



ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างระดับจุลภาคของ
ผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาล



โดย
นางสาวอังคิมา ศิริวัฒนาศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างระดับ
จุลภาคของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาล



โดย
นางสาวอังศิมา ศิริวัฒนาศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

THE EFFECT OF SUGAR SUBSTITUTES ON PHYSICOCHEMICAL AND
MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF REDUCED SUGAR COCONUT MILK JELLY



By

MISS Aungsima SIRWATTANASILP

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)

Department of FOOD TECHNOLOGY

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาล
โดย	นางสาวอังศิมา ศิริวัฒนาศิลป์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ธีรธรรมถาวร)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ)	
.....	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร. ศันสนีย์ อุดมระติ)	

630920015 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : วุ้นกะทิ, สารให้ความหวานแทนน้ำตาล, การทดแทนน้ำตาลทราย, สารให้ความหวานยิ่งยวด, น้ำตาลแอลกอฮอล์

นางสาว อังศิมา ศิริวัฒนาศิลป์: ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ

วุ้นกะทิเป็นขนมไทยที่มีน้ำตาลซูโครสเป็นสารให้ความหวานซึ่งให้พลังงานสูงและส่งผลเสียต่อสุขภาพ การทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลผสมกับสารให้ความหวานยิ่งยวดเป็นวิธีทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ช่วยลดพลังงานโดยยังคงให้รสหวานและคุณลักษณะใกล้เคียงผลิตภัณฑ์เดิม การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี ความร้อน และโครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ โดยทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลแต่ละชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ ร่วมกับสารให้ความหวานยิ่งยวด ได้แก่ รีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 60:40 70:30 80:20 90:10 โดยตัวอย่างที่ไม่มีการทดแทนด้วยสารให้ความหวานเป็นตัวอย่างควบคุม จากการทดลองพบว่า การใช้สารให้ความหวานผสม 2 ชนิดในการทดแทนน้ำตาลมีผลทำให้ค่าดัชนีความขาว ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ความแข็ง และการแยกตัวของน้ำของวุ้นกะทิลดลงตามสัดส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดในตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น วุ้นกะทิที่ใช้ไอโซมอลต์ผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 ให้ค่าความแข็งแรงของเจลและค่าการแยกตัวของน้ำไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จากการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยวิธีเชิงพรรณนาพบว่า ไอโซมอลต์ผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ไม่มีรสตกค้างในปากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานอื่นๆ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักพบว่า การทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลทิทอลผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 90:10 ซอร์บิทอลผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 70:30 และไอโซมอลต์ผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมมากที่สุด จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบว่า วุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลซูโครสมีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวและการเกิดเจลสูงกว่าตัวอย่างควบคุม จากการวิเคราะห์ค่าเอนทัลปีและโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่า วุ้นกะทิที่ทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยไอโซมอลต์ผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมมากที่สุด

630920015 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : Coconut milk jelly, Alternative sweetener, Sucrose replacement, Intense sweeteners, Sugar alcohol

MISS AUNGSIMA SIRIWATTANASILP : THE EFFECT OF SUGAR SUBSTITUTES ON PHYSICOCHEMICAL AND MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF REDUCED SUGAR COCONUT MILK JELLY THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR PRASONG SIRIWONGWILAICHAT, Ph.D.

