอาหาร วิตามิน (โดยเฉพาะวิตามินซี) สารต้านอนุมูลอิสระ และไฟโตนิวเทรียนท์ (phytonutrients) ซึ่งมีบทบาทต่อการส่งเสริมสุขภาพ (Umesh, 2009) ในปัจจุบัน ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับการดูแลสุขภาพทั้งภายในและภายนอกมากขึ้น ทำให้การบริโภคผลไม้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นอาหารที่มีพลังงานต่ำ ไขมันน้อย และให้พลังงานจากน้ำตาลธรรมชาติ พร้อมโยอาหารที่ช่วยเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหาร

ในวิถีชีวิตแบบเร่งรีบของสังคมเมือง “ผลไม้รถเข็น” เป็นทางเลือกที่สะดวกและเข้าถึงง่าย อย่างไรก็ตาม ส่วนที่ไม่สามารถบริโภคได้ เช่น เปลือก แกน หรือก้าน มักถูกทิ้งเป็นขยะอินทรีย์จำนวนมาก ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department, 2022) ระบุว่า ประเทศไทยมีขยะอินทรีย์จากเศษอาหารและพืชผักผลไม้รวมกันมากกว่า 17 ล้านตันต่อปี และมีสัดส่วนสูงสุดเมื่อเทียบกับประเภทขยะอื่น การจัดการขยะเหล่านี้ในปัจจุบันยังขาดแนวทางการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน ผลไม้ที่พบจำหน่ายมากในรถเข็น ได้แก่ สับปะรด ซึ่งนอกจากบริโภคสดได้แล้ว ยังพบว่ามีสารสะสมคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ (non-structural carbohydrates) ในส่วนที่ไม่บริโภค เช่น เปลือกและแกน ในปริมาณสูงถึง 53–85% ของน้ำหนักแห้ง (วรพงษ์ และวิกรม, 2528 อ้างโดยจินดา, 2547) โดยคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้ประกอบด้วยน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugars) และน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (non-reducing sugars) ซึ่งบางส่วนอยู่ในรูปโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) ตามธรรมชาติ

โอลิโกแซคคาไรด์โดยเฉพาะที่มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) จัดเป็นสารอาหารที่ไม่ถูกย่อยในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ แต่สามารถกระตุ้นการเจริญและ/หรือการทำงานของจุลินทรีย์สุขภาพในลำไส้ เช่น *Lactobacillus* และ *Bifidobacterium* ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุลของไมโครไบโอมในลำไส้ ส่งเสริมการดูดซึมสารอาหาร การสังเคราะห์วิตามิน และการกระตุ้นภูมิคุ้มกัน (Gibson *et al.*, 2017; Slavin, 2013) การบริโภคพรีไบโอติกอย่างสม่ำเสมอสัมพันธ์กับการลดความเสี่ยงโรคเรื้อรัง เช่น ท้องผูก กลุ่มอาการลำไส้แปรปรวน และโรคเบาหวานชนิดที่ 2 อย่างไรก็ตาม แม้งานวิจัยในปัจจุบันจะมุ่งพัฒนาพรีไบโอติกจากแหล่งธรรมชาติที่เป็นที่รู้จัก เช่น กระเทียม กล้วย หัวหอม และถั่วต่าง ๆ แต่ยังมีข้อจำกัดในการศึกษาทางวิชาการเชิง

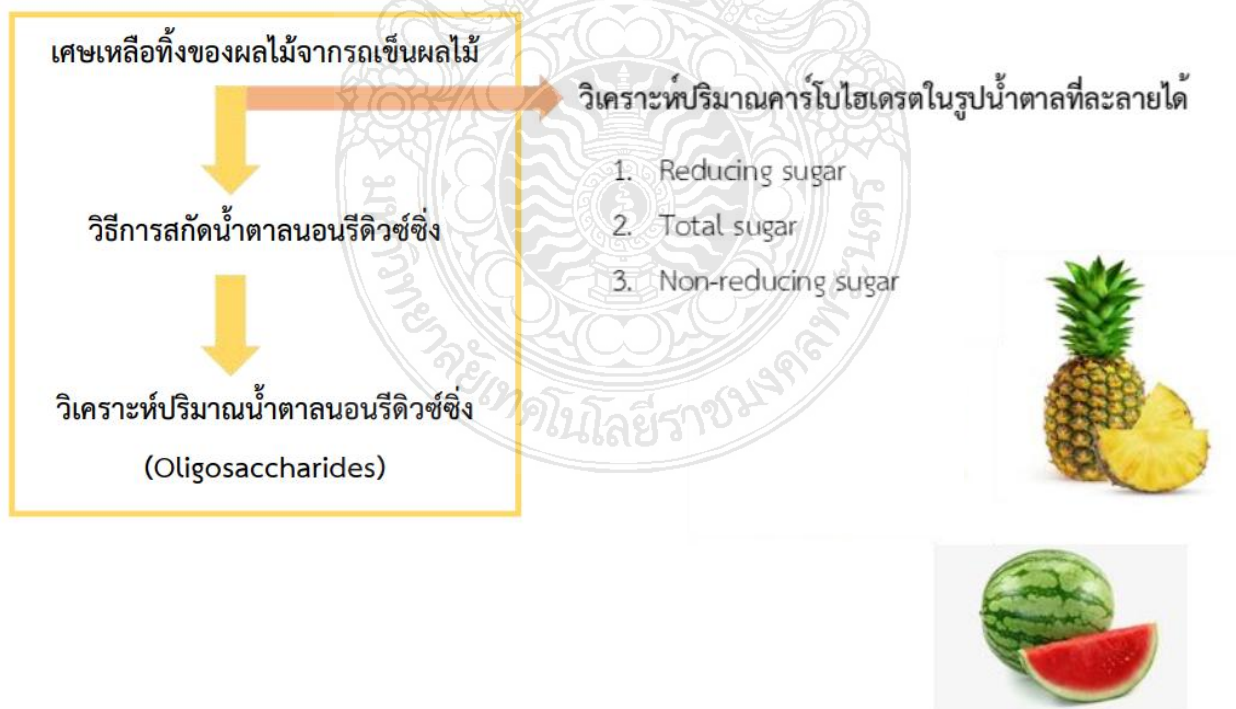
ระบบเกี่ยวกับการใช้เศษเหลือทิ้งจากผลไม้ในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะเปลือกสับปะรด (exocarp) เปลือกแตงโม (mesocarp) และแกนมะละกอ (central mesocarp) เป็นวัตถุดิบในการสกัดโอลิโกแซคคาไรด์ พร้อมการวิเคราะห์จำแนกชนิดน้ำตาลรีดิวซ์และนอนรีดิวซ์อย่างชัดเจน

ช่องว่างองค์ความรู้ดังกล่าวเป็นโอกาสสำคัญในการพัฒนาแนวทางใช้ประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งของผลไม้ รงขึ้นให้เป็นวัตถุดิบมูลค่าสูงในรูปสารอาหารฟังก์ชัน ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสกัดน้ำตาลนอนรีดิวซ์จากเศษเหลือทิ้งของผลไม้ รงขึ้น ได้แก่ เปลือกสับปะรด เปลือกแตงโม และแกนมะละกอ เพื่อให้ได้โอลิโกแซคคาไรด์ที่มีศักยภาพเป็นพรีไบโอติก และประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพหรือเป็นวัตถุดิบต้นน้ำในอุตสาหกรรมอาหารฟังก์ชัน แนวทางนี้ไม่เพียงตอบโจทย์ความต้องการด้านสุขภาพของผู้บริโภค แต่ยังสอดคล้องกับการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวซ์จากเศษเหลือทิ้งของผลไม้ รงขึ้นผลไม้
2. วิเคราะห์หาปริมาณของน้ำตาลนอนรีดิวซ์จากเศษเหลือทิ้งของผลไม้ รงขึ้นผลไม้

1.3 แนวคิด ทฤษฎี และสมมติฐานงานวิจัย



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (non-reducing sugar) จากเศษเหลือทิ้งของผลไม้จาการถนุผลไม้
2. ทราบปริมาณของน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ (non-reducing sugar) จากเศษเหลือทิ้งของผลไม้จาการถนุผลไม้
3. เพิ่มมูลค่าให้กับเศษเหลือทิ้งของผลไม้จาการถนุผลไม้และผลไม้จากอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลไม้

2.1.1 นิยาม

ผลไม้ (fruit) คือ ส่วนของพืชที่เจริญเติบโตเปลี่ยนแปลงมาจากรังไข่ที่โตเต็มที่ หรือสุกแล้ว โครงสร้างของผลไม้ประกอบด้วยเนื้อเยื่อหลัก คือ เพอริคาร์พ (pericarp) ในส่วนของการเจริญเติบโต สามารถขยายพันธุ์ได้โดยดอก เมล็ด หรือ อื่นๆ ซึ่งผลไม้ที่ออกมานี้ตอนแรกจะมีขนาดเล็กและมักจะไม่ค่อยถูกนำมากินโดยมนุษย์ แต่เมื่อเติบโตจนสุกงอม จะมีลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิม มีกลิ่นหอม และรสหวาน เป็นต้น จนสามารถนำมากินหรือประกอบอาหาร

2.1.2 เศษเหลือทิ้งของผลไม้

เศษเหลือทิ้งของผลไม้มาจากส่วนที่มนุษย์ไม่สามารถนำมารับประทานได้ เนื่องจาก 1) ลักษณะทางกายภาพของชิ้นส่วนผลไม้ เช่น มีความแข็งและเหนียวการตัดขาดและบดเคี้ยวด้วยกระบวนการย่อยของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ 2) จากส่วนเกิน ซึ่งคือส่วนที่สามารถบริโภคได้ แต่มีลักษณะภายนอกไม่สวยงามหรือไม่ได้มาตรฐานของร้าน เช่น ร้านขายผักผลไม้ที่คัดเฉพาะที่สวยงามเท่านั้นในแต่ละปี อาหารกว่า 1,300 ล้านตัน หรือ 1 ใน 3 ของอาหารที่ผลิตได้ทั่วโลก ต้องกลายเป็นขยะอาหารที่ถูกทิ้งไปอย่างสูญเปล่า และสร้างก๊าซเรือนกระจกถึง 8% ในขณะที่คนกว่า 830 ล้านคนทั่วโลกกลับประสบภาวะอดอยากสำหรับประเทศไทย กว่า 60% ของขยะมาจากขยะอาหาร คนไทย 1 คนสร้างขยะอาหารสูงถึง 254 กิโลกรัมต่อปี

2.2 สับปะรด

2.2.1 ที่มาและความสำคัญทางเศรษฐกิจ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตและผู้ส่งออกสับปะรดรายสำคัญของโลก โดยอุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทยเริ่มเติบโตอย่างจริงจังตั้งแต่ช่วงต้นทศวรรษ 1970 (FAO, 2023; Thai Pineapple Industry Association [TPIA], 2022) ปัจจุบันมีผลผลิตเฉลี่ยต่อปีประมาณ 2 ล้านตัน ในพื้นที่เพาะปลูกรวมราว 100,000 เฮกตาร์ ครอบคลุม 13 จังหวัด โดยพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่ตามแนวชายฝั่งตะวันออกและชายฝั่งตะวันตกของอ่าวไทย (Department of Agriculture, 2021) เกษตรกรรายย่อยที่มีพื้นที่ 1–5 เฮกตาร์ต่อราย คิดเป็นสัดส่วนมากกว่า 95% ของผู้ผลิตทั้งหมด ทั้งนี้ประมาณ 80% ของผลผลิตทั้งหมดถูกส่งไปใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูป โดยเฉพาะการ

ผลิตสับปะรดกระป๋อง ส่วนที่เหลือจำหน่ายเพื่อการบริโภคสดในประเทศ การผลิตสับปะรดเคยเป็นกิจการค้าเสรี แต่ปัจจุบันมีแนวโน้มเปลี่ยนเป็นการผลิตในระบบสัญญาซื้อขายล่วงหน้าเพื่อความมั่นคงด้านตลาดและวัตถุดิบ (TPIA, 2022)

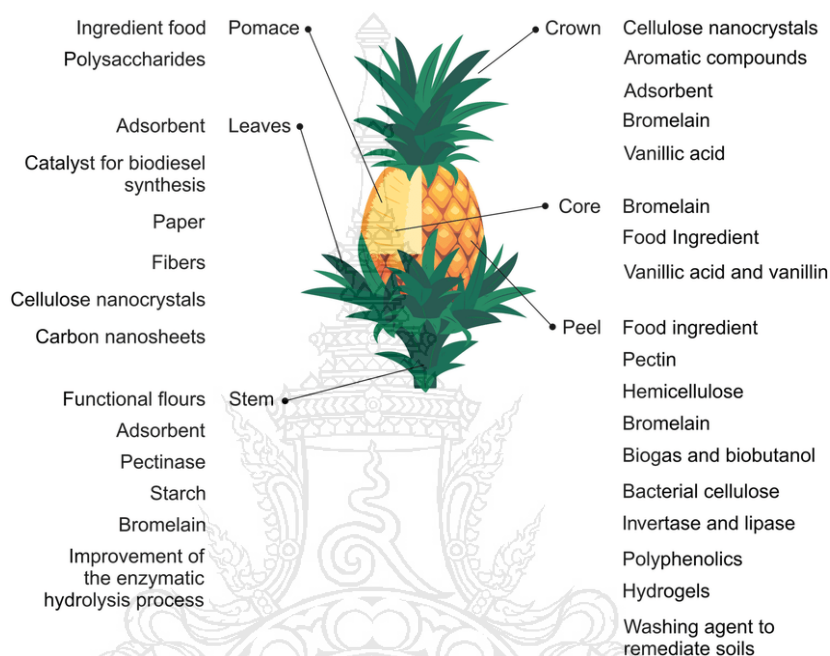
พันธุ์สับปะรดที่เพาะปลูกในประเทศไทยสามารถจำแนกได้เป็นหลายกลุ่มหลัก ได้แก่ (1) กลุ่มปัตตาเวีย (Smooth Cayenne) ซึ่งเป็นฐานหลักสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูป แต่มีการจำหน่ายผลสดในตลาดมากขึ้น (2) กลุ่มควีน (Queen) เช่น พันธุ์ภูเก็ต ภูเก็ต ภูเก็ต และศรีราชา ซึ่งมีลักษณะเนื้อกรอบ หวานหอม เหมาะสำหรับจำหน่ายผลสดและในรูปแบบบรรจุภัณฑ์ผลไม้ นอกจากนี้พันธุ์ที่นิยมในภาคเหนือ เช่น นางแล และภูเก็ต ซึ่งขึ้นชื่อว่ารสหวาน เนื้อกรอบ มีกลิ่นหอม ได้รับความนิยมสูงในตลาดผลสด หลายพันธุ์ได้รับการขึ้นทะเบียนสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indication: GI) เช่น ภูเก็ตศรีทอง ศรีราชา นางแล และภูเก็ต ซึ่งช่วยเพิ่มภาพลักษณ์และมูลค่าเชิงการตลาด (Department of Intellectual Property, 2023) และเพื่อยกระดับคุณภาพการผลิตและความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม กรมวิชาการเกษตรในฐานะหน่วยงานหลักด้านการวิจัยทางการเกษตร ได้กำหนดแนวทางปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (Good Agricultural Practices: GAP) สำหรับเกษตรกรผู้ปลูกสับปะรด ขณะที่โรงงานแปรรูปสับปะรดไทยได้ปรับใช้แนวทางปฏิบัติด้านการแปรรูปที่ดี (Good Processing Practices: GPP) และหลายแห่งได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO (Department of Agriculture, 2021; TPIA, 2022) ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพและมาตรฐานของอุตสาหกรรมสับปะรดไทยในระดับสากล

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการของเนื้อผลสับปะรด

สับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) เป็นผลไม้เมืองร้อนที่ได้รับความนิยมทั่วโลก เนื่องจากมีรสชาติหวานฉ่ำ กลิ่นหอมเฉพาะตัว และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื้อผลสับปะรดประกอบด้วยน้ำตาลธรรมชาติ เช่น ซูโครส กลูโคส และฟรุกโตส ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ร่างกายสามารถนำไปใช้ได้ทันที (Paull & Chen, 2019) นอกจากนี้ยังอุดมไปด้วยวิตามินซีในปริมาณสูง (ประมาณ 47–60 มก./100 กรัมเนื้อสด) ซึ่งมีบทบาทเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ กระตุ้นการสร้างคอลลาเจน และเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน (USDA, 2020) รวมทั้งมีวิตามินบี 1 (ไทอามีน) วิตามินบี 6 โฟเลต และแร่ธาตุสำคัญ เช่น แมงกานีส โพแทสเซียม แมกนีเซียม และทองแดง

นอกเหนือจากสารอาหารพื้นฐานแล้ว สับปะรดยังเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด เช่น สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) ฟลาโวนอยด์ และเบตาแคโรทีน ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ลดการอักเสบ และอาจช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Gardner *et al.*, 2000; Wen & Wrolstad, 2002; Kongsuwan *et al.*, 2009) คุณสมบัติที่โดดเด่นของสับปะรดอีกประการหนึ่งคือการเป็นแหล่งของเอนไซม์โบรมีเลน (bromelain) ซึ่งเป็นเอนไซม์ในกลุ่มโปรตีเอส (proteases) ที่มีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนให้เป็นเปปไทด์สายสั้นและกรดอะมิโน (Hale *et al.*, 2005) โบรมีเลนมีการศึกษาว่ามีศักยภาพในการช่วยย่อยอาหาร

ลดการอักเสบ ลดอาการบวมหลังการผ่าตัด และอาจมีคุณสมบัติในการยับยั้งการจับตัวของเกล็ดเลือด (Maurer, 2001) ด้วยองค์ประกอบทางโภชนาการและสารสำคัญดังกล่าว สับปะรดจึงจัดเป็นผลไม้ที่มีคุณค่า ทั้งในแง่ของการบริโภคสด การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร และการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารออกฤทธิ์เพื่อประโยชน์ทางสุขภาพ