Coconut milk jelly is a Thai dessert containing sucrose as a sweetener providing high calories and negative health effect. Substitution of sucrose with combined bulk sweetener and intense sweetener is an alternative method for reduced calories product development whereas its sweetness and characteristics are kept similar to the original product. The objective of this study was to investigate the effect of type and amount of sweeteners on physical, chemical, thermal properties and microstructure of coconut milk jelly by replacing sucrose with bulk sweeteners (maltitol, sorbitol and isomalt) each with rebaudioside A at varied ratios of 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, 90:10 and without substitution as a control. It was found from the experiments that replacing sucrose with combined sweeteners resulted in reducing whiteness index, moisture content, water activity, hardness and syneresis of coconut milk jelly in accordance with increasing bulk sweeteners. On the other hand, total soluble solids of the samples tended to increase. Coconut milk jelly substituted with mixed isomalt and rebaudioside A at ratio of 50:50 gave gel strength and syneresis not significantly different from control ($p>0.05$). According sensory evaluation using descriptive method, it was found that combined isomalt and rebaudioside A did not give aftertaste as compared to other sweeteners substituted samples. The principal component analysis indicated that coconut milk jelly samples substituted with combined maltitol and rebaudioside A at ratio of 90:10, sorbitol and rebaudioside A at ratio of 70:30 and isomalt and rebaudioside A at ratio of 50:50 had the most similar physical and chemical properties to the control sample. According to thermal properties analysis, it was found that sucrose substituted coconut milk agar had higher melting and gelling temperatures than the control sample. From enthalpy and microstructure analysis, it was found that coconut milk jelly substituted with combined isomalt and rebaudioside A at ratio of 50:50 was the most similar to the control sample.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ ซึ่งให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และให้ความช่วยเหลือดูแล ทั้งความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการดำเนินงานวิจัย การจัดทำรูปเล่ม ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งอาจารย์ทุกท่าน และบุคลากรในภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการต่างๆ อันเป็นประโยชน์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ ภิรธรรมถาวร และดร.คันสนีย์ อุดมระติ ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการและกรรมการในการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณเอมนิกา เทียนไสว และคุณพัฒนพงษ์ สาหร่าย ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ทุกคนในครอบครัวที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและสนับสนุนในทุกๆด้าน อีกทั้งยังคงคอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษาและอยู่เคียงข้างกันเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ ขอขอบคุณทุกๆ ความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

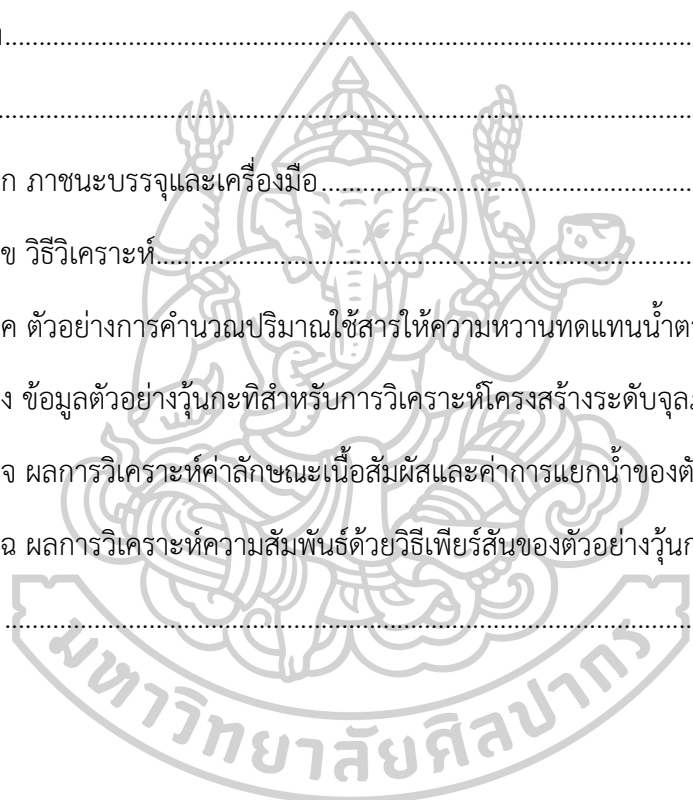
นางสาว อังศิมา ศิริวัฒนาศิลป์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ฐันกะทิ.....	4
2.2 ฐัน (Agar).....	4
2.2.1 โครงสร้างทางโมเลกุลของฐัน.....	5
2.2.2 กลไกการเกิดเจลของฐัน.....	6
2.2.3 ลักษณะเจลของฐัน.....	8
2.3 ผลของน้ำตาลต่อสมบัติเจลของฐัน.....	9
2.4 น้ำตาลและสารให้ความหวาน.....	10
2.4.1 คุณสมบัติของน้ำตาล.....	11
2.4.2 สารให้ความหวาน (Sweeteners).....	12

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.1.1 วัสดุดิบ	20
3.1.2 สารเคมี.....	20
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์คุณภาพ	20
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์และประมวลผล	21
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	22
3.2.2 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	25
3.2.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพ	25
3.2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านเคมี.....	26
3.2.2.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส.....	28
3.2.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค.....	28
3.2.2.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	30
4.1 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อลักษณะทางกายภาพของวุ้นกะทิ.....	30
4.1.1 ค่าสี.....	32
4.1.2 ค่าลักษณะเนื้อสัมผัส	37
4.1.3 ค่าการแยกตัวของน้ำ.....	40
4.2 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อลักษณะทางเคมีของวุ้นกะทิ.....	42
4.2.1 ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด	42
4.2.2 ปริมาณความชื้น	43
4.2.3 ค่าปริมาณน้ำอิสระ	44
4.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส	46

4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA).....	47
4.5 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติเชิงความร้อนของวุ้นกะทิ	49
4.5.1 อุณหภูมิของการหลอมเหลวในวุ้นกะทิ.....	49
4.5.2 อุณหภูมิของการเกิดเจลในวุ้นกะทิ.....	52
4.6 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ.....	55
บทที่ 5 สรุปผล.....	58
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก ภาพขณะบรรจุและเครื่องมือ.....	68
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์.....	71
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณปริมาณใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในวุ้นกะทิ	76
ภาคผนวก ง ข้อมูลตัวอย่างวุ้นกะทิสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค.....	82
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสและค่าการแยกน้ำของตัวอย่างวุ้นกะทิ.....	84
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีเพียร์สันของตัวอย่างวุ้นกะทิ.....	86
ประวัติผู้เขียน	87



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ชนิดและปริมาณของน้ำตาลต่อคุณสมบัติเจลของวุ้น.....	9
ตารางที่ 2 รสชาติและความหวานของน้ำตาลแอลกอฮอล์.....	13
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลแอลกอฮอล์	15
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความหวานของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลกับน้ำตาลซูโครส รวมถึงค่าดัชนีน้ำตาลและพลังงาน.....	16
ตารางที่ 5 สารที่ให้รสหวานในหญ้าหวาน.....	17
ตารางที่ 6 สูตรต้นแบบของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ.....	23
ตารางที่ 7 ปริมาณของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายที่อัตราส่วนการทดแทนแตกต่างกัน .24	24
ตารางที่ 8 ค่า Relative sweetness ของสารให้ความหวานแต่ละชนิด	24
ตารางที่ 9 สูตรผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนมอลทิทอลต่อรีบัวดีไอโซด์ เอ แตกต่างกัน.....	24
ตารางที่ 10 สูตรผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนซอร์บิทอลต่อรีบัวดีไอโซด์ เอ แตกต่างกัน.....	25
ตารางที่ 11 สูตรผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนไอโซมอลต์ต่อรีบัวดีไอโซด์ เอ แตกต่างกัน	25
ตารางที่ 12 ค่า L* ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน.....	32
ตารางที่ 13 ค่า a* ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน.....	33
ตารางที่ 14 ค่า b* ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน	34
ตารางที่ 15 ค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน	35
ตารางที่ 16 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน	36
ตารางที่ 17 ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด ($^{\circ}$ Brix) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน.....	42

ตารางที่ 18 ปริมาณความชื้น (%) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน.....43

ตารางที่ 19 ค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน45

ตารางที่ 20 ค่า Factor loadings ของแต่ละองค์ประกอบดัชนีชี้วัดคุณภาพ.....47

ตารางที่ 21 อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวของอาหารจากเจลเป็นของเหลว (gel to sol) และค่าเอนทัลปีการหลอมเหลว (ΔH_m) ของวุ้นกะทิ49

ตารางที่ 22 อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลของอาหารและค่าเอนทัลปีของการเกิดเจล (ΔH_s) ของวุ้นกะทิ52