ภาพที่ 2.1 การใช้ประโยชน์ที่พบได้ทั่วไปของเศษเหลือสับปะรดในแต่ละองค์ประกอบ
ที่มา: (Vieira et al., 2022)

2.2.3 องค์ประกอบของชีวมวล (Biomass component)

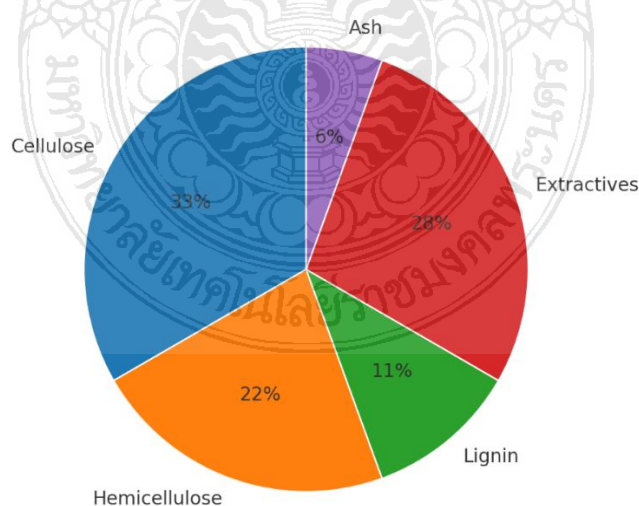
ส่วนประกอบหลักของวัสดุชีวภาพ (biological material) เพื่อแสดงสัดส่วนสารเคมีและองค์ประกอบโครงสร้างที่ประกอบขึ้นเป็นวัตถุดิบนั้นๆ สับปะรดสดทั้งผล (% dry basis) รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 2.2 และในแต่ละส่วนของสับปะรดสด (% dry basis) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.1

Table 2.1 Composition of Different Fractions of Pineapple Processing Wastes

values (% dry basis)				
biomass component	peels	crown	core	pomace
cellulose	20.9 ± 0.6	21.9 ± 1.1	40.3 ± 2.3	39.6 ± 2.9
hemicellulose	31.8 ± 1.9	33.1 ± 1.7	29.6 ± 0.9	30.8 ± 1.5
lignin	10.4 ± 1.0	13.6 ± 2.1	3.5 ± 0.06	2.9 ± 0.1
crude protein	3.9 ± 0.2	2.6 ± 0.3	0.9 ± 0.01	0.3 ± 0.01
total extractives	28.1 ± 2.5	20.8 ± 2.3	22.3 ± 0.3	22.6 ± 0.2
ash	5.1 ± 0.1	7.1 ± 0.1	3.7 ± 0.2	3.0 ± 0.3
organic matter	95.1 ± 0.1	92.8 ± 0.1	96.3 ± 0.2	96.4 ± 0.8

ที่มา: (Banerjee et al., 2022)

คาร์โบไฮเดรตเชิงโครงสร้าง แบ่งเป็น เซลลูโลส พอลิแซ็กคาไรด์สายตรงของกลูโคส ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์ และ เฮมิเซลลูโลส พอลิแซ็กคาไรด์สายกิ่ง มีน้ำตาลหลากหลายชนิด เช่น ไซโลส แมนโนส กาแลคโตส ลิกนิน เป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อนที่มีคุณสมบัติให้ความแข็งแรงและป้องกันการย่อยสลายของผนังเซลล์ สารสกัดได้ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดออกได้ด้วยตัวทำละลาย เช่น น้ำตาล เส้นใยละลายน้ำ ไขมัน น้ำมันหอมระเหย สารประกอบฟีนอลิก เถ้า เป็นแร่ธาตุที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้ และความชื้น คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุ

**ภาพที่ 2.2** องค์ประกอบชีวมวลของสับปรดทั้งผล (% dry basis)

ที่มา: (Chen and Sheen, 2011)

2.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้สับปะรดเป็นผลไม้ยอดนิยมในตลาดรถเข็นของไทย

การที่สับปะรดกลายเป็นหนึ่งในผลไม้ยอดนิยมบนรถเข็นจำหน่ายผลไม้สดในประเทศไทย สามารถอธิบายได้จากหลายปัจจัยเชื่อมโยงกันทั้งด้านโครงสร้างการผลิต พันธุ์พืช เทคโนโลยีการเพาะปลูก ความเหมาะสมทางการตลาด และบริบททางสังคมวัฒนธรรม ดังนี้

2.2.4.1 โครงสร้างการผลิตและการคัดเกรดผลผลิต ประเทศไทยมีผลผลิตสับปะรดเฉลี่ยประมาณ 2 ล้านตันต่อปี โดยร้อยละ 80 ของผลผลิตถูกส่งเข้าสู่อุตสาหกรรมแปรรูป เช่น การผลิตสับปะรดกระป๋องและน้ำสับปะรด (Thai Pineapple Industry Association [TPIA], 2022) กระบวนการคัดเกรดในโรงงานทำให้มีผลสับปะรดที่ไม่ผ่านมาตรฐานด้านขนาดหรือผิวผล แต่ยังมีคุณภาพเนื้อและรสชาติดีไหลเข้าสู่ตลาดสดในราคาที่ต่ำกว่า จึงเอื้อต่อการนำไปจำหน่ายในช่องทางค้าปลีกแบบรถเข็น (Department of Agriculture, 2021)

2.2.4.2 การปลูกและคัดเลือกพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับบริโภคนสด แม้พันธุ์หลักของอุตสาหกรรมแปรรูปจะเป็นกลุ่มปัตตาเวีย (Smooth Cayenne) แต่ได้มีการปลูกพันธุ์ควีน (Queen) เช่น ตราดสีทอง ภูเก็ต ภูเก็ต และศรีราชา ซึ่งมีเนื้อกรอบ หวานหอม และแกนกินได้ ทำให้เหมาะต่อการจำหน่ายผลสดและการขายปลีกริมทาง (Department of Intellectual Property, 2023) การขึ้นทะเบียนสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) ช่วยสร้างการรับรู้และเพิ่มมูลค่าทางการตลาดของพันธุ์เหล่านี้

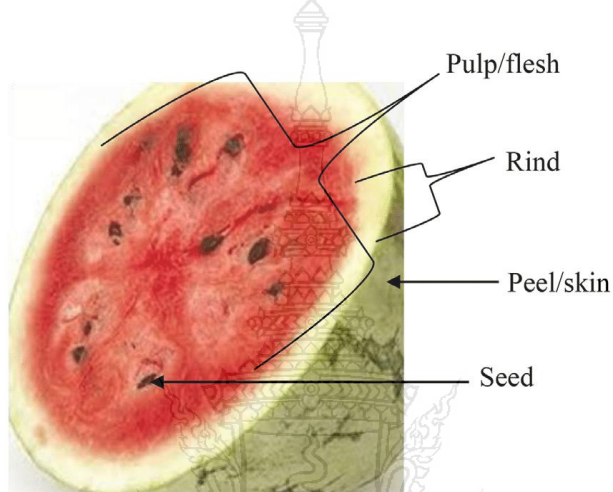
2.2.4.3 เทคโนโลยีการบังคับออกดอกเพื่อให้มีผลผลิตต่อเนื่องตลอดปี การใช้สารกระตุ้น เช่น เอทีฟอน (ethephon) และแคลเซียมคาร์ไบด์ เพื่อบังคับให้สับปะรดออกดอกนอกฤดู เป็นเทคนิคที่เกษตรกรไทยใช้กันแพร่หลาย (Chomchalow, 1992) วิธีนี้ช่วยกระจายผลผลิตให้มีจำหน่ายตลอดปี ลดการพึ่งพาฤดูกาลหลัก ทำให้ผู้ค้ารถเข็นสามารถมีสินค้าสับปะรดสดจำหน่ายอย่างต่อเนื่อง

2.2.4.4 ความเหมาะสมเชิงการตลาดและต้นทุน สับปะรดเป็นผลไม้ที่สามารถปลูกและเตรียมจำหน่ายได้ง่าย ต้นทุนแรงและเวลาเตรียมต่ำเมื่อเทียบกับผลไม้บางชนิด สามารถเก็บรักษาในน้ำแข็งได้หลายชั่วโมงโดยไม่เสียรสชาติ อีกทั้งยังสามารถจำหน่ายในบรรจุภัณฑ์พร้อมบริโภค เช่น ถูกล้างพร้อมไม้จิ้มและพริกเกลือ ในราคาที่เข้าถึงได้ (20–30 บาทต่อถุง) จึงเหมาะกับลักษณะการขายปลีกบนรถเข็นในเขตเมือง (Srisermbhok & Puangprakhon, 2018)

2.2.4.5 บริบททางวัฒนธรรมอาหารริมทางและการบริโภค สับปะรดได้กลายเป็นหนึ่งในผลไม้ “เมนูมาตรฐาน” ของรถเข็นผลไม้ร่วมกับแตงโม ฝรั่ง และมะม่วง ซึ่งเป็นผลไม้ที่คนไทยคุ้นเคย รสหวานฉ่ำของสับปะรดเหมาะกับสภาพอากาศร้อน และมีการโปรโมตพันธุ์เด่นในงานท่องเที่ยวท้องถิ่น ทำให้เกิดการรับรู้และความนิยมบริโภคมากขึ้น (National Food Institute, 2020)

2.3 แตงโม

2.3.1 นิยาม แตงโม (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) จัดอยู่ในวงศ์ Cucurbitaceae เป็นพืชล้มลุกเลื้อยที่ปลูกเพื่อบริโภคผล ผลของแตงโมเป็นผลแบบ pepo ผลมีเปลือกแข็งภายนอกและเนื้อฉ่ำน้ำภายใน มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 90% ของน้ำหนักผลสดและเป็นแหล่งของน้ำตาล เช่น วิตามิน C และสารพฤกษเคมี (phytochemicals) ที่สำคัญ โดยเฉพาะ ไลโคปีน (lycopene) และ ซิทริลลีน (citrulline) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและมีประโยชน์ต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด



ภาพที่ 2.3 ภาพตัดขวางของผลแตงโม แสดงให้เห็นโครงสร้างและองค์ประกอบภายใน
ที่มา: (Neglo *et al.*, 2021)

2.3.2 นิยาม เปลือกแตงโมหมายถึง ส่วนของ pericarp ชั้นนอกและชั้นกลางที่ห่อหุ้มเนื้อผล (mesocarp) โดยแบ่งเป็น Exocarp (ชั้นนอก) ส่วนเปลือกแข็งสีเขียวเข้มถึงเขียวอ่อน มีชั้นแว็กซ์ (cuticle) ปกคลุม และ Mesocarp (ชั้นกลาง) ส่วนสีขาวถึงเขียวอ่อนที่อยู่ถัดเข้ามาภายใน ไม่หวาน แต่มีเส้นใยอาหาร เพกทิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสในปริมาณสูง ในเชิงโภชนาการ เปลือกแตงโมมีความสำคัญเนื่องจากเป็นแหล่งของใยอาหาร, เพกทิน, โพลีแซคคาไรด์เชิงซ้อน และกรดอะมิโนซิทรูลีน ที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันและการผลิตโอลิโกแซคคาไรด์

2.3.3 ที่มาและความสำคัญทางเศรษฐกิจ ในประเทศไทยแตงโมถูกปลูกแพร่หลายทั่วทุกภูมิภาค เนื่องจากเป็นพืชที่ทนต่อสภาพอากาศร้อนและดินร่วนปนทราย โดยเฉพาะภาคเหนือ (เชียงใหม่ ลำพูน), ภาคอีสาน (อุดรธานี หนองคาย) และภาคกลาง (นครปฐม สุพรรณบุรี) ซึ่งเป็นแหล่งผลิตเชิงการค้าที่สำคัญ (กรมวิชาการ เกษตร, 2565)

แตงโมเป็นผลไม้ที่บริโภคกันอย่างกว้างขวางในประเทศไทย โดยเฉพาะฤดูร้อน มีราคาย่อมเยา หาซื้อง่าย และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ทั้งยังเป็นผลไม้ที่นิยมบริโภคสดมากกว่าการแปรรูป แตงโมสดเป็นหนึ่งในผลไม้ส่งออกของไทย โดยมีตลาดหลักคือ จีน ลาว และกัมพูชา มูลค่าการส่งออกแตงโมสดของไทยในปี 2566 อยู่ที่ประมาณ 400–500 ล้านบาท/ปี (กรมศุลกากร, 2566) แม้จะไม่สูงเมื่อเทียบกับทุเรียนหรือมังคุด แต่แตงโมมีบทบาทสำคัญในกลุ่มผลไม้ราคาย่อมเยาที่มีการซื้อขายต่อเนื่องตลอดทั้งปี แตงโมเป็นพืชอายุสั้น 70–90 วัน ใช้ต้นทุนไม่สูงมาก สามารถปลูกเพื่อสร้างรายได้ระยะสั้นหรือเป็นพืชเสริมรายได้หลังฤดูการทำนา จึงมีความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจฐานรากของเกษตรกรไทย นอกจากการบริโภคสดแล้วแตงโมยังถูกนำไปใช้ในการแปรรูป เช่น น้ำแตงโมพร้อมดื่ม น้ำผลไม้ผสม และขนมหวาน นอกจากนี้ ของเหลือทางการเกษตร เช่น เปลือกแตงโม ยังถูกศึกษาเพื่อนำไปใช้ผลิต ไยอาหาร เพกทิน โอลิโกแซคคาไรด์ และกรดอะมิโนซีทรูลีน ซึ่งเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารฟังก์ชันและอุตสาหกรรมชีวภาพ (Lakshmi & Kaushal, 2020; Moise & Alphonse, 2021)

2.4 คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยปกติจะอยู่ในอัตราส่วน 1:2:1 พวกมันเป็นหนึ่งในกลุ่มชีวโมเลกุลที่สำคัญ พวกมันเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบโครงสร้าง ในฐานะที่เป็นสารอาหารสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยว และคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน

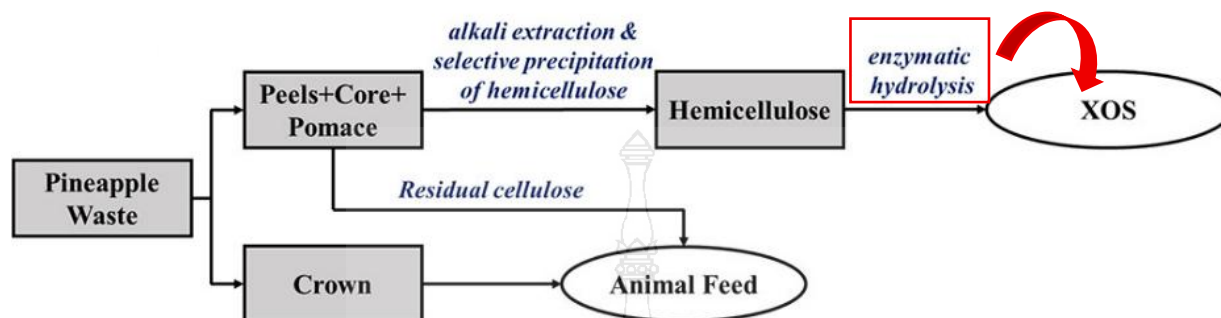
2.4.1 โอลิโกแซคคาไรด์

2.4.1.1 นิยาม โอลิโกแซคคาไรด์ เป็นคาร์โบไฮเดรตใดๆ ที่มีน้ำตาลเชิงเดี่ยวตั้งแต่ 2 ถึง 10 หน่วย (โมโนแซคคาไรด์) มีการเตรียมโอลิโกแซคคาไรด์จำนวนมากโดยการสลายคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (พอลิแซคคาไรด์) บางส่วนโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่สามารถย่อยได้เป็นสารคาร์โบไฮเดรตมวลโมเลกุลต่ำ ประกอบด้วยหน่วยย่อยของโมโนแซคคาไรด์ 3 ถึง 10 โมเลกุล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Li *et al.*, 2020) มีคุณสมบัติหนการย่อยของกรดในกระเพาะอาหารและลำไส้ได้

2.4.1.2 แหล่งที่มาของโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่สามารถย่อยได้ แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ผัก ผลไม้ ธัญพืช ฯ และกลุ่มที่ได้จากการสังเคราะห์

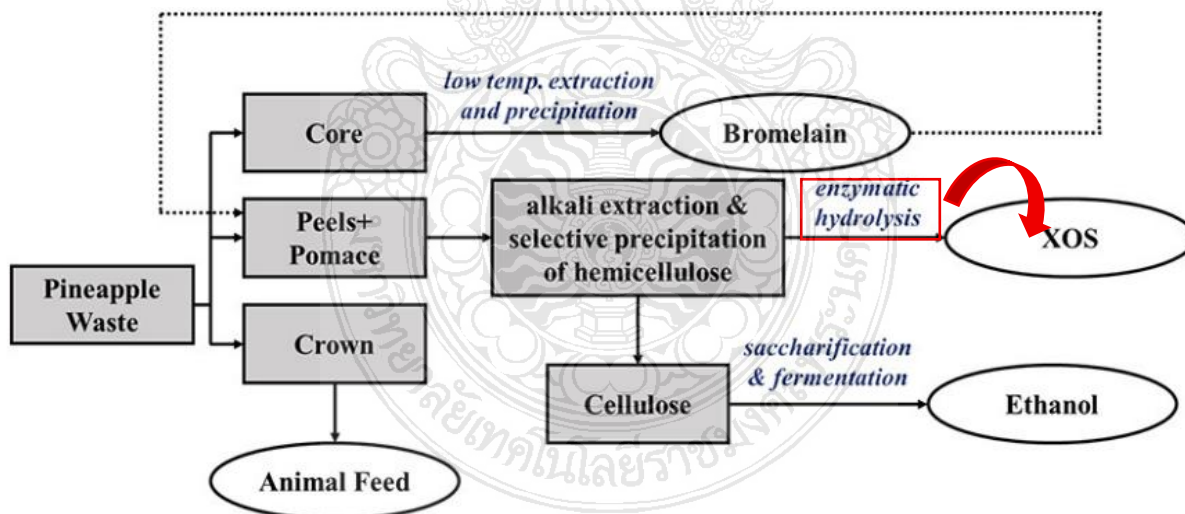
2.4.1.3 การผลิตโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่สามารถย่อยได้ สามารถสกัดได้โดยตรงจากพืช หรือนำพอลิแซคคาไรด์จากธรรมชาติมาลดขนาดโมเลกุลลงโดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) หรือเอนไซม์ (enzyme hydrolysis) เพื่อให้ได้ขนาดโมเลกุลตามที่ต้องการ แสดงแผนภาพงานวิจัยที่ใช้เศษเหลือทิ้งของสับปะรดมาสกัดให้ได้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์ ซึ่งโอลิโกแซคคาไรด์จัดเป็นประเภทหนึ่งของสาร

พรีไบโอติก แสดงดังภาพที่ 2.2 และ 2.3 สารตัวนี้จะถูกย่อยสลายและถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก แต่จะถูกย่อยสลายได้โดยโพรไบโอติก (แบคทีเรียชนิดดี) ในลำไส้ใหญ่ มีความสำคัญในการเป็นอาหาร ฟังก์ชันนัลฟู้ดส์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนของการย่อยเศษเหลือทิ้งสับปะรด ส่วนเปลือกผสมแกนและกากสับปะรดผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์

ที่มา: (Banerjee *et al.*, 2022)



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนของการย่อยเศษเหลือทิ้งสับปะรด ส่วนแกน และส่วนเปลือกผสมกากสับปะรดผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์

ที่มา: (Banerjee *et al.*, 2022)

2.4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรูปแบบน้ำตาลที่ละลายได้

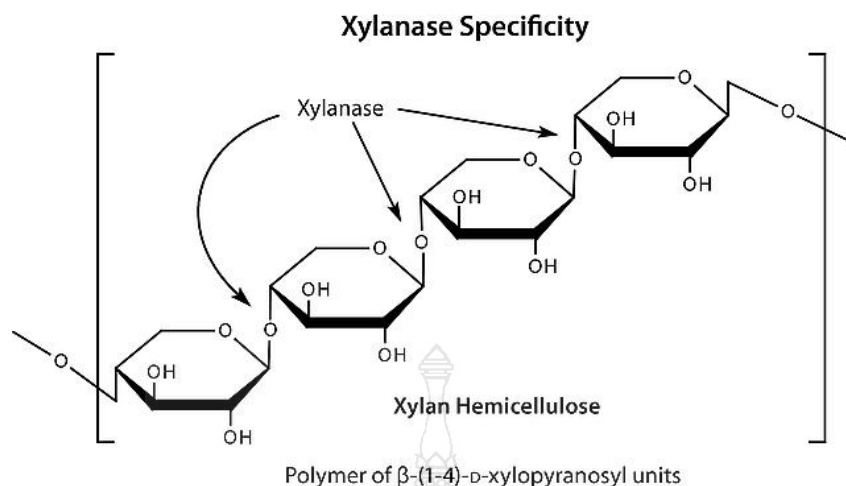
1). น้ำตาลรีดิวซ์ คือ น้ำตาลที่ถูกย่อยสลายหรือที่เรียกกันว่าไฮโดรไลซิส ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือกลุ่มดีไฮด์ หรือกลุ่มคีโตน ซึ่งจะมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่ ในการทดสอบโดย DNS method สามารถนำมาใช้ในการหาความเข้มข้นของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่ที่มีอยู่ได้ โดยใช้สารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก

2). น้ำตาลนอนรีดิวซ์หรือ น้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ คือ น้ำตาลที่ไม่สามารถให้อิเล็กตรอนแก่โมเลกุลอื่นได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ได้ ซูโครสเป็นน้ำตาลที่ไม่ถูกรีดิวซ์ที่พบได้บ่อยที่สุด การเชื่อมโยงระหว่างหน่วยกลูโคสและฟรุกโตสในซูโครสซึ่งเกี่ยวข้องกับหมู่อัลดีไฮด์และคีโตน มีส่วนทำให้ซูโครสไม่สามารถทำหน้าที่เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้

2.5 เอนไซม์

2.5.1 ไซลานเนส

2.5.1.1 นิยาม ไซลานเนส (Xylanase; EC 3.2.1.8) เป็นเอนไซม์ในกลุ่มไกลโคซิเดส (glycoside hydrolase) ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกพันธะไกลโคซิดิกชนิด β -1,4 ของไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นเฮมิเซลลูโลสหลักในผนังเซลล์พืช ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (XOS) และไซโลส (xylose) (Collins *et al.*, 2005; Polizeli *et al.*, 2005) เอนไซม์ชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายวัตถุดิบจากพืช และได้รับการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เยื่อกระดาษ และการผลิตฟรีไบโอติก (Subramaniam & Prema, 2002; Biely, 2012)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางโมเลกุลของไซลเนส

ที่มา: (Williams A., 2016)

2.5.1.2 โครงสร้างและกลไกการทำงาน ไซลเนสเป็นเอนไซม์โปรตีนที่มีการพับตัวของโครงสร้าง (protein fold) แบบเฉพาะ โดยทั่วไปตำแหน่งเร่งปฏิกิริยา (active site) ของเอนไซม์ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ทำหน้าที่เป็น ตัวให้โปรตอน (proton donor) และ ตัวรับนิวคลีโอไฟล์ (nucleophile/base) ซึ่งทำงานร่วมกันในการเร่งการแตกพันธะไกลโคซิดิกของไซลัน (Collins *et al.*, 2005)

ตามเกณฑ์การจัดจำแนกเอนไซม์ตระกูลไกลโคไซด์ไฮโดรเลส (Glycoside Hydrolase; GH) ไซลเนส ถูกแบ่งออกเป็นหลายตระกูล โดยอาศัยโครงสร้างสามมิติและกลไกที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา เช่น GH10 มีโครงสร้างแบบ (α/β) barrel ที่มี active site กว้าง ทำให้สามารถย่อยไซลันที่มีหมู่แทนที่ (substituted xylan) ได้ดี ขณะที่ GH11 มีโครงสร้างแบบ β -jelly roll และ active site แคบ จึงมีความจำเพาะสูงต่อไซลันที่ไม่แทนที่ (unsubstituted xylan) ส่วน GH30 และตระกูลอื่น ๆ มักมีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น การตัดพันธะที่ตำแหน่งเฉพาะหรือสร้างผลิตภัณฑ์ที่จำเพาะ (Pollet *et al.*, 2010; Biely, 2012)

กลไกการเร่งปฏิกิริยาของไซลเนสโดยทั่วไปเป็นแบบ acid-base catalysis ที่มุ่งเป้าไปยังพันธะ β -1,4-glycosidic bond ของโพลีแซ็กคาไรด์ไซลัน โดยมีได้ทั้งสองรูปแบบคือ retention mechanism ซึ่งผลิตภัณฑ์ยังคง configuration เดิมที่คาร์บอนแอนโอเมอร์ริก (anomeric carbon) และ inversion mechanism ซึ่งผลิตภัณฑ์เกิดการกลับด้าน configuration ขึ้นอยู่กับชนิดของตระกูลเอนไซม์และกรดอะมิโนสำคัญภายใน active site (Davies & Henrissat, 1995; Polizeli *et al.*, 2005)

2.5.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของไซลานเนส ไซลานเอสมีความไวต่อปัจจัยทางสภาวะที่หลากหลาย โดยเฉพาะ pH และอุณหภูมิ ซึ่งแตกต่างกันไปตามตระกูลของเอนไซม์และโครงสร้างโปรตีน ตัวอย่างเช่น เอนไซม์ GH11 ที่ถูกพิวชันเข้ากับโดเมนจับคาร์โบไฮเดรต (CBM9) สามารถคงกิจกรรมได้ถึง 70–90 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนโปรไฟล์ pH ไปในทางที่กว้างขึ้นเมื่อเทียบกับเอนไซม์ต้นแบบ (Wang *et al.*, 2023) การประยุกต์ใช้เทคนิคแรงปฏิบัติการภายนอก เช่น ultrasound-assisted hydrolysis ก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยของไซลานเนสกรดได้ถึง 2.5 เท่าในสภาวะ pH 4.3 และ 50 องศาเซลเซียส (Liu *et al.*, 2023)

ในวัตถุดิบธัญพืชยังมีโปรตีนยับยั้งไซลานเนส (xylanase inhibitors) ที่อาจลดประสิทธิภาพการย่อย ทำให้การเลือกสายพันธุ์เอนไซม์และวิธีการพรีทรีตเมนต์วัตถุดิบเป็นขั้นตอนสำคัญ (Payne *et al.*, 2015) นอกจากนี้ ยังมีการรายงานเอนไซม์ที่ทนเกลือสูง ซึ่งยังคงหรือแม้แต่เพิ่มกิจกรรมได้เมื่ออยู่ในสภาวะความเค็มสูง (Patel *et al.*, 2019)

2.5.1.4 การประยุกต์ใช้ไซลานเนสในการผลิตโอลิโกแซคคาไรด์ เช่น ไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (XOS) เป็นโอลิโกแซคคาไรด์สายสั้น (DP 2–7) ที่มีคุณสมบัติพรีไบโอติกโดยเฉพาะในช่วง DP 2–4 ซึ่งช่วยกระตุ้นการเจริญของ *Bifidobacterium* และ *Lactobacillus* (Aachary & Prapulla, 2011) ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา กระบวนการผลิต XOS ส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบเหลือทิ้งจากเกษตร เช่น ชังข้าวโพด แกลบ ชี้เลื่อย หรือกากอ้อย ผ่านการพรีทรีตด้วยวิธี alkaline หรือ hydrothermal ก่อนย่อยด้วยเอนไซม์ไซลานเนส (Samanta *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2022) การเลือกเอนไซม์มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ GH10 มักให้ XOS ที่มีการกระจายตัวของ DP กว้างและย่อยไซแลนที่มีหมู่แทนที่ได้ดี ขณะที่ GH11 ให้ XOS ที่มี DP ต่ำและจำเพาะสูง (Pollet *et al.*, 2010) การใช้เอนไซม์เสริม เช่น arabinofuranosidase หรือ acetyl xylan esterase ช่วยเพิ่มปริมาณ XOS ในวัตถุดิบที่มีการแทนที่สูง (de Freitas *et al.*, 2019)

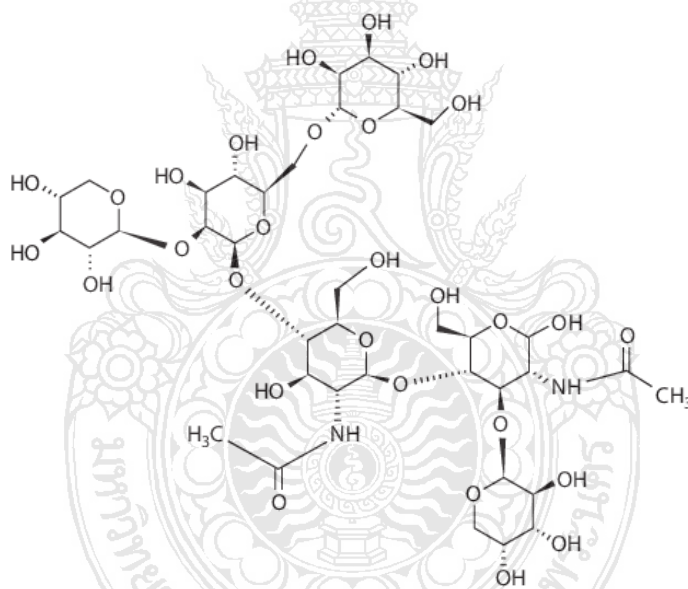
เชิงเทคโนโลยีเสริม ultrasound และ microwave-assisted hydrolysis แสดงผลชัดเจนในการเพิ่มผลผลิตและลดปริมาณไซโลสที่ไม่ต้องการ (Mobarec *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023) ส่วนการใช้เอนไซม์ตรึงรูปในกระบวนการผลิต XOS ก็ช่วยลดต้นทุนและทำให้สามารถใช้ซ้ำในระบบต่อเนื่องได้ (Singh *et al.*, 2023)

ด้านสุขภาพ งานวิจัยในมนุษย์ช่วง 2016–2024 พบว่า XOS ช่วยเพิ่มสัดส่วน *Bifidobacterium* ในลำไส้แม้ใช้ในปริมาณต่ำ (2–4 กรัม/วัน) และอาจช่วยบรรเทาอาการท้องผูกได้ (Broekaert *et al.*, 2016) การเสริมไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (XOS) มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมสุขภาพลำไส้ และไม่พบว่ามีผลข้างเคียงต่อ

ภาวะโภชนาการในผู้สูงอายุ (Chung *et al.*, 2007) คุณสมบัติทนความร้อนและความเป็นกรดของ XOS ยังทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้ในน้ำผลไม้ ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ และผลิตภัณฑ์นม (Vazquez *et al.*, 2022)

2.5.2 โบรมีเลน (Bromelain)

2.5.2.1 นิยาม โบรมีเลน เป็นเอนไซม์โปรตีโอไลติก (proteolytic enzyme) หรือโปรตีเอส (protease) ที่อยู่ในกลุ่มไธโอลโปรตีเอส (thiol protease; cysteine protease) ซึ่งพบมากในสับปะรด (*Ananas comosus*) โดยเฉพาะในก้านและลำต้น (stem bromelain) และในผลสับปะรด (fruit bromelain) (Maurer, 2001) เอนไซม์ชนิดนี้สามารถย่อยพันธะเพปไทด์ของโปรตีนให้เป็นเปปไทด์สายสั้นและกรดอะมิโน จึงมีการประยุกต์ใช้ทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การทำให้เนื้อเปื่อยนุ่ม การผลิตโปรตีนไฮโดรไลเซต และในทางการแพทย์ เช่น การต้านการอักเสบ การช่วยย่อย และการใช้เป็นสารเสริมอาหาร (Colletti *et al.*, 2021; Venetikidou *et al.*, 2025)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของโบรมีเลนในน้ำสับปะรด

ที่มา: (Khalid *et al.*, 2016)

2.5.2.2 โครงสร้างและกลไกการทำงาน โบรมีเลนเป็นเอนไซม์โปรตีเอสที่จัดอยู่ในกลุ่ม cysteine proteases หรือ thiol proteases โดยมีหมู่ซัลไฮดริล (-SH) ของกรดอะมิโน cysteine ที่ตำแหน่ง active site เป็นองค์ประกอบสำคัญในการเร่งปฏิกิริยา (Colletti *et al.*, 2021b) โครงสร้างของโบรมีเลนประกอบด้วย catalytic dyad/triad (Cys-His-Asn) ซึ่งมีบทบาทเป็นตัวเร่งหลัก และในบางไอโซฟอร์มยังพบว่า

มี carbohydrate-binding domain (CBD) ที่สามารถจับกับโพลีแซ็กคาไรด์ได้ ส่งผลให้โบรมีเลนมีศักยภาพในการเข้าถึงและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผนังเซลล์พืชมากกว่าการย่อยโปรตีนเพียงอย่างเดียว (Venetikiidou *et al.*, 2025) นอกจากนี้ โบรมีเลนยังมีความเสถียรในช่วง pH 5–8 และอุณหภูมิ 40–60 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมต่อการย่อยสลายวัตถุดิบทางการเกษตรเพื่อนำไปผลิตสารชีวภาพ

กลไกการเร่งปฏิกิริยาของโบรมีเลนขึ้นอยู่กับ Cys-His catalytic dyad โดยกรดอะมิโน cysteine ทำหน้าที่เป็น nucleophile ในการโจมตีพันธะเปปไทด์ ขณะที่ histidine ทำหน้าที่ถ่ายโอนโปรตอน ส่งผลให้พันธะเปปไทด์แตกตัวเป็นเปปไทด์สั้นและกรดอะมิโนอิสระ แม้โบรมีเลนจะไม่ใช้เอนไซม์ในกลุ่ม ไกลโคซิเดสโดยตรง แต่หลายงานวิจัยพบว่าการสลายโปรตีนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผนังเซลล์โดยโบรมีเลน ช่วยเพิ่มการเข้าถึงของเอนไซม์กลุ่มไฮโดรเลส เช่น ไซลาเนสหรือแมนแนนเนส ต่อเอมิเซลลูโลสภายในวัตถุดิบพืช ซึ่งทำให้กระบวนการผลิตโอลิโกแซ็กคาไรด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Colletti *et al.*, 2021b; Venetikiidou *et al.*, 2025)

ดังนั้น โครงสร้าง active site ของโบรมีเลนและกลไกการเร่งปฏิกิริยาของมันจึงมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็น “เอนไซม์ช่วยเปิดโครงสร้าง” (matrix-degrading enzyme) ที่ส่งเสริมกระบวนการผลิตโอลิโกแซ็กคาไรด์จากวัตถุดิบทางการเกษตรเมื่อใช้ร่วมกับเอนไซม์ไฮโดรเลสของคาร์โบไฮเดรต

2.5.2.3 การประยุกต์ใช้โบรมีเลนในการผลิตโอลิโกแซ็กคาไรด์

1). การย่อยสลายโปรตีนที่ห่อหุ้มเมทริกซ์ของผนังเซลล์พืช ผนังเซลล์ของวัสดุเหลือทิ้ง เช่น เปลือกสับปะรด ประกอบด้วยเซลลูโลส เอมิเซลลูโลส และลิกนิน มักมีโปรตีนหรือโครงสร้างโปรตีนเชื่อมประสาน ซึ่งโบรมีเลนสามารถย่อยสลายโปรตีนเหล่านี้ ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์ “หลวม” และเพิ่มการเข้าถึงของเอนไซม์คาร์โบไฮเดรตไฮโดรเลส เช่น xylanase หรือ β -mannanase