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของอากาศโรส.....	5
ภาพที่ 2 โครงสร้างของอากาศโรเพคติน (Agaropectin).....	6
ภาพที่ 3 กลไกการเกิดเจลของวุ้น	7
ภาพที่ 4 ลักษณะกลไกการเกิดเจลแบบ thermoreversible gel ของวุ้น	8
ภาพที่ 5 ตัวอย่างกระบวนการผลิตวุ้นกะทิ	22
ภาพที่ 6 อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานที่ศึกษา	23
ภาพที่ 7 ลักษณะปรากฏของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนมอลทิทอลต่อรีบาวดีไอโซต์ เอ ทดแทนน้ำตาล .31	31
ภาพที่ 8 ลักษณะปรากฏของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนซอร์บิทอลต่อรีบาวดีไอโซต์ เอ ทดแทนน้ำตาล..31	31
ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนไอโซมอลต์ต่อรีบาวดีไอโซต์ เอ ทดแทนน้ำตาล .31	31
ภาพที่ 10 ค่าความแข็งของเจล (Hardness) (N) ของวุ้นกะทิ	37
ภาพที่ 11 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร (Chewiness) (N·mm) ของวุ้นกะทิ.....	39
ภาพที่ 12 ค่าการแยกน้ำ (Syneresis) (%) ของวุ้นกะทิ	41
ภาพที่ 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis) ของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ	48
ภาพที่ 14 Heating curve ของสารให้ความหวานชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	51
ภาพที่ 15 Cooling curve ของสารให้ความหวานชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	54
ภาพที่ 16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวุ้นกะทิ	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ขนมไทยมีแนวโน้มความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจมากขึ้น จากการที่มีผู้ประกอบการธุรกิจขนมไทยเพิ่มขึ้นหลายระดับ ตั้งแต่ระดับครอบครัว ชุมชน ไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม เนื่องจาก ขนมไทยสามารถใช้เป็นสัญลักษณ์ของสินค้าท้องถิ่น เพื่อดึงดูดกลุ่มนักท่องเที่ยวต่างชาติซึ่งส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงเข้ากับอุตสาหกรรมการท่องเที่ยว รวมถึงมีการส่งออกขนมไทยไปยังประเทศต่างๆ (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2553) อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันผู้บริโภคได้หันมาให้ความสนใจกับสุขภาพกันมากขึ้น โดยเฉพาะการเลือกรับประทานอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลต่ำ (อุบลรัตน์ จันทรัมย์ และคณะ, 2563) ส่งผลให้ขนมไทยหลายชนิดยังมีปัญหาทางโภชนาการที่เป็นอุปสรรคสำคัญ ดังเช่น ผลิตภัณฑ์ขนมไทยที่ได้รับความนิยมในท้องตลาดได้แก่ วุ้นกะทิ ผลิตภัณฑ์นี้ประกอบด้วยส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำตาลสูง ซึ่งอาจส่งผลเสียเชิงโภชนาการต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ เนื่องจาก การบริโภคน้ำตาลในปริมาณมากมีส่วนสำคัญที่นำไปสู่การเปลี่ยนเป็นไขมันสะสม ทำให้เกิดโรคอ้วน โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิตสูง และโรคหัวใจ (Misra และคณะ, 2016) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์อาจมีข้อจำกัดในด้านการตลาดสำหรับอาหารเพื่อสุขภาพ ด้วยปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดพัฒนาวุ้นกะทิลดน้ำตาลเพื่อตอบสนองของกลุ่มตลาดอาหารเพื่อสุขภาพ

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นิยมใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล 2 กลุ่มร่วมกันคือ สารให้ความหวานยิ่งยวด (Intense sweeteners) มีความหวานมากจึงใช้ในปริมาณน้อย ไม่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำตาลในร่างกาย แต่ก็มีผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ที่อาจทำให้เปลี่ยนลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์และลดการยอมรับของผู้บริโภคได้ สารให้ความหวานในกลุ่มนี้ได้แก่ แอสพาร์เทม (aspartame), ซันท์ทศกร (saccharin), สเตวิโอไซด์ (stevioside) และซูคราโลส (sucralose) เป็นต้น (Laffitte และคณะ, 2016) จึงมักนำสารให้ความหวานกลุ่มนี้ผสมกับสารให้ความหวานที่ให้มีผล (Bulk sweeteners) เนื่องจาก มีค่าความเข้มข้นของลักษณะในทางลบ เช่น ความขม ฝาด และกลิ่นรสหวานแบบปลอม ต่ำกว่า (Gwak และคณะ, 2012) มีความหวานน้อยต้องใช้ในปริมาณมากจึงทำให้เกิดมวลหรือเนื้อของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งสามารถลดค่า water activity และชะลอการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ได้ สารให้ความหวานในกลุ่มนี้ได้แก่ น้ำตาลแอลกอฮอล์ (polyol หรือ polyhydric alcohol หรือ sugar alcohol) เช่น ซอร์บิทอล (sorbitol), แมนนิทอล (mannitol),