2). การทำงานแบบเสริมฤทธิ์ เมื่อใช้โบรมีเลนร่วมกับเอนไซม์ไฮโดรเลสของคาร์โบไฮเดรต เช่น mannanase หรือ xylanase จะช่วยเพิ่มผลผลิตโอลิโกแซ็กคาไรด์ เนื่องจากโครงสร้างที่เคยถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีนเปิดกว้างขึ้น

3). การลดความซับซ้อนของกระบวนการ การใช้โบรมีเลนจากแหล่งธรรมชาติ เช่น สับปะรดสด หรือของเหลือจากโรงงานแปรรูป เป็นแนวทางที่คุ้มค่า ลดการพึ่งพาเอนไซม์สังเคราะห์ราคาแพง นอกจากนี้ยังสามารถผสมผสานเข้ากับการผลิตแบบ biorefinery ซึ่งดึงประโยชน์จากผลพลอยได้หลายชนิด เช่น โพลีฟีนอล เส้นใยอาหาร และสารต้านอนุมูลอิสระ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Optimization of pretreatment and enzymatic hydrolysis coupled with ultrasonication for the production of xylooligosaccharides from corn cob (Sun *et al.*, 2024)

การใช้เอนไซม์ไซลานเนสจาก *Talaromyces thermophilus* F1208 ร่วมกับเทคนิคอัลตราซาวด์ในการผลิตไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (XOS) จากซังข้าวโพด โดยใช้การผสมผสานระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เพื่อเตรียมไซแลน ทำการปรับสภาพด้วย maleic acid 0.2% ที่ 180 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ให้ผลผลิตไซแลนสูงสุด ประมาณ 20.04% และวิธีอัลตราซาวด์ร่วมกับเอนไซม์ไฮโดรไลซิส (ultrasonic-coupled enzymolysis) สามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ และช่วยลดเวลาในกระบวนการย่อยสลายลงมากกว่า 80% เมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์เพียงอย่างเดียว แสดงถึงศักยภาพของการประยุกต์ไซลานเนสร่วมกับเทคโนโลยีเสริมในการผลิตพรีไบโอติก ซึ่งเป็นทิศทางสำคัญของอุตสาหกรรมอาหารฟังก์ชัน

Process Design and Techno-Economic Feasibility Analysis of an Integrated Pineapple Processing Waste Biorefinery (การออกแบบกระบวนการและการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ของโรงงานชีวภาคแบบบูรณาการจากเศษเหลือการแปรรูปสับประด) (Banerjee *et al.*, 2022)

งานวิจัยนี้ประเมินความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ของโรงงานชีวภาคแบบบูรณาการ (integrated biorefinery) ที่ใช้เศษเหลือจากกระบวนการแปรรูปสับประดเป็นวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานชีวภาคนี้ประกอบด้วย ไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (xylooligosaccharides, XOS), เอทานอล, ซิลิทอล, เอนไซม์โบรมีเลน (bromelain) และไซเลจ (silage)

ประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจของกระบวนการผลิตถูกประเมินโดยใช้การคำนวณในซอฟต์แวร์ ASPEN Plus มีการออกแบบสถานการณ์จำลอง (scenarios) ทั้งหมด 7 รูปแบบ ซึ่งครอบคลุมการผลิตแบบแยกเดี่ยวและการผลิตแบบหลายผลิตภัณฑ์ และทำการประเมินเพิ่มเติมสำหรับกำลังการผลิตฐานที่ 10 ตันต่อชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) พบว่า กำลังการผลิตของโรงงาน และ ราคาขายของผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเศรษฐศาสตร์ของโรงงานอย่างมาก โดยการเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 2 เท่าของค่าฐานทำให้โครงการมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ เช่น กรณีของสถานการณ์ที่ 1 (ผลิตซิลิทอลและไซเลจ) และสถานการณ์ที่ 7 (ผลิตโบรมีเลน ซิลิทอล และไซเลจ) ซึ่งให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 9.2 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และ 8.9 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ตามลำดับ

การเพิ่มราคาขายผลิตภัณฑ์ 25% จากค่าฐานทำให้สถานการณ์ที่ 1 และสถานการณ์ที่ 6 (ผลิตโบรมีเลน ไซลิทอล เอทานอล และไซเลจ) มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ($NPV > 0$) ขณะที่การลดราคาซื้อเศษสับปะรดจาก 25 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน เหลือ 10 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน ทำให้สถานการณ์ที่ 4 (ผลิตโบรมีเลนและไซเลจ) มีกำไร โดยมี NPV เท่ากับ 3.3 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 42%

The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics (ถ้อยแถลงฉันทามติของสมาคมวิทยาศาสตร์นานาชาติด้านโพรไบโอติกและพรีไบโอติก (ISAPP) ว่าด้วยนิยามและขอบเขตของพรีไบโอติก)

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเปลือกสับปะรดในการผลิตไซลิทอล โดยศึกษาศักยภาพของไฮโดรไลเซตจากเปลือกสับปะรด ในฐานะแหล่งคาร์บอนสำหรับการผลิตไซลิทอล (xylitol) โดยออกแบบกระบวนการตั้งแต่ขั้นตอนการปรับสภาพวัตถุดิบ (pre-treatment) จนถึงการหมัก (fermentation) ผลการปรับสภาพด้วยกรดไนตริก 5% ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ภายใต้สภาวะ solid loading 10% ให้ความเข้มข้นไซโลสสูงสุดประมาณ 20 กรัมต่อลิตร

การประเมินความสามารถในการหมักได้ทำในสองแนวทาง ได้แก่ (1) การปรับค่า pH ของอาหารเลี้ยงเชื้อสังเคราะห์ที่มีกรดแอสติคเป็นตัวยับยั้งหลัก และ (2) การใช้ไฮโดรไลเซตผสมกับแหล่งไนโตรเจนหลากชนิด ผลการทดลองพบว่า ค่า pH 7 ให้ค่าอัตราผลผลิตไซลิทอลสูงสุด 0.35 กรัมต่อกรัม ขณะที่ยูเรียซึ่งมีต้นทุนต่ำ ให้ค่าอัตราผลผลิต 0.31 กรัมต่อกรัม แตกต่างจากการใช้ yeast extract เพียง 0.01 กรัมต่อกรัม แสดงถึงศักยภาพของยูเรียในการทดแทนแหล่งไนโตรเจนที่มีราคาสูงโดยไม่กระทบประสิทธิภาพการผลิต

นอกจากนี้ค่าอัตราผลผลิตจากอาหารเลี้ยงเชื้อสังเคราะห์และไฮโดรไลเซตมีความใกล้เคียงกัน คือ 0.35 และ 0.32 กรัมต่อกรัม บ่งชี้ว่ากรดแอสติคเป็นปัจจัยจำกัดหลักในกระบวนการหมักจากเปลือกสับปะรดไฮโดรไลเซต งานวิจัยนี้แสดงถึงศักยภาพของการใช้ประโยชน์ชีวมวลจากเปลือกสับปะรดเพื่อลดปริมาณของเสียแต่ยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาอุตสาหกรรมชีวภาคที่ยั่งยืน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

3.1 วัสดุดิบ

3.1.1 เปลือกสับปะรดสด พันธุ์ปัตตาเวีย

3.1.2 เปลือกแตงโมสด พันธุ์จินตรา

3.2 สารเคมี

3.2.1 เอนไซม์โบรมีเลน

3.2.2 เอนไซม์ไซลาลเนส

3.2.3 น้ำกลั่น

3.2.4 บัฟเฟอร์ (acetate buffer pH 5.0)

3.2.5 Phenol

3.2.6 98% Sulfuric acid

3.2.7 3,5-Dinitrosalicylic acid (DNS)

3.2.8 Sodium potassium tartrate

3.2.9 2N Sodium hydroxide

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.1 อุปกรณ์สำหรับการสกัด

3.3.1.1 เครื่องปั่นความเร็วสูง

3.3.1.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

3.3.1.3 เครื่องเขย่า (Shaker)

3.3.1.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter)

3.3.1.5 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Hand refractometer)

3.3.1.6 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

3.3.1.7 เครื่องแก้ว

3.3.1.8 เครื่องครัว

3.3.2 อุปกรณ์การกรอง เช่น กระจาดกรองหรือเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

3.3.3 อุปกรณ์การตรวจวิเคราะห์

3.3.3.1 spectrophotometer

3.3.3.2 คิวเวต

3.4 วิธีการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำตาลนอนรีดิวซ์ซิง (non-reducing) จากเศษเหลือทิ้งของผลไม้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ

3.4.2 คัดเลือกวัสดุเหลือทิ้ง

3.4.2.1 กำหนดชนิดผลไม้เป้าหมาย ระบุผลไม้ที่มีการบริโภคสูงและพบขายทั่วไปในรถเข็น เช่น แตงโม สับปะรด มะละกอ ฝรั่ง มะม่วง และทำการคัดเลือกชนิดผลไม้ที่มีปริมาณของเหลือทิ้งมาก เช่น เปลือกแกนกลาง หรือกากที่เหลือจากการหั่น และพิจารณาคุณสมบัติทางโภชนาการหรือองค์ประกอบทางเคมีที่คาดว่าจะแหล่งคาร์โบไฮเดรต เส้นใย หรือสารที่สามารถสกัดได้

3.4.3 การเก็บตัวอย่าง

3.4.3.1 พื้นที่ศึกษา กำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่าง คือ ร้านรถเข็นขายผลไม้บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3.4.3.2 วิธีการสุ่มเก็บ ใช้การสุ่มแบบเจาะจง (purposive sampling) โดยเลือกจากร้านรถเข็นขายผลไม้บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3.4.3.3 ปริมาณตัวอย่าง เก็บอย่างน้อย 2-3 กิโลกรัมต่อชนิดผลไม้ เพื่อให้เพียงพอต่อการทำซ้ำ (replicate) ในการทดลอง

3.4.4 การตรวจสอบคุณภาพของวัสดุเหลือทิ้ง

3.4.4.1 ตรวจสอบสภาพทางกายภาพ เลือกเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่เน่าเสีย ไม่มีเชื้อรา ไม่มีกลิ่นผิดปกติ และไม่ปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอม

3.4.4.2 ความสด คัดเลือกเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นใหม่ภายในวันเดียวกัน (ไม่ค้างคืน) เพื่อลดความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพของสารสำคัญ

3.4.4.3 คัดแยกสิ่งปนเปื้อน เช่น แยกเศษพลาสติก ไม้เสียบ หรือสิ่งแปลกปลอมออก

3.4.4.4 การล้างเบื้องต้น ล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อลดสิ่งสกปรกที่ติดมากับเปลือกวัสดุเหลือทิ้ง

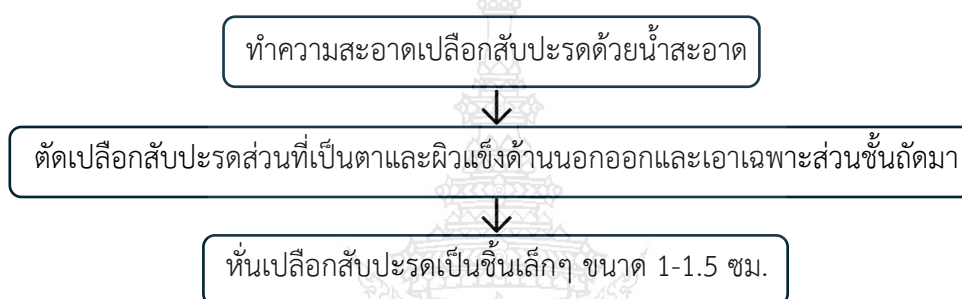
3.4.4.5 บันทึกวัน เวลาในการเก็บ และข้อมูลที่ตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้นทั้งหมด

3.4.5 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยเศษเหลือทิ้งด้วยเอนไซม์ ในการทดลองนี้วางแผนแบบการทดลอง factorial design $2 \times 3 \times 3$ รวมเป็น 18 สิ่งทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยมีปัจจัยทดลอง ดังนี้

- 1). ชนิดวัสดุเหลือทิ้ง ได้แก่ เปลือกสับปะรด, เปลือกแตงโม
- 2). อัตราส่วนของชนิดของวัสดุเหลือทิ้งต่อเอนไซม์ คือ 1:1, 1:2 และ 2:1 และ
- 3). ระยะเวลาในการย่อย คือ 30, 45 และ 60 นาที ซึ่งขั้นตอนการย่อยโดยใช้เอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) คือ ไฮลาเนส มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.5.1 การเตรียมส่วนของวัสดุเหลือทิ้งเพื่อนำไปย่อย

1). การเตรียมเปลือกสับปะรด สามารถดำเนินการวิจัยได้ตามขั้นตอนดังนี้



2). การเตรียมเปลือกแตงโม สามารถดำเนินการวิจัยได้ตามขั้นตอนดังนี้

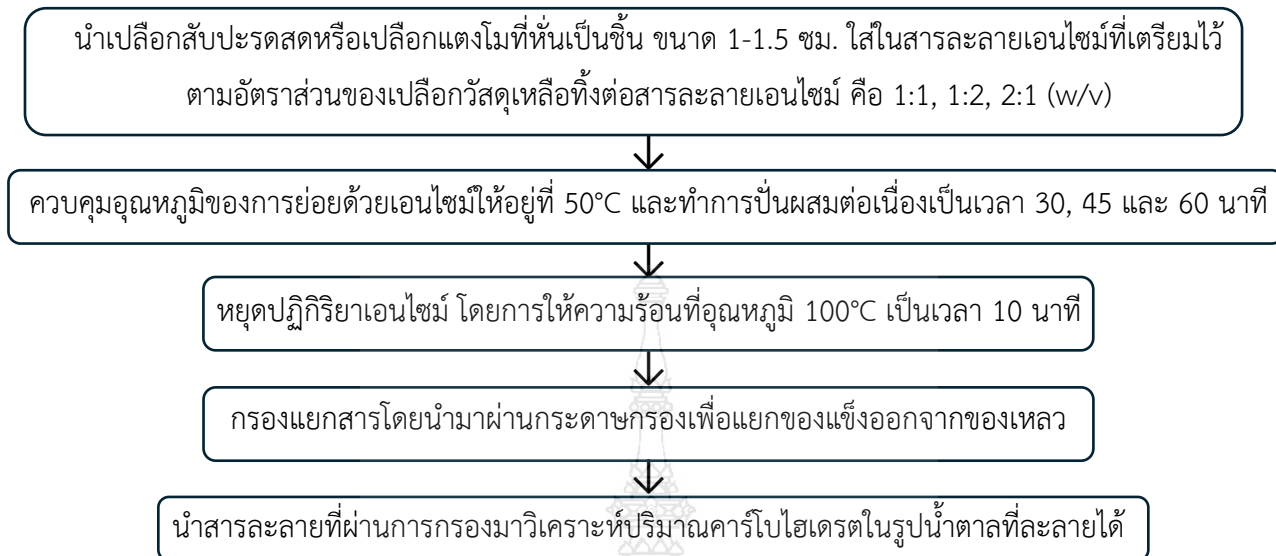


ตารางที่ 3.1 วางแผนการทดลองแบบ factorial design 2x3x3

สิ่งทดลอง	ชนิดเศษเหลือทิ้ง	เอนไซม์ที่ใช้ย่อย	อัตราส่วนของเศษเหลือ ทิ้งต่อเอนไซม์	ระยะเวลาในการย่อย (นาที)
1	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	1:1	30
2	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	1:1	45
3	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	1:1	60
4	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	1:2	30
5	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	1:2	45
6	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	1:2	60
7	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	2:1	30
8	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	2:1	45
9	เปลือกสับปะรด	ไซลาเนส	2:1	60
10	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	1:1	30
11	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	1:1	45
12	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	1:1	60
13	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	1:2	30
14	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	1:2	45
15	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	1:2	60
16	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	2:1	30
17	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	2:1	45
18	เปลือกแตงโม	ไซลาเนส	2:1	60

3.4.6 การเตรียมสารละลายเอนไซม์ไซลาเนส เตรียมสารละลายเอนไซม์ไซลาเนสในอะซิเตทบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 5.0 โดยควบคุมความเข้มข้นของเอนไซม์ตามที่กำหนด (% w/v)

3.4.6.1 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์



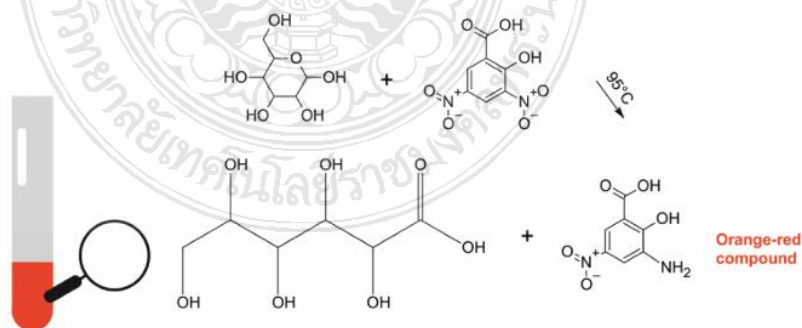
3.4.7 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรูปน้ำตาลที่ละลายได้

3.4.7.1 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid method (DNS method) ตามวิธีการ Miller (1959)

นำส่วนใสของสารละลายที่ได้จากการกรอง ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตรเติมสารละลาย 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) 1.0 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดนาน 5 นาที แล้วแช่ในน้ำเย็นทันทีนาน 5 นาที เติมน้ำกลั่น 10.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยเปรียบเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลไซโลส

DNS method

- Absorption maxima at 540 nm

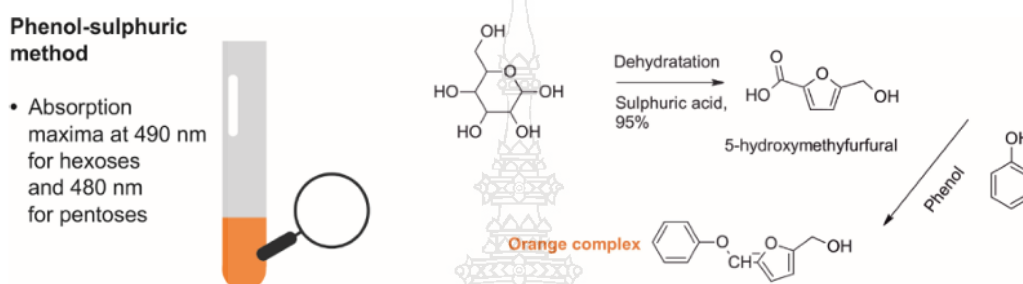


ภาพที่ 3.1 ภาพแผนผังแสดงการตรวจวัดน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ โดยอาศัยหลักการทดสอบเชิงสีด้วยวิธี Dinitrosalicylic Acid (DNS)

ที่มา: (Kurzyna-Szklarek *et al.*, 2022)

3.4.7.2 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (total sugar) ด้วยวิธี Phenol sulfuric method ตามวิธีการ (DuBois *et al.*, 1956)

นำส่วนใสของสารละลายที่ได้จากการกรอง ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอล 5% (w/w) 1.0 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (95–98%) 5.0 มิลลิลิตร ลงในสารละลายอย่างรวดเร็ว แล้วเขย่าให้ผสมเป็นเนื้อเดียว ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลไซโลส



ภาพที่ 3.2 ภาพแผนผังแสดงการตรวจวัดน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ โดยอาศัยหลักการทดสอบเชิงสีด้วยวิธี Phenol-Sulphuric Acid

ที่มา: (Kurzyńska-Szklarek *et al.*, 2022)

3.4.7.3 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ซิง (non-reducing sugar) ด้วยการคำนวณตามสมการดังนี้

$$\text{ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ซิง} = \text{ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด} - \text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ซิง}$$

3.4.8 ศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน

3.4.8.1 เลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ขนมหวาน คือ บัวลอย

3.4.8.2 ประยุกต์ใช้โดยการทดลองพัฒนาสูตรและกรรมวิธีการผลิตด้วยการใช้น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ซิงจากเศษเหลือทิ้งของผลไม้มาผลิตบัวลอย โดยแสดงดังแผนภาพต่อไปนี้

ขั้นตอนการเตรียมแป้งวัลลอย ดัดแปลงจาก พิมพ์ภัทร์ (2561)

เทน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60–65 องศาเซลเซียส ผสมกับแป้งข้าวเหนียว และน้ำตาลอนรีตวิซซิ่ง (ตามสัดส่วน) คลุกแป้งให้ได้โดว์เนียน พักโดว์ 20–30 นาที ปั่น 8–10 มิลลิเมตร/เม็ด



นำเม็ดแป้งไปต้มในน้ำเดือด นาน 2-3 นาที หรือจนอุณหภูมิแกนกลางเม็ดแป้ง มีอุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนการเตรียมซอสกะทิ ดัดแปลงจาก พิมพ์ภัทร์ (2561)

ผสมกะทิและน้ำตาลอนรีตวิซซิ่ง ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 72–75 องศาเซลเซียส นาน 1-2 นาที คนสม่ำเสมอ แล้วบรรจุร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส



นำแป้งวัลลอยที่สุกแล้วเสียบใส่ไม้ และราดซอสกะทิที่เตรียมไว้



ทำการบรรจุปิดผนึก ทำเย็นเร็วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง



เก็บที่ 4 องศาเซลเซียส

3.4.9 การเผยแพร่สาริตการประยุกต์ใช้น้ำตาลอนรีตวิซซิ่งที่สกัดได้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน

โดยนำผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่ได้จากการศึกษาไปทำการเผยแพร่ ณ คณะเทคโนโลยีคหกรรม-ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3.4.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการประเมินคุณภาพทางกายภาพและเคมีใช้การวางแผนการทดลองแบบ Factorial design และทางประสาทสัมผัสใช้การวางแผนการทดลองแบบ Randomize Complete Block Design (RCBD) แล้ววิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.4.11 สถานที่และระยะในการดำเนินงาน

3.4.11.1 ห้องปฏิบัติการ 521 สาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3.4.11.2 ห้องปฏิบัติการ 523 สาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3.4.11.3 ห้องปฏิบัติการ 621 สาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

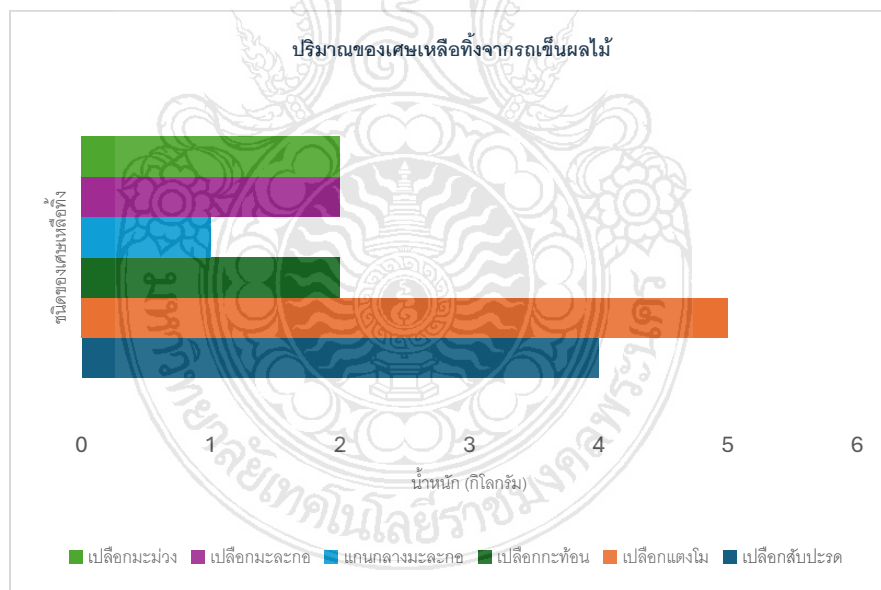
3.4.11.4 ห้องประชุมโชติเวช ชั้น 4 อาคารเรือนปัญญา คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลการลงพื้นที่สำรวจร้านจำหน่ายผลไม้แบบรถเข็นผลไม้ บริเวณด้านหน้าคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร แสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่ามีการคัดแยกและจำหน่ายผลไม้สดหลากหลายชนิดแก่ผู้บริโภคในแต่ละวัน กระบวนการเตรียมผลไม้เพื่อการจำหน่าย ได้แก่ การปอกเปลือกและการหั่นเป็นชิ้นพร้อมรับประทาน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจากผลไม้ในปริมาณมาก จากการเก็บข้อมูลเพื่อตรวจสอบแหล่งที่มาของเศษวัสดุเหลือทิ้ง พบว่า เปลือกสับปะรด (exocarp), เปลือกแตงโม (mesocarp) และ แกนกลางมะละกอ (central mesocarp) เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาศึกษาต่อยอดอย่างใดก็ตาม ปริมาณการเหลือทิ้งของแกนกลางมะละกอน้อยมาก (เฉลี่ยไม่เกิน 2 กิโลกรัมต่อวัน) จึงไม่เพียงพอต่อการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองครั้งนี้ ดังนั้น การศึกษาจึงมุ่งเน้นไปที่ เปลือกสับปะรด และ เปลือกแตงโม ซึ่งมีปริมาณเหลือทิ้งมากและเหมาะสมต่อการนำมาวิเคราะห์ต่อไป



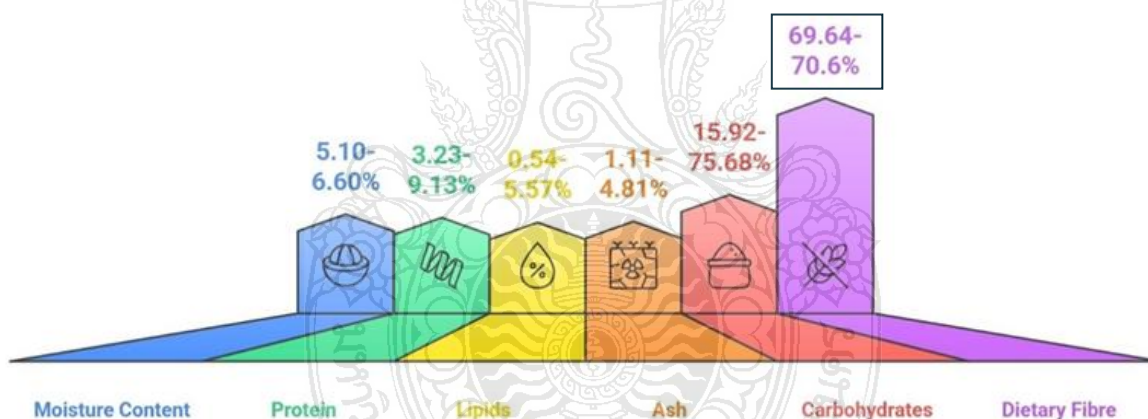
ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแสดงน้ำหนักของเศษผลไม้เหลือทิ้งโดยเฉลี่ยต่อวันจากร้านค้ารถเข็นผลไม้บริเวณหน้าเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

จากการเก็บข้อมูลและสุ่มเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง (purposive sampling) พบว่า เปลือกสับปะรด และเปลือกแตงโม เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้ชนิดอื่น สามารถเก็บได้

มากกว่า 3 กิโลกรัม/วัน เนื่องจากสับปะรดมีอัตราส่วนของเนื้อที่รับประทานได้ประมาณ 50–60% ของผล ขณะที่ ส่วนเปลือก แกนกลาง และตาสับปะรดเป็นส่วนที่ต้องถูกตัดทิ้งเพื่อความสะดวกและความปลอดภัยในการบริโภค แตงโม มีลักษณะผลใหญ่และมีสัดส่วนเปลือกที่หนามาก (ประมาณ 30–40% ของน้ำหนักผลทั้งหมด) จึงกลายเป็นของเหลือทิ้งในปริมาณมากเมื่อมีการหั่นและจำหน่ายเป็นชิ้น

เศษวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอาหารที่ยังมีองค์ประกอบทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น เส้นใยอาหาร (dietary fiber), เซลลูโลส (cellulose), เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose), เพกทิน (pectin), และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิด (bioactive compounds) การคัดเลือกวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการวิจัยและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยมีศักยภาพสำหรับการสกัดสารชีวโมเลกุล (biomolecules) หรือการพัฒนาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารและสุขภาพในอนาคต

เปลือกสับปะรดมีเส้นใยอาหารทั่วไป (total dietary fiber) อยู่ระหว่าง 69.6–70.6% ของน้ำหนักแห้ง (แสดงดังภาพที่ 4.2) และยังเป็นแหล่งของ สารโพลีฟีนอล (polyphenols), สารฟลาโวนอยด์ (flavonoids), และ เอนไซม์โบรมีเลน (bromelain) ที่มีประโยชน์ด้านต้านอนุมูลอิสระและอื่นๆ (Das *et al.*, 2025)



ภาพที่ 4.2 องค์ประกอบทางโภชนาการของเปลือกสับปะรด

ที่มา: Das *et al.*, 2025

เปลือกแตงโมมีเส้นใยอาหารสูงถึงประมาณ 55% รวมไฟเบอร์ทั้งละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ (แสดงดังตารางที่ 4.1) และอุดมไปด้วย สารฟีนอลิก (phenolic compounds), วิตามิน C, โพแทสเซียม, และ ซิทูลีน (citrulline) (Ben Romdhane *et al.*, 2024)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของผงเปลือกแตงโม

Component (g/100 g)	Average Content
Moisture	13.00 ± 0.74
Proteins	17.00 ± 0.13
Fat	2.00 ± 0.14
Ash	2.00 ± 0.56
Total carbohydrate	66.00 ± 2.2
Total fiber	55.00 ± 1.8
Soluble fiber	9.00 ± 0.72
Insoluble fiber	46.00 ± 2.6
Cellulose	21.00 ± 0.30
Hemicellulose	25.00 ± 2.3
Minerals (mg/100 g)	
K	601 ± 17
Ca	346 ± 12
Na	287 ± 10
Mg	124 ± 6
Zn	3 ± 0.03
Mn	0.7 ± 0.01
Fe	1.5 ± 0.02
Cu	<0.001

ที่มา: (Ben Romdhane *et al.*, 2024)

การเลือกเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโมเป็นวัตถุดิบในการย่อยด้วยเอนไซม์ เนื่องจากเปลือกสับปะรดมี เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส แมนแนน และเพกทิน ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบสำคัญสำหรับการผลิตโอลิโกแซคคาไรด์ ส่วนเปลือกแตงโมมี เพกทิน ไฟเบอร์ และโพลีแซคคาไรด์เชิงซ้อน ที่สามารถนำไปสู่การผลิตน้ำตาลเชิงฟังก์ชัน อีกทั้งเปลือกของผลไม้ทั้งสองชนิดมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ คือ สับปะรดมีเอนไซม์โบรมีเลนและสารฟีนอลิก และเปลือกแตงโมมีไลโคพีน กรดอะมิโน (เช่น citrulline) และสารต้านอนุมูลอิสระ สิ่งเหล่านี้ช่วยเพิ่มมูลค่าเชิงโภชนาการและสุขภาพแก่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ และการที่โครงสร้างของแมนแนน ไฮแลน หรือเพกทิน เมื่อถูกย่อยจะได้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์ที่มีฤทธิ์ส่งเสริมจุลินทรีย์ดีในลำไส้ ซึ่งสามารถย่อยสลายเป็นโอลิโกแซคคาไรด์ที่มีคุณสมบัติพรีไบโอติก อีกทั้งวัสดุเหล่านี้ยังเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปและการค้าผลไม้ที่มีปริมาณมาก จึงมีต้นทุนต่ำแต่มีศักยภาพสูงในการเพิ่มมูลค่า การใช้ประโยชน์ดังกล่าวไม่เพียงช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม แต่ยังสอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาที่ยั่งยืน ทั้งนี้จึงทำการเก็บเฉพาะเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโมเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

4.2 ผลการตรวจสอบคุณภาพของเศษเหลือทิ้งจากรถเข็นขายผลไม้ ทำโดยวิธีการพรรณนา (Descriptive test) และใช้การวิเคราะห์ค่า pH และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโม (n=30)

ชนิดเศษเหลือทิ้ง	สี	Munsell Color System	กลิ่น	pH	°Brix
เปลือกสับปะรด	เหลืองปนเขียว	- 5GY 6/6 (สีเขียวออกเหลืองสด) - 10Y 7/6 (เหลืองอมเขียวค่อนข้างสว่าง)	- กลิ่นหอมสับปะรดชัดเจน - ไม่มีกลิ่นฉุนหรือกลิ่นหมัก	4.10 ± 0.10	10.5 ± 0.5
เปลือกแตงโม	ขาวปนเขียว	- 5GY 9/2 (ขาวอมเขียวอ่อน) - 10GY 8/1 (ขาวปนเขียวซีด)	- กลิ่นแตงโมจาง ไม่ชัดเจน - ไม่มีกลิ่นฉุนหรือกลิ่นหมัก	5.50 ± 0.50	2.5 ± 0.5

ค่า pH และ °Brix ของเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดของสารที่สามารถสกัดได้ในขั้นตอนต่อไป โดยเปลือกสับปะรดซึ่งมีค่า pH ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 3–4) และ °Brix สูง (ประมาณ 8–12 °Bx) สะท้อนถึงการมีกรดอินทรีย์และน้ำตาลอิสระในปริมาณมาก จึงเหมาะสำหรับการสกัดเพกทินและสารฟีนอลิก รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาเป็นโอลิโกแซคคาไรด์ได้หากมีการปรับสภาวะให้เหมาะสมกับเอนไซม์ (Misran *et al.*, 2019) ขณะที่เปลือกแตงโมมีค่า pH ใกล้เคียงกลาง (ประมาณ 5–6) และ °Brix ต่ำ (ประมาณ 2–3 °Bx) บ่งชี้ถึงปริมาณของแข็งละลายน้ำต่ำแต่ยังคงมีโครงสร้างใยอาหารและโพลีแซคคาไรด์เชิงซ้อนอยู่สูง จึงเหมาะสมต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อผลิตโอลิโกแซคคาไรด์เชิงหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ashoka *et al.*, 2022)

4.3 การเตรียมเศษเหลือทิ้งจากร้านค้ารถเข็นผลไม้ เพื่อให้เปลือกสับปะรด และเปลือกแตงโม เป็นตัวตั้งต้น (substrate) ในการย่อยด้วยการใช้เอนไซม์ในขั้นตอนต่อไป

4.3.1 การเตรียมเปลือกสับปะรด (แสดงดังภาพที่ 4.3)