มอลทิทอล (maltitol), ไชลิตอล (xylitol) และไอโซมอลต์ (isomalt) เป็นต้น (Portmann และ Kilcast, 1998) เพื่อเสริมรสหวานและปรับปรุงลักษณะของสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์

การใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล จะต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อเลือกทั้งชนิดและปริมาณของสารให้ความหวานที่เหมาะสม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิสดน้ำตาล ซึ่งผลิตภัณฑ์วุ้นกะทินั้นมีลักษณะระบบเป็นเจลอาการ์ (agar) เพื่อให้ได้ชนิดสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ ทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นสูตรต้นแบบสำหรับการนำไปผลิตเชิงอุตสาหกรรมต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี ความร้อน และโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ

1.2.2 เพื่อหาชนิดและปริมาณสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ชนิดและปริมาณของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลส่งผลกระทบต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี ความร้อน และโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิที่แตกต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ชนิดของขนมไทยที่ทำการศึกษาได้แก่ วุ้นกะทิซึ่งมีลักษณะระบบเป็นเจลอาการ์

1.4.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณการใช้สารให้ความหวานผสมระหว่างสารให้ความหวานที่ให้มวล (Bulk sweeteners) 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล (Maltitol) ซอร์บิทอล (Sorbitol) และไอโซมอลต์ (Isomalt) กับสารให้ความหวานยิ่งยวด (Intense sweetener) คือ สตีวียอลไกลโคไซด์ ชนิดรีบาดีโอไซด์ เอ (Rebaudioside A)

1.4.3 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพของวุ้นกะทิ ได้แก่ วิเคราะห์ค่าสี (Color) ค่าเนื้อสัมผัส (Texture) และค่าการแยกตัวของน้ำ (Syneresis)

1.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านเคมีของวุ้นกะทิ ได้แก่ วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid) ปริมาณความชื้น ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity) และสมบัติเชิงความร้อน (Thermal property)

1.4.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบของรสชาติแต่ละสูตรที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบกับสูตรต้นแบบ โดยใช้วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา (Generic descriptive analysis) โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 5-6 คน

1.4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่เหมาะสมแต่ละชนิดจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านกายภาพและเคมีกับผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิสูตรต้นแบบ

1.4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ (Microstructure property)



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วุ้นกะทิ

วุ้นกะทิเป็นขนมไทยจัดเป็นขนมประเภทต้มที่ใช้น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ (อบเชย วงศ์ทอง, 2543) โดยเป็นขนมที่เกิดจากการดัดแปลงในยุคหลังๆ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเยลลี่ของประเทศตะวันตก แต่ได้มีการปรุงแต่งให้ถูกปากคนไทย โดยมีการเติมกะทิลงไปด้วย ส่วนผสมที่ทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจล คือ ผงวุ้น (Agar agar) อาจมีการเติมส่วนผสมอื่นๆ อีก เช่น ไข่ สังขยา เม็ดบัว เผือก ฟักทอง มะพร้าวอ่อน น้ำใบเตย และผลไม้ ซึ่งความแข็งแรงของเจลวุ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของน้ำตาล ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีสารเจลาตินสังเคราะห์เกี่ยวกับ วุ้นกะทิตดน้ำตาลหรือวุ้นกะทิที่มีการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล แต่มีวุ้นบางชนิดที่ได้มีการเจลาตินสังเคราะห์ เช่น วุ้นกะทิ ที่เป็นสิทธิบัตรของ สิริริดา กุสุมภ์ (2559) ซึ่งได้มีการคิดค้นสูตรวุ้นกะทิเสริมจุลินทรีย์โพรไบโอติก หรือ วุ้นกระเจียบเขียว ที่เป็นสิทธิบัตรของ ประเสริฐ สิริรินากร (2545) เป็นต้น