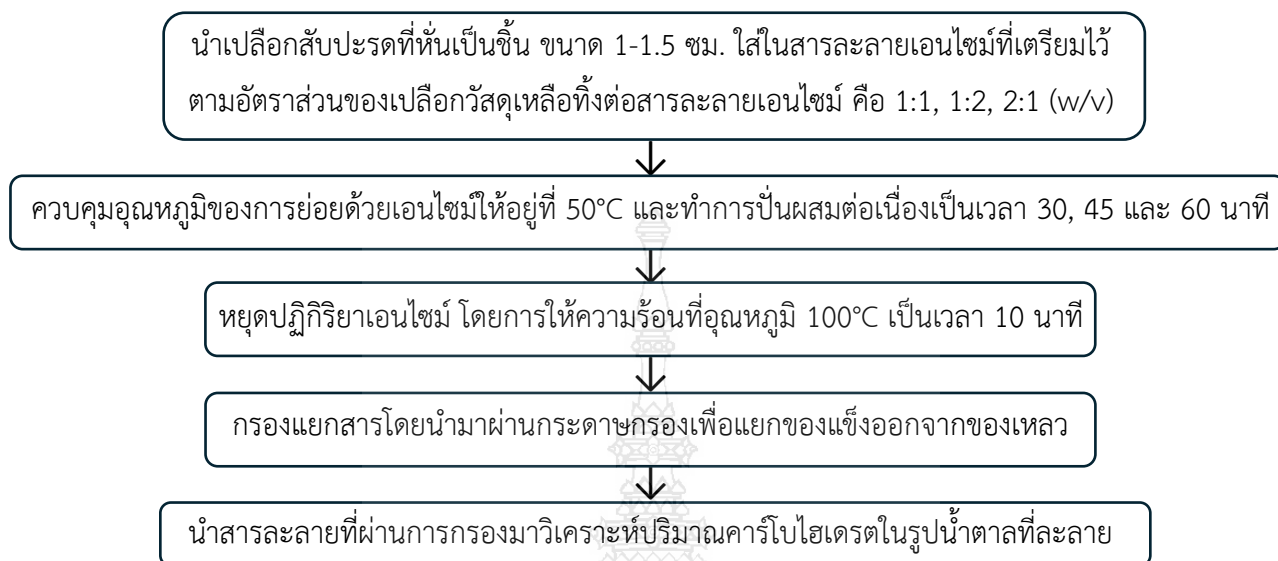
ภาพที่ 4.3 การเลือกชิ้นส่วนและหั่นเปลือกสับปะรดเพื่อใช้เป็นตัวตั้งต้นในการย่อยด้วยเอนไซม์

4.3.2 การเตรียมเปลือกแตงโม (แสดงดังภาพที่ 4.4)

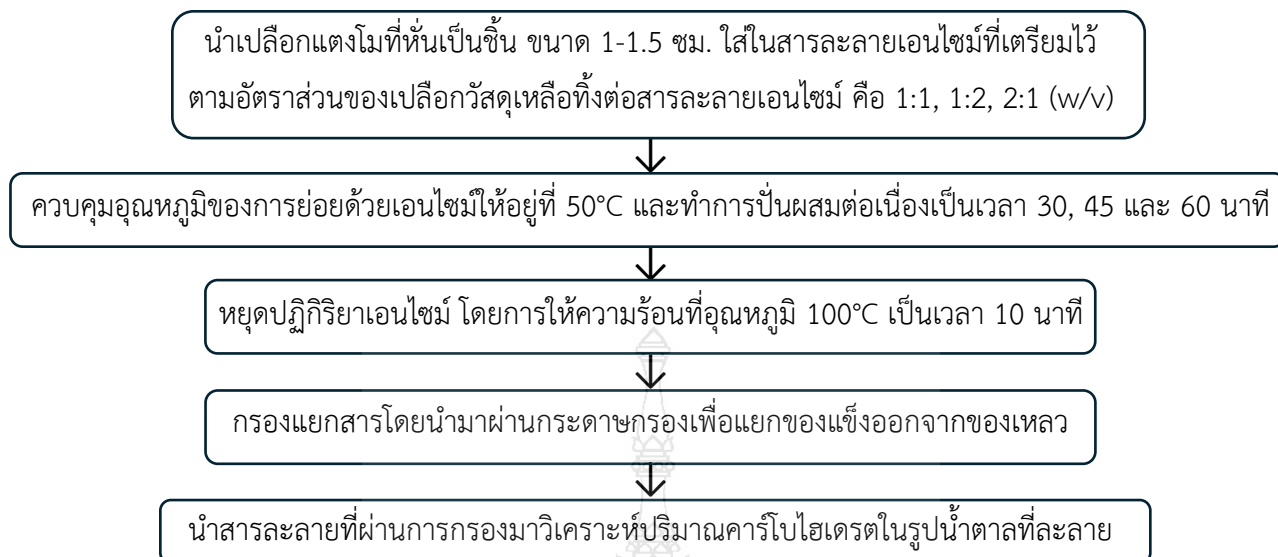


ภาพที่ 4.4 การเลือกชิ้นส่วนและหั่นเปลือกแตงโมเพื่อใช้เป็นตัวตั้งต้นในการย่อยด้วยเอนไซม์

4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยเศษเหลือทิ้งด้วยเอนไซม์



ภาพที่ 4.5 ขั้นตอนการย่อยเปลือกสับปะรดด้วยเอนไซม์



ภาพที่ 4.6 ขั้นตอนการย่อยเปลือกแตงโมด้วยเอนไซม์

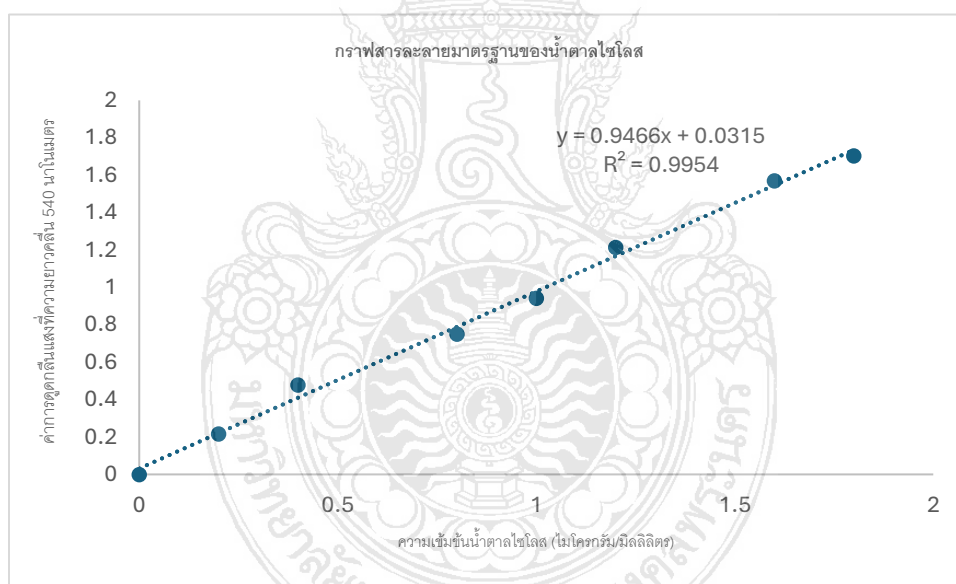
จากการทดลองทำการย่อยเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโม สารที่ได้จะมีความข้นหนืดซึ่งเป็นสารละลายไฮโดรไลเสตที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์และโอลิโกแซคคาไรด์ รวมถึงสารประกอบที่ไม่ต้องการ เช่น โปรตีน เซลลูโลส และฟีนอลิกบางชนิด (Leong & Chang, 2022; Nguyen *et al.*, 2024) ดังนั้น ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล จึงจำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างให้เหมาะสมเพื่อป้องกันการรบกวนต่อปฏิกิริยาการทดสอบ โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการย่อย จะหยุดการทำงานของเอนไซม์เพื่อไม่ให้เกิดการไฮโดรไลซิสต่อเนื่อง ซึ่งอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาด วิธีที่ใช้คือการให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที (DuBois *et al.*, 1956; Miller, 1959) และจากนั้นสารไฮโดรไลเสตที่ได้จะมีปริมาณตะกอนและเส้นใยปริมาณมาก จึงต้องทำให้ใสโดยการกรองผ่านกระดาษกรอง เพื่อลดสิ่งเจือปนที่อาจรบกวนการอ่านค่าการดูดกลืนแสง (Kurzyńska-Szklarek *et al.*, 2022)

สำหรับโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากการสกัด เช่น ไฮโลโอลิโกแซคคาไรด์ แมนโนโอลิโกแซคคาไรด์ จะได้จากผนังเซลล์ โดยการย่อยของเอนไซม์ ได้แก่ xylanase, β -mannanase, cellulase/hemicellulase และ

สำหรับเพกทิน คือ endo-polygalacturonase/pectin lyase ซึ่งโดยมากทำงานเหมาะที่ pH ประมาณ 4.5–6.0 และที่อุณหภูมิ 45–60 องศาเซลเซียส การย่อยในสภาวะอ่อน (mild) จะช่วยคงโครงสร้างเป็นสายสั้นระดับ DP2–DP6 ที่มีฤทธิ์พรีไบโอติกดีกว่าการแตกตัวจนเป็นโมโนแซคคาไรด์ (Abdelhameed *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2021)

โดยในการวางแผนการศึกษาสภาวะการย่อยที่เหมาะสม ทำการวางแผนการทดลองแบบ factorial design 2x3x3 และทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรูปน้ำตาลที่ละลายได้ โดยเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลไซโลส

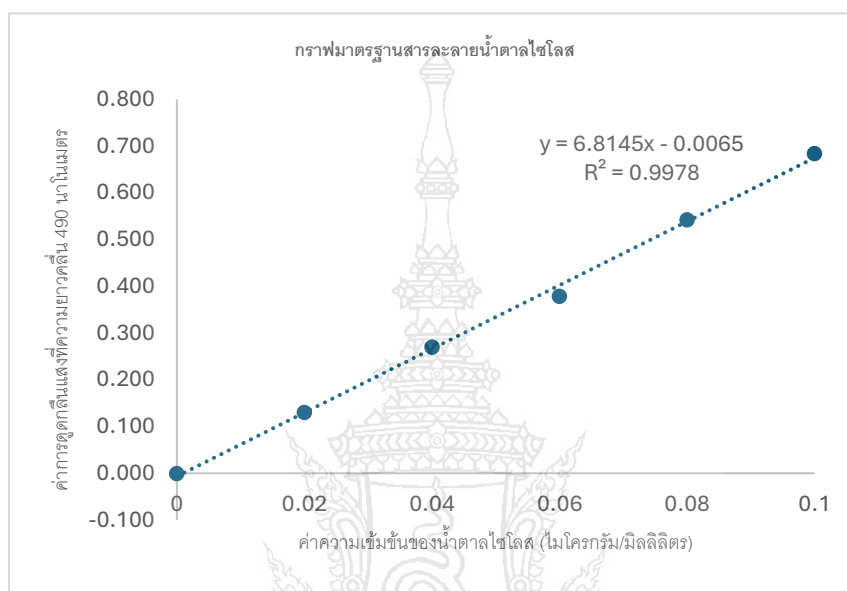
สารละลายมาตรฐานของไซโลสถูกเตรียมในช่วงความเข้มข้น 0–100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร และทำปฏิกิริยากับ DNS จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร เพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน โดยพล็อตค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) บนแกน y เทียบกับความเข้มข้นของไซโลส (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) บนแกน x (แสดงตามภาพที่ 4.7)



ภาพที่ 4.7 กราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลไซโลสในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเข้มข้นของไซโลส โดยได้สมการเชิงเส้น $y = 0.9466X + 0.0315$ ($R^2 = 0.9954$) ซึ่งใช้เป็นสมการอ้างอิงในการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในแต่ละสิ่งทดลองหรือสภาวะที่ศึกษา โดย y = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง, m = ความชันของกราฟ, b = จุดตัดแกน y (intercept), และ x = ความเข้มข้นของน้ำตาล (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)

จากสมการกราฟมาตรฐานที่ได้ จึงนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยใช้สมการเชิงเส้นที่ได้เป็นเกณฑ์ในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งผลการคำนวณแสดงในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อแทนค่าการดูดกลืนแสงของสิ่งทดลองในสมการมาตรฐาน จึงสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.8 กราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลไซโลสในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

กราฟมาตรฐานของน้ำตาลไซโลสที่ใช้เป็นสารมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดยเตรียมสารละลายในช่วงความเข้มข้น 0–100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร และทำปฏิกิริยากับสารละลายฟีนอลซัลฟูริก และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 นาโนเมตร ผลการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความเข้มข้นของไซโลส โดยได้สมการเชิงเส้น $y = 6.8145x - 0.0065$ ($R^2 = 0.9978$) ซึ่งใช้เป็นสมการอ้างอิงในการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในแต่ละสิ่งทดลองหรือสถานะที่ศึกษา โดย y = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง, m = ความชันของกราฟ, b = จุดตัดแกน y (intercept), และ x = ความเข้มข้นของน้ำตาล (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)

จากสมการกราฟมาตรฐานที่ได้ จึงนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยใช้สมการเชิงเส้นที่ได้เป็นเกณฑ์ในการหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ซึ่งผลการคำนวณแสดงในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อแทนค่าการดูดกลืนแสงของสิ่งทดลองในสมการมาตรฐาน จึงสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

นอกจากการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์แล้ว ยังได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ซึ่งในสิ่งทดลองด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงคำนวณหาปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ซึ่งจากความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (จากวิธี Phenol-Sulfuric Acid) และน้ำตาลรีดิวซ์ (จากวิธี DNS) แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรูปน้ำตาลที่ละลายได้ที่ได้จากการใช้เปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโม

ชนิด เอนไซม์	อัตราส่วนของ เศษเหลือทิ้งต่อ เอนไซม์	ระยะเวลาใน การย่อย (นาที)	ปริมาณน้ำตาล รีดิวซ์ (มก./มล.)	ปริมาณน้ำตาล ทั้งหมด (มก./มล.)	ปริมาณน้ำตาล นอนรีดิวซ์ซึ่ง (มก./มล.)
P					
X	1:1	30	0.89 ^c ± 0.10	1.20 ^d ± 0.06	0.30 ^d ± 0.10
X	1:1	45	1.38 ^b ± 0.08	1.56 ^{cd} ± 0.12	0.18 ^d ± 0.08
X	1:1	60	1.48 ^b ± 0.11	1.89 ^c ± 0.10	0.41 ^{cd} ± 0.11
X	1:2	30	1.05 ^c ± 0.05	1.65 ^c ± 0.13	0.60 ^c ± 0.08
X	1:2	45	1.04 ^c ± 0.09	1.55 ^{cd} ± 0.09	0.51 ^c ± 0.12
X	1:2	60	0.97 ^c ± 0.10	1.24 ^d ± 0.10	0.27 ^d ± 0.12
X	2:1	30	1.63 ^a ± 0.04	2.50 ^b ± 0.08	0.87 ^b ± 0.10
X	2:1	45	1.71 ^a ± 0.06	3.12 ^a ± 0.11	1.41 ^a ± 0.08
X	2:1	60	1.81 ^a ± 0.10	3.56 ^a ± 0.08	1.75 ^a ± 0.06
W					
X	1:1	30	0.89 ^{abc} ± 0.06	1.36 ^d ± 0.12	0.47 ^d ± 0.11
X	1:1	45	0.93 ^{abc} ± 0.10	1.58 ^{cd} ± 0.09	0.65 ^d ± 0.08
X	1:1	60	0.95 ^{abc} ± 0.05	1.72 ^c ± 0.06	0.77 ^{cd} ± 0.13
X	1:2	30	1.58 ^a ± 0.08	2.18 ^b ± 0.08	0.60 ^d ± 0.10
X	1:2	45	1.43 ^{ab} ± 0.06	2.79 ^a ± 0.05	1.36 ^b ± 0.05
X	1:2	60	1.38 ^{ab} ± 0.02	3.20 ^a ± 0.10	1.82 ^a ± 0.08
X	2:1	30	0.73 ^d ± 0.07	1.32 ^d ± 0.08	0.59 ^d ± 0.10
X	2:1	45	0.82 ^{cd} ± 0.10	1.84 ^c ± 0.11	1.02 ^{bc} ± 0.10
X	2:1	60	0.90 ^{abc} ± 0.10	2.01 ^{bc} ± 0.13	1.11 ^{bc} ± 0.09

หมายเหตุ: P = เปลือกสับปะรด, W = เปลือกแตงโม, X = เอนไซม์ไซลเลนส,

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3) ในแถวเดียวกัน ค่าที่มีตัวอักษรยกกำกับต่างกัน (a, b, c) หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p \leq 0.05$

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากเปลือกสับปะรดมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.89–1.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญไปยังช่วง 1.38–1.48 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ก่อนจะสูงสุดในช่วง 1.63–1.81 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเมื่อเวลาการย่อยหรือสภาวะที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น เอนไซม์ไซลาเนสสามารถย่อยเฮมิเซลลูโลสในเปลือกสับปะรดได้มากขึ้น ส่งผลให้มีการปลดปล่อยน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่ระบุว่า การย่อยเฮมิเซลลูโลสด้วยไซลาเนสมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามเวลาและเข้าสู่ระดับคงตัวเมื่อซับสเตรตลดลง (Kumar *et al.*, 2018; Arora & Nandal, 2020; Zhang *et al.*, 2022)

ผลการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์จากการย่อยเปลือกแตงโมด้วยเอนไซม์ไซลาเนส พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.73–1.58 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยค่าที่สูงที่สุดเกิดขึ้นในสภาวะที่เอนไซม์สามารถเข้าถึงและย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของการใช้เอนไซม์ในอัตราส่วนสูงเพื่อเร่งการปลดปล่อยน้ำตาลออกมา เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกสับปะรด พบว่าเปลือกแตงโมให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำกว่าในภาพรวม ซึ่งอาจเป็นผลจากองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผนังเซลล์ที่แตกต่างกัน แนวโน้มที่ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นตามเวลาในทั้งสองชนิดของซับสเตรตถือเป็นลักษณะปกติของปฏิกิริยาเอนไซม์ โดยในระยะเริ่มต้นจะมีการปลดปล่อยน้ำตาลออกมาอย่างต่อเนื่องก่อนเข้าสู่ระยะคงตัว (plateau) เมื่อซับสเตรตถูกใช้จนหมด เอนไซม์เสื่อมสภาพ หรือเกิดการยับยั้งจากผลิตภัณฑ์ที่สะสม (Kumar *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022) ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของสมบัติทางเคมีและโครงสร้างเซลล์ในวัตถุดิบที่ต่างชนิดกัน โดยเปลือกสับปะรดสามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงในสภาวะที่มีซับสเตรตมากกว่าเอนไซม์ ในขณะที่เปลือกแตงโมต้องอาศัยเอนไซม์ในปริมาณสูงกว่าจึงจะได้ผลผลิตมากขึ้น สะท้อนถึงความจำเป็นในการปรับสภาวะการย่อยให้เหมาะสมกับชนิดของวัตถุดิบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลที่มีมูลค่าเพิ่มและการใช้ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน ผลการทดลองนี้จึงสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของไซลาเนสในการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลไม้เป็นน้ำตาลที่มีมูลค่าเพิ่ม และสามารถใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารและไบโอรีไฟเนอรีได้ในอนาคต

สำหรับปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (ดังตารางที่ 4.3) พบว่า จากการย่อยเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโมด้วยเอนไซม์ไซลาเนสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเมื่อเวลาการย่อยนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการย่อยโพลีแซคคาไรด์โดยเอนไซม์ไฮโดรเลสที่สามารถปลดปล่อยทั้งน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ และโอลิโกแซคคาไรด์ออกมาสะสมในสารละลาย (Kumar *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2019) โดยทั่วไปค่าของน้ำตาลทั้งหมดจะสูงกว่าน้ำตาลรีดิวซ์ในทุกช่วงเวลา เนื่องจากวิธีวัดน้ำตาลทั้งหมดตรวจจับได้ทั้งน้ำตาลที่มีสมบัติรีดิวซ์และไม่มีสมบัติรีดิวซ์ ขณะที่น้ำตาลรีดิวซ์ตรวจจับเฉพาะกลุ่มที่มีหมู่คาร์บอนิลอิสระ (Zhang *et al.*, 2022) ในกรณีของเปลือกสับปะรด พบว่า ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุดในช่วง 3.12–3.56 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

การเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเอนไซม์ในการย่อยเฮมิเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นตามเวลาต่อสภาวะการทดลองที่เหมาะสม โดยเมื่อการย่อยดำเนินไปนานขึ้น ปริมาณโพลีแซคคาไรด์ถูกตัดสั้นและละลายออกมาในรูปของน้ำตาลรีดิคซ์และน้ำตาลรวมมากขึ้นจึงได้ค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของอัตราส่วนยับยั้งต่อเอนไซม์ที่ 2:1 ให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงสุด เนื่องจากปริมาณเฮมิเซลลูโลสและสารละลายน้ำในเปลือกสับปะรดค่อนข้างสูง ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงและเร่งการย่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะที่ยังไม่เกิดการอิ่มตัวเร็วเกินไป ขณะที่เปลือกแตงโมต้องการอัตราส่วนที่มีเอนไซม์มากกว่า คือ 1:2 เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำตาลรวมสูงสุด อาจเป็นเพราะโครงสร้างผนังเซลล์ของเปลือกแตงโมมีความหนาแน่นและมีสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าเปลือกสับปะรด จึงต้องการเอนไซม์ในปริมาณสูงขึ้นเพื่อเร่งการปลดปล่อยน้ำตาล (Arora & Nandal, 2020) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในเปลือกแตงโมมีค่าสูงสุดในช่วง 2.79–3.20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร การเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวบ่งชี้ถึงการทำงานของเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยน้ำตาลออกมาเพิ่มขึ้นตามเวลาและสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ทั้งนี้ค่ามีแนวโน้มเข้าสู่ plateau เมื่อถึงระดับสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของปฏิกิริยาเอนไซม์ที่ผลผลิตจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในช่วงต้น ก่อนคงตัวเมื่อยับยั้งการทดลองหรือเอนไซม์เสื่อมสภาพ (Singh *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2022)

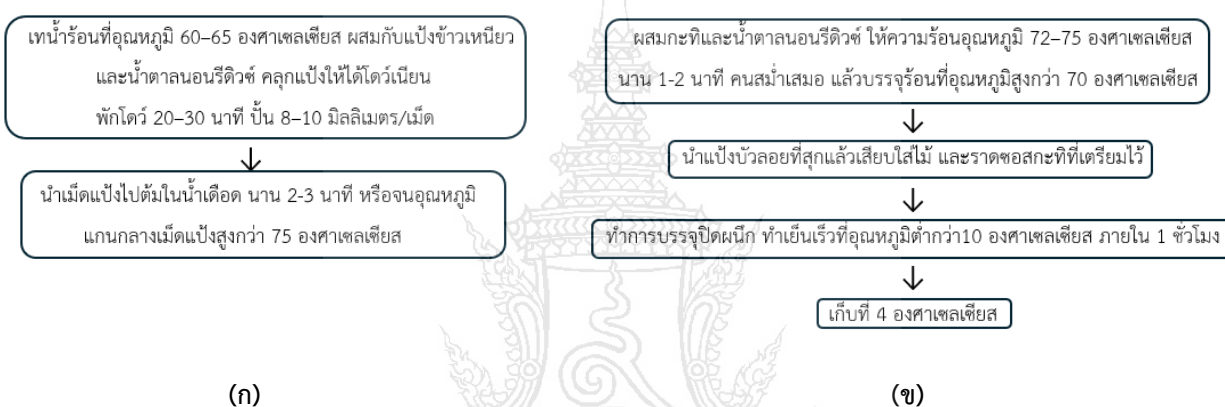
ในส่วนของค่าปริมาณน้ำตาลนอนรีดิคซ์ ตามตารางที่ 4.3 พบว่า ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิคซ์ของเปลือกสับปะรดมีค่าระหว่าง 0.18–1.75 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยค่าสูงสุดในช่วง 1.41–1.75 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร บ่งชี้ว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ไซลาเนสทำให้โพลีแซคคาไรด์ที่ยังไม่ถูกย่อยสลายค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของน้ำตาลนอนรีดิคซ์มากขึ้นตามระยะเวลาการย่อย ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกการย่อยโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสที่ในช่วงแรกน้ำตาลรีดิคซ์จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อการย่อยดำเนินไปนานขึ้นปริมาณน้ำตาลนอนรีดิคซ์ที่เป็นโอลิโกแซคคาไรด์และไดแซคคาไรด์ก็จะเพิ่มขึ้นควบคู่กัน ทำให้ภาพรวมของน้ำตาลทั้งหมดสูงขึ้นตามเวลา (Kumar *et al.*, 2018; Arora & Nandal, 2020; Zhang *et al.*, 2022) สำหรับเปลือกแตงโม พบว่าปริมาณน้ำตาลนอนรีดิคซ์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.47–1.82 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าสูงสุด คือ 1.82 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ผลลัพธ์เช่นนี้ก่อให้เกิดศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ตลอดจนการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันและอาหารสุขภาพในอนาคต

ทั้งนี้จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิคซ์ที่ได้จากการย่อยเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโมด้วยเอนไซม์ไซลาเนสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการย่อย โดยเปลือกสับปะรดให้ปริมาณสูงกว่าเปลือกแตงโม ซึ่งสะท้อนถึงองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสที่แตกต่างกัน น้ำตาลนอนรีดิคซ์ดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นโอลิโกแซคคาไรด์ที่ไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในทางเดินอาหารของมนุษย์ แต่สามารถทำหน้าที่เป็นพรีไบโอติกสามารถกระตุ้น

การเจริญของจุลินทรีย์สุขภาพ เช่น *Lactobacillus* และ *Bifidobacterium* และก่อให้เกิดกรดไขมันสายสั้น (SCFAs) ซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพลำไส้ การเผาผลาญพลังงาน และภูมิคุ้มกัน การใช้ประโยชน์จากน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้ จึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นส่วนประกอบของอาหารฟังก์ชันและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ (functional foods) ที่ตอบสนองต่อแนวโน้มการบริโภคเพื่อสุขภาพในปัจจุบัน

4.5 ผลการนำน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน

ผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่คัดเลือกมาเพื่อนำน้ำตาลนอนรีดิวิซ์ไปใช้เป็นส่วนผสม คือ บัวลอย ดัดแปลงจากพิมพ์ภัสร์ (2561)



ภาพที่ 4.9 ขั้นตอนการทำบัวลอยน้ำตาลนอนรีดิวิซ์เสียบไม้ (ก) เม็ดแป้งบัวลอย (ข) ซอสกะทิ



ภาพที่ 4.10 บรรยากาศการเผยแพร่บัวลอยเสียบไม้ น้ำตาลนอนรีดิวิซ์ ณ ห้องประชุมโชติเวช ชั้น 4 อาคารเรียนปัญญา คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการย่อยเปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโมด้วยเอนไซม์ไซลาเนส พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ที่ได้จากเปลือกสับปะรดมีค่าต่ำสุด 0.89–1.05 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และสูงสุด 1.63–1.81 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สะท้อนถึงการปลดปล่อยน้ำตาลเพิ่มขึ้นตามเวลาหรือสภาวะที่เหมาะสมของเอนไซม์ ส่วนเปลือกแตงโมมีค่า 0.73–1.58 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยปริมาณโดยรวมต่ำกว่าเปลือกสับปะรด ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างทางโครงสร้างผนังเซลล์และองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (total sugars) ทั้งเปลือกสับปะรดและแตงโมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามเวลา โดยเปลือกสับปะรดให้ค่ามากที่สุด 3.12–3.56 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ขณะที่เปลือกแตงโมให้ค่ามากที่สุด 2.79–3.20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (non-reducing sugars) เปลือกสับปะรดมีค่า 0.18–1.75 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และเปลือกแตงโมมีค่า 0.47–1.82 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาการย่อย สะท้อนถึงการปลดปล่อยโอลิโกแซคคาไรด์และไดแซคคาไรด์จากการทำงานของเอนไซม์

น้ำตาลนอนรีดิวซ์มีศักยภาพเป็นพรีไบโอติก โดยสามารถเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์สุขภาพ เช่น *Lactobacillus* และ *Bifidobacterium* และก่อให้เกิด SCFAs ที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพลำไส้ ระบบเผาผลาญ และภูมิคุ้มกัน ดังนั้นการย่อยด้วยเอนไซม์ไซลาเนสสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากร้านค้ารถเข็นขายผลไม้ (เปลือกสับปะรดและเปลือกแตงโม) ให้กลายเป็นแหล่งน้ำตาลที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อสุขภาพและการแปรรูปชีวมวล (biomass) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเพิ่มปัจจัยในการทดลอง เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนชั้นสเตอรต่อเอนไซม์ที่หลากหลายมากขึ้น ควบคุมสภาวะ pH และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของไซลเนสอย่างละเอียด เพื่อหาสภาวะที่ให้ผลผลิตสูงสุด

5.2.2 การวิเคราะห์เชิงลึกของผลิตภัณฑ์ โดยใช้เทคนิค HPLC, TLC หรือ LC-MS ในการแยกชนิดและปริมาณของโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้ เพื่อยืนยันชนิดของน้ำตาลนอนรีดิวิซ์

5.2.3 ทดสอบ Prebiotic activity assay โดยใช้ *Lactobacillus* และ *Bifidobacterium* เพื่อยืนยันศักยภาพการเป็นพรีไบโอติก



เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2565). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย. สืบค้นจาก <https://www.pcd.go.th>
เมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2568

กรมวิชาการเกษตร. (2565). ข้อมูลการผลิตแตงโมในประเทศไทย

กรมศุลกากร. (2566). รายงานมูลค่าการส่งออกผลไม้สดและแปรรูปของไทย

จินดา พงษ์พันธ์. (2547). การศึกษาปริมาณคาร์โบไฮเดรตในส่วนที่ไม่บริโภคมะพร้าว.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Aachary, A. A., & Prapulla, S. G. (2011). Xylooligosaccharides (XOS) as an emerging prebiotic.
Critical Reviews in Biotechnology, 31(2), 137–152.

Abdelhameed, A. S., Ang, S., Morris, G. A., Smith, I., Lawson, C., Gahler, R., Wood, S., & Harding, S. E. (2010). An analytical ultracentrifuge study on ternary mixtures of konjac glucomannan supplemented with sodium alginate and xanthan gum. *Carbohydrate Polymers*, 81(1), 145-148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.01.043>

Anupunt, P., Chairidchai, P., Kongswat, A., Isawilanon, S., Subhadrabhandu, S., Vasunun, S., & Siripat, S. (2000). THE PINEAPPLE INDUSTRY IN THAILAND. *Acta Hort.* 529, 99-110 DOI: 10.17660/ActaHortic.2000.529.11. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.529.11>

Arora, A., & Nandal, P. (2020). Xylan-degrading enzymes and their industrial applications: A review. *Biocatalysis and Biotransformation*, 38(5), 341–351. <https://doi.org/10.1080/10242422.2019.1699766>

Ashoka, S., Shamshad, B. S., & Vijayalaxmi, K. G. (2022). Physico-chemical properties and Nutritional Composition of Watermelon (*Citrullus lanatus*) and its Rind Flour. *Biological Forum– An International Journal*. 14(2a): 505-510.

Banerjee, S., Munagala, M., Shastri, Y., Vijayaraghavan, R., Patti, A. F., & Arora, A. (2022). Process Design and Techno-Economic Feasibility Analysis of an Integrated Pineapple Processing Waste Biorefinery. *ACS Engineering Au*, 2(3), 208–218. <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.1c00028>

- Ben Romdhane, M., Bouallegue, A., Bourhia, M., Bougatef, A., Salamatullah, A. M., Ellouz-Chaabouni, S., & Haddar, A. (2024). Watermelon Rind Dietary Fibers as Natural Source to Enhance Texture of Wheat Bread. *Foods*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/foods13182909>
- Biely, P. (2012). Microbial xylanolytic systems. *Trends in Biotechnology*, 30(9), 398–406.
- Broekaert, W. F., Courtin, C. M., Verbeke, K., Van de Wiele, T., Verstraete, W., & Delcour, J. A. (2016). Prebiotic and other health-related effects of cereal-derived arabinoxylans, arabinoxylan-oligosaccharides, and xylooligosaccharides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14), 1342–1363.
- Chen, W. H., Ye, S. C., & Sheen, H. K. (2011). Hydrolysis characteristics of sugarcane bagasse pretreated by dilute acid solution in a microwave irradiation environment. *Applied Energy*, 88(8), 2726–2734.
- Chen, Y., Xie, Y., Ajuwon, K. M., Zhong, R., Li, T., Chen, L., Zhang, H., Beckers, Y., & Everaert, N. (2021). Xylo-Oligosaccharides, Preparation and Application to Human and Animal Health: A Review. *Front Nutr*, 8, 731930. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.731930>
- Chomchalow, N. (1992). Pineapple production in Thailand. *Acta Horticulturae*, 334, 67–74. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.334.6>
- Chomicki, G., & Renner, S. S. (2015). Watermelon origin solved with molecular phylogenetics including Linnaean material: another example of museomics. *New Phytologist*, 205(2), 526–532.
- Chung, Y.-C., Hsu, C.-K., Ko, C.-Y., & Chan, Y.-C. (2007). Dietary intake of xylooligosaccharides improves the intestinal microbiota, fecal moisture, and pH value in the elderly. *Nutrition Research*, 27(12), 756–761. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nutres.2007.09.014>
- Colletti, A., Attanzio, A., & Tesoriere, L. (2021a). Recent advances and insights into bromelain processing and other valuable proteases from pineapple by-products. *Applied Sciences*, 11(18), 8428.
- Colletti, A., Li, S., Marengo, M., Adinolfi, S., & Cravotto, G. (2021b). Recent advances and insights into bromelain processing and other valuable proteases from pineapple by-products. *Applied Sciences*, 11(18), 8428.