2.2 วุ้น (Agar)

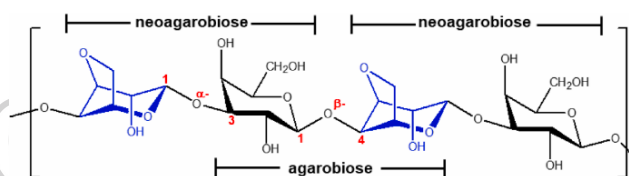
ผงวุ้นอาหาร (Agar) มีลักษณะเป็นผง สีขาวนวล ไม่มีรสจึงไม่รบกวนรสชาติของอาหารและมีค่าแคลอรีเล็กน้อย (Niezgoda, 2015) เป็นกัมที่สกัดได้จากโครงสร้างเส้นใยเซลลูโลสของผนังเซลล์จากสาหร่ายทะเลประเภทกลุ่มสาหร่ายให้วุ้น (Agarophyte) จัดเป็นสารประกอบไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) หรือเรียกว่า ไฟโคคอลลอยด์ (Phycocolloids) ที่ไม่ละลายในน้ำเย็นแต่ละลายในน้ำร้อน เมื่อแข็งตัวจะให้เจลที่มีลักษณะแข็งและยืดหยุ่นได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิละลายมาก จึงทำให้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมาก นิยมใช้กันมากในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน ผลิตภัณฑ์เนื้อและปลา เป็นต้น โดยกฎหมายของสหรัฐอเมริกาได้กำหนดความเข้มข้นสูงสุดสำหรับวุ้นเท่ากับ 2% ในการใช้งานในขนม (Armisen และ Gaiatas, 2009) ในการนำวุ้นมาใช้ประโยชน์ในแต่ละผลิตภัณฑ์ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ หมู่ Sulphate, หมู่ Methoxyl และองค์ประกอบของน้ำตาลซึ่งแตกต่างกันไปตามกระบวนการผลิต (Pereira-Pacheco และคณะ, 2007) โดยหน้าที่ของวุ้นในขนมหวานส่วนใหญ่คือ เป็นตัวทำให้เกิดเจล เป็นตัวชะลอการตกผลึกของน้ำตาล ช่วยให้อิมัลชัน (Emulsion) คงตัวและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งช่วยให้ฟองมีความคงตัว (ธีรนุช ฉายศิริโชติ และ สุวรรณ พิชัยวงศ์วงศ์ดี, 2558)

2.2.1 โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น

โมเลกุลของวุ้นประกอบด้วยสายพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่สำคัญ 2 ชนิด คือ อากาโรส (Agarose) 70% และส่วนที่เหลือประมาณ 30% คือ อากาโรเพคติน (Agaropectin)

2.2.1.1 อากาโรส (Agarose)

อากาโรส (Agarose) เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกาแลคโตส (galactose) และอนุพันธ์ เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดเจล มีปริมาณซัลเฟตต่ำกว่า 0.15% โดยโครงสร้างทางโมเลกุล ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharides) คือ อากาโรไบโอส (agarobiose) ซึ่งประกอบด้วย β -D-galactose เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1 \rightarrow 3 และ 3,6-anhydro- α -L-galactose เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1 \rightarrow 4 โดยที่ในแต่ละโมเลกุลมีการต่อสลับกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic linkage) และขณะเดียวกัน ถ้าทำ enzymatic hydrolysis ของอากาโรสจะพบน้ำตาลโมเลกุลคู่อีกชนิดหนึ่งคือ นีโออากาโรไบโอส (neoagarobiose) ซึ่งมีพันธะระหว่างน้ำตาลดังกล่าวที่ตำแหน่ง 1 \rightarrow 3 และได้น้ำตาลอีกชนิดหนึ่งเป็นพวก tetrasaccharide มีชื่อว่า neoagarotetraose ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอากาโรส