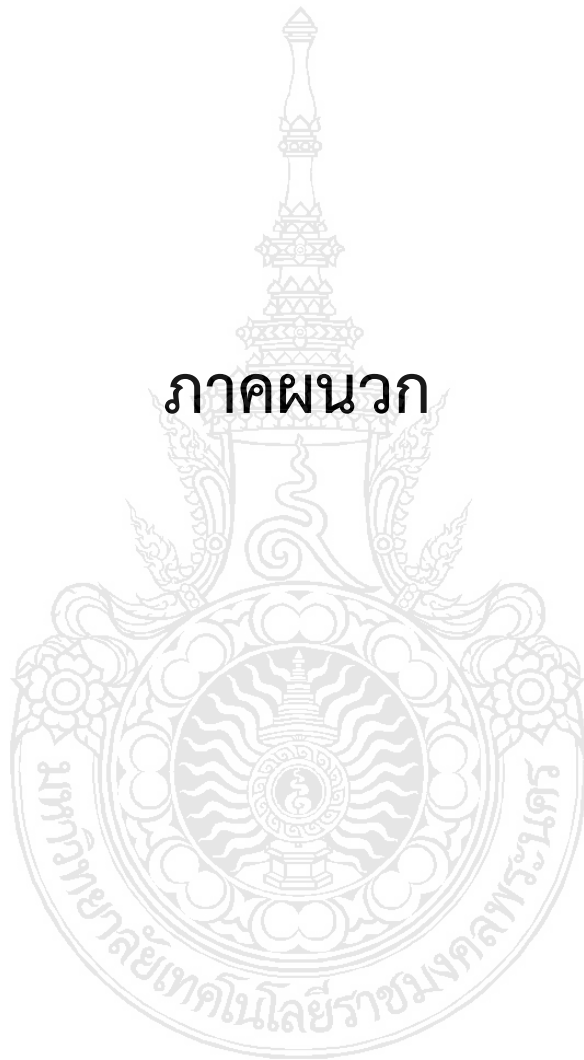
- Collins, T., Gerday, C., & Feller, G. (2005). Xylanases, xylanase families and extremophilic xylanases. *FEMS Microbiology Reviews*, 29(1), 3–23.
- Das, B. A., Shankar, P., Mishra, A. R. K., & Parveen, Z. (2025). From waste to vitality: pineapple peel in detox drink-A review. *International Journal of Novel Research and Development* (www.ijnrd.org).
- Davies, G., & Henrissat, B. (1995). Structures and mechanisms of glycosyl hydrolases. *Structure*, 3(9), 853–859.
- Department of Agriculture. (2021). Good Agricultural Practices for pineapple production. *Ministry of Agriculture and Cooperatives*.
- Department of Intellectual Property. (2023). Geographical Indications (GI) of Thailand. *Ministry of Commerce*.
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- FAO. (2020). Fruit and vegetables-your dietary essentials. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- FAO. (2023). FAOSTAT statistical database: Pineapple production. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Gardner, P. T., White, T. A., McPhail, D. B., & Duthie, G. G. (2000). The relative contributions of vitamin C, carotenoids and phenolics to the antioxidant potential of fruit juices. *Food Chemistry*, 68(4), 471–474. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00225-3)
- Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. A., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid, G. (2017). The ISAPP consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 14(8), 491–502. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2017.75>
- Hale, L. P., Greer, P. K., Trinh, C. T., & James, C. L. (2005). Proteinase activity and stability of natural bromelain preparations. *International Immunopharmacology*, 5(4), 783–793. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2004.12.007>

- Kethnawa, S., Chaiwut, P., & Rawdkuen, S. (2012). Pineapple wastes: A potential source for bromelain extraction. *Food and Bioproducts Processing*, 90(3), 385–391.
- Khalid, N., Suleria, H., & Ahmed, I. (2016). Pineapple Juice. *In* (pp. 489-498). <https://doi.org/10.1201/b19490-43>
- Kongsuwan, A., Dechsakulwatana, C., & Singanusong, R. (2009). Phenolic compounds and antioxidant activities of different parts of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.). *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 43(2), 282–293.
- Kurzyna-Szklarek, M., Cybulska, J., & Zdunek, A. (2022). Analysis of the chemical composition of natural carbohydrates – An overview of methods. *Food Chemistry*, 394, 133466. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133466>
- Lakshmi, K., & Kaushal, P. (2020). Watermelon rind: a potential source of functional compounds and its food applications. *Journal of Food Science and Technology*, 57(11), 3947–3955.
- Leong, Y. K., & Chang, J.-S. (2022). Valorization of fruit wastes for circular bioeconomy: Current advances, challenges, and opportunities. *Bioresource Technology*, 359, 127459. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127459>
- Maurer, H. R. (2001). Bromelain: biochemistry, pharmacology and medical use. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 58(9), 1234–1245. <https://doi.org/10.1007/PL00000936>
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428.
- Misran, E., Idris, A., Mat Sarip, S. H., & Ya'akob, H. (2019). Properties of bromelain extract from different parts of the pineapple variety Morris. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18, 101095. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101095>
- Moise, A. R., & Alphonse, M. (2021). Valorization of watermelon rind waste into functional food ingredients. *Food Research International*, 140, 110037.
- Nasoha, N. Z., Luthfi, A. A. I., Roslan, M. F., Hariz, H. B., Bukhari, N. A., & Manaf, S. F. A. (2023). Exploring pineapple peel hydrolysate as a sustainable carbon source for xylitol production. *Scientific Reports*, 13:19284. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46061-8>

- National Food Institute. (2020). Street food and fruit consumption in Thailand. *Ministry of Industry*.
- Neglo, D., Tettey, C., Essuman, E., Kortei, N., Boakye, A., Hunkpe, G., Armah, F., Kwashie, P., & Waikhom, S. D. (2021). Comparative antioxidant and antimicrobial activities of the peels, rind, pulp and seeds of watermelon (*Citrullus lanatus*) fruit. *Scientific African*, 11, 582. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00582>
- Nguyen, T. T. A., Nguyen, H. H., Ton, N. M. N., Tran, T. T. T., & Le, V. V. M. (2024). Enzymatic treatment of pineapple pomace and its application into fiber-rich biscuit making. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100936>
- Paull, R. E., & Chen, N. J. (2019). Pineapple: Botany, production, and uses. In D. P. Bartholomew, R. E. Paull, & K. G. Rohrbach (Eds.), *The Pineapple: Botany, Production, and Uses* (3rd ed., pp. 69–108). CABI.
- Perkins-Veazie, P., & Collins, J. K. (2006). Flesh quality and lycopene stability of fresh-cut watermelon. *Postharvest Biology and Technology*, 41(1), 57–62.
- Pollet, A., Delcour, J. A., & Courtin, C. M. (2010). Structural determinants of the substrate specificities of xylanases from different glycoside hydrolase families. *Critical Reviews in Biotechnology*, 30(3), 176–191.
- Polizeli, M. L. T. M., Rizzatti, A. C. S., Monti, R., Terenzi, H. F., Jorge, J. A., & Amorim, D. S. (2005). Xylanases from fungi: properties and industrial applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67(5), 577–591.
- Slavin, J. (2013). Fiber and prebiotics: mechanisms and health benefits. *Nutrients*, 5(4), 1417–1435. <https://doi.org/10.3390/nu5041417>
- Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., & Mehta, P. K. (2019). Microbial enzymes: industrial progress in 21st century. *3 Biotech*, 6, 174. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0485-8>
- Srisermbhok, W., & Puangprakhon, S. (2018). The characteristics of fruit vending carts in Bangkok. *Journal of Thai Food Culture*, 12(1), 45–59.

- Subramaniyan, S., & Prema, P. (2002). Biotechnology of microbial xylanases: enzymology, molecular biology, and application. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22(1), 33–64.
- Sun, Q., Patil, P. J., Singh, A. K., Teng, C., Zhou, M., Zhou, Y., & Fan, G. (2024). Optimization of pretreatment and enzymatic hydrolysis coupled with ultrasonication for the production of xylooligosaccharides from corn cob. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(1), 1215–1235. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04145-5>
- Thai Pineapple Industry Association. (2022). Annual report of the Thai pineapple industry 2022.
- Umesh, H. K. (2009). Fruits and their nutritional importance. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 22(2), 27–31.
- USDA. (2020). FoodData Central. U.S. Department of Agriculture. <https://fdc.nal.usda.gov>
- Venetikidou, M., Lykartsis, E., Adamantidis, T., Prokopiou, V., Ofrydopoulou, A., Letsiou, S., and Tsoupras, A. (2025). Proteolytic enzyme activities of bromelain, ficin, and papain from fruit by-products and potential applications in sustainable and functional cosmetics for skincare. *Applied Sciences*, 15(5), 2637.
- Vieira, I., Santos, B., Santos, C., Ruzene, D., & Silva, D. (2022). Valorization of Pineapple Waste: a Review on How the Fruit's Potential Can Reduce Residue Generation. *BioEnergy Research*, 15, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10318-9>
- Wen, L., & Wrolstad, R. E. (2002). Phenolic composition of pineapple juice. *Journal of Food Science*, 67(5), 1552–1556. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08700>.
- Williams, A. (2016). In silico Study of Bacillus brevis Xylanase. *Journal and Conferences on Biomedical Engineering*. <https://biomedicalj.blogspot.com/>
- Zhang, J., Chen, Y., Wu, K., & Li, H. (2022). Advances in microbial xylanase and its applications in food, feed and biorefinery. *Frontiers in Microbiology*, 13, 877901. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.877901>

ภาคผนวก



เอกสารประกอบโครงการเผยแพร่ผลงานการวิจัยสู่สาธารณะ

จากโครงการการสกัดน้ำตาลนอนรีติวซ์ซึ่งจากเศษเหลือทิ้งของผลไม้เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน

ภายในงาน Open House Chotiwet 2024 ในวันที่ 13 ธันวาคม 2567

ณ ห้องประชุมโชติเวช คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์

หลักสูตร บัณฑิตวิชาชีพน้ำตาลนอนรีติวซ์ซึ่ง ผู้เข้าร่วมถ่ายทอด 30 คน

วัตถุประสงค์: เพื่อใช้น้ำตาลนอนรีติวซ์ซึ่งในผลิตภัณฑ์ขนมหวานบวลอย

เมนู “บวลอยเสียบไม้” เมนูขนมไทย เนื้อเหนียวนุ่ม สีสันน่ากิน อร่อยแบบไม่ใช่ส่วนผสมอาหาร เพราะจะนำ ฟักทองบด มันม่วงบด และเผือก มาผสมกับแป้งแทน นอกจากสีจะสวยแล้ว แต่ละสียังมีกลิ่นของพืชผัก และอุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร

วัตถุดิบ

1. แป้งข้าวเจ้า 1 ถ้วย
2. แป้งข้าวเหนียว 1 ถ้วย
3. มันม่วงบด 50 กรัม
4. ฟักทองบด 50 กรัม
5. เผือกบด 50 กรัม
6. น้ำเปล่า (แป้งมันม่วง) 50 มิลลิลิตร
7. น้ำเปล่า (แป้งฟักทอง) 50 มิลลิลิตร
8. น้ำเปล่า (แป้งเผือก) 50 มิลลิลิตร
9. หัวกะทิ 500 มิลลิลิตร
10. น้ำตาลทราย ½ ถ้วย
11. เกลือ ½ ช้อนชา
12. ไข่ขาว และไข่ดำ ตามชอบ
13. น้ำตาลแดง ตามชอบ

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 : ทำน้ำราด/ซอสกะทิ

1. นำหม้อขึ้นตั้งไฟปานกลาง เทหัวกะทิลงไป ตามด้วยน้ำตาลนอริดิวิซ์ซิ่ง, น้ำตาลทราย และเกลือ คนให้เข้ากัน และต้มจนเดือด

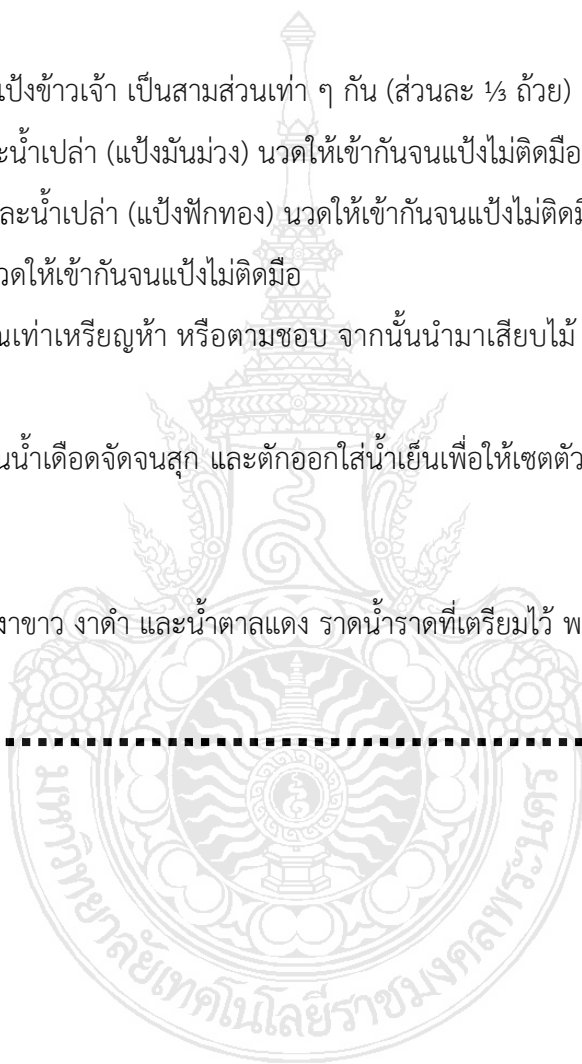
ขั้นตอนที่ 2 : ทำเม็ดแป้ง

1. แบ่งแป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้า เป็นสามส่วนเท่า ๆ กัน (ส่วนละ 1/3 ถ้วย)
2. ถ้วยแรกใส่มันม่วงบด และน้ำเปล่า (แป้งมันม่วง) นวดให้เข้ากันจนแป้งไม่ติดมือ
3. ถ้วยที่สองใส่ฟักทองบด และน้ำเปล่า (แป้งฟักทอง) นวดให้เข้ากันจนแป้งไม่ติดมือ
4. ถ้วยที่สาม ใส่น้ำใบเตย นวดให้เข้ากันจนแป้งไม่ติดมือ
5. ปั้นบั่วลอยขนาดประมาณเท่าเหรียญห้า หรือตามชอบ จากนั้นนำมาเสียบไม้ และนำไปแช่เย็นให้เซตตัว 20 นาที
6. นำบั่วลอบเสียบไม้ไปต้มในน้ำเดือดจัดจนสุก และตักออกใส่น้ำเย็นเพื่อให้เซตตัว

ขั้นตอนที่ 3 : จัดเสิร์ฟ

จัดบั่วลอยเสียบไม้ใส่จาน โรยงาขาว งาดำ และน้ำตาลแดง ราดน้ำราดที่เตรียมไว้ พร้อมเสิร์ฟ

.....



ผลิตภัณฑ์ บัวลอยเสียบไม้ น้ำตาลอนรีดิวซ์ซิง



โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชมกฤษณ์ เพ็ญพิภพ

อาจารย์ ดวงรัตน์ แซ่ตั้ง

อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

นางสาวพิมพ์วิภา ปาละนันท์

นางสาวสุเมธินี ธรรมรักษ์

นางสาวรสสุคนธ์ สังขกุล

นางสาวปทุมวดี ทองคำ

นักศึกษาปริญญาตรีสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

น้ำตาลอนรีดิวซ์ซิงที่ได้จากการสกัดจากเศษเหลือทิ้งจากผลไม้ในรถเข็นผลไม้ เป็นน้ำตาลในกลุ่มของโอลิโกแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดย โอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตสายสั้น มีองค์ประกอบหลักคือ น้ำตาลชนิดต่างๆ ที่จับกันตั้งแต่ 2 ถึง 10 หน่วย จัดเป็นประเภทหนึ่งของสารพรีไบโอติก ซึ่งสารตัวนี้จะถูกย่อยสลายและถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก แต่จะถูกย่อยสลายได้โดยโพรไบโอติก (แบคทีเรียชนิดดี) ในลำไส้ใหญ่ มีความสำคัญในการเป็นอาหารพังก์ชันนัลฟู้ด ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ทุกเพศ และทุกวัย เพราะพรีไบโอติกส์ช่วยเสริมสร้างสุขภาพที่ดีในลำไส้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คาร์โบไฮเดรตในรูปน้ำตาลที่ละลายได้ มีในส่วนที่เรียกว่า น้ำตาลรีดิวซ์ซิง (reducing sugar), น้ำตาลอนรีดิวซ์ซิง (non-reducing sugar) ซึ่งเป็นกลุ่มของโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) ที่มีคุณสมบัติในการเป็น พรีไบโอติก (prebiotic) ซึ่งเกิดขึ้นเองตามกระบวนการจากธรรมชาติ มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตทางร่างกาย และมีส่วนช่วยในการปรับสมดุลการทำงานของร่างกายโดยเฉพาะ ระบบย่อยอาหารและการดูดซึมได้ดีขึ้น ที่สำคัญช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสุขภาพ ที่เรียกกันว่า “โพรไบโอติก (probiotic)” และยังช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียตัวร้ายที่เป็นอันตรายต่อลำไส้ได้อีกด้วย

วัตถุดิบ

ส่วนแป้งเม็ดบัวลอย

1. แป้งข้าวเหนียว 55 กรัม
2. น้ำตาลทราย 22.5 กรัม
3. ไข่อบด 55 กรัม
4. มันม่วงอบด 55 กรัม
5. ฟักทองอบด 55 กรัม
6. น้ำเปล่า 20-30 มิลลิลิตร

ส่วนน้ำกะทิ

1. น้ำกะทิ 50 กรัม
2. น้ำตาลอนรีดิวซ์ซิง 50 กรัม
3. เกลือ 0.5 กรัม
4. น้ำตาลทราย 18.5 กรัม
5. Modified starch (แป้งกวนไส้) 3.5 กรัม



วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 : การทำน้ำกะทิ

เทหัวกะทิลงไป ตามด้วยน้ำตาลอนรรีดิวิซซิ่ง, น้ำตาลทราย และเกลือ คนให้เข้ากัน และให้ความร้อน

ขั้นตอนที่ 2 : การทำแป้งเม็ดบัวลอย

เตรียมแป้งข้าวเหนียวจำนวน 3 ถ้วย (ดังสูตร) ถ้วยแรกใส่มันม่วงบด และน้ำเปล่า (แป้งบัวลอยมันม่วง) นวดให้เข้ากันจนแป้งไม่ติดมือ, ถ้วยที่สองใส่ฟักทองบด และน้ำเปล่า (แป้งบัวลอยฟักทอง) นวดให้เข้ากันจนแป้งไม่ติดมือ และถ้วยที่สามใส่เผือกบด และน้ำเปล่า (แป้งบัวลอยเผือก) นวดให้เข้ากันจนแป้งไม่ติดมือ



ปั้นบัวลอยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5-2.0 เซนติเมตร จากนั้นนำไปคลุกแป้งข้าวเหนียวให้ทั่ว และทำการร่อนแป้งส่วนเกินออก ให้เหลือเฉพาะส่วนที่เกาะติดเม็ดบัวลอย



ต้มในน้ำ (ใบเตย) เดือดจัดจนสุก และทำให้เย็นทันทีด้วยการแช่เม็ดบัวลอยต้มสุกในน้ำเย็นเพื่อให้เซตตัว



จัดบัวลอยเสียบไม้ น้ำตาลอนรรีดิวิซซิ่งใสจาน โรยงาขาว งาดำ และน้ำกะทิที่เตรียมไว้

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ