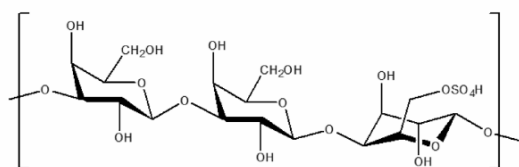
ที่มา : Bayu และคณะ (2021)

จากโครงสร้างภาพที่ 1 แสดงถึงการต่อสลับกันระหว่างตำแหน่ง 1 \rightarrow 3 และ 1 \rightarrow 4 ของน้ำตาลดังกล่าว โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในพอลิเมอร์ของอากาโรสประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งสองชนิดสลับกันไปเป็นสายยาวที่มีขนาดมวลโมเลกุลแตกต่างกันไปตามจำนวนของโมเลกุลย่อยที่ประกอบอยู่นั้น เนื่องด้วยโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์สายยาวของน้ำตาลกาแลคโตสที่ต่อกันในลักษณะดังกล่าวนี้จึงทำให้อากาโรส (Agarose) ค่อนข้างเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุน้อยมากจึงถูกเรียกว่า non-ionic polysaccharide

2.2.1.2 อากาโรเพคติน (Agaropectin)

อากาโรเพคติน (Agaropectin) ดังแสดงในภาพที่ 2 มีโครงสร้างคล้ายอากาโรส (Agarose) เกิดขึ้นในปริมาณน้อย แต่มีความซับซ้อนกว่า เนื่องจากบางโมเลกุลของ 3,6-anhydro- α -L-galactose จะมีอนุกรมซัลเฟตเกาะอยู่ซึ่งถูกแทนที่ด้วย L-galactose sulfate และบางโมเลกุลของ D-

galactose ถูกแทนที่ด้วย D-galactose sulfate หรือมีหมู่ไพรรูเวทเกาะอยู่ (4,6-O-(1-carboxy ethylidene) –D-galactopyranose) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้มีประจุ บางครั้งจึงเรียกว่า charged agarose (Usov, 1998)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของอากาโรเพคติน (Agaropectin)

ที่มา : Bayu และคณะ (2021)

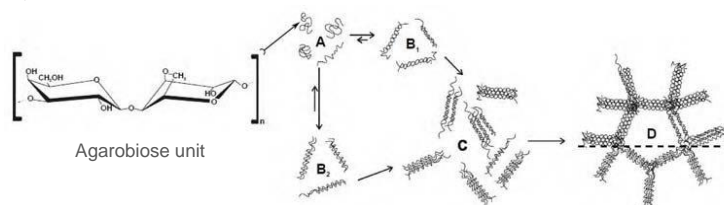
จากลักษณะของอากาโรเพคตินซึ่งมีสูตรโครงสร้างคล้ายอากาโรสแต่มีเอสเตออร์ของ sulphate, glucuronic acid และ pyruvic acid สารวุ้นที่แห้งจึงไม่สามารถละลายในน้ำเย็นแต่ละลายได้ในน้ำร้อน (สุรจิต วรรณจันทร์, 2523) และจากงานวิจัยของปวีณา วรรัชเสรี และคณะ (2530) พบว่า วุ้นที่มีส่วนประกอบของอากาโรเพคตินปริมาณมากทำให้ค่าความแข็ง (gel strength) ของวุ้นต่ำลง ดังนั้นในกระบวนการสกัดวุ้นจึงต้องพยายามลดปริมาณของหมู่ซัลเฟตที่เกาะอยู่ในส่วนของน้ำตาลมากที่สุด

2.2.2 กลไกการเกิดเจลของวุ้น

กลไกการเกิดเจลของวุ้น (Agar) สามารถกำหนดลักษณะได้ (Whitney, 1977) ตามเวลาของการเกิดเจล อุณหภูมิการเกิดเจล และความเข้มข้นต่ำสุดของเฟสที่กระจายตัว (dispersed phase) ที่จำเป็นสำหรับการเกิดเจลของวุ้น ถือเป็นกระบวนการคายความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อละลายผงวุ้นที่อุณหภูมิสูงถึง 95-100 องศาเซลเซียส มีความสามารถดูดน้ำได้ดี ทำให้เกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.04% ซึ่งสามารถเกิดเจลได้โดยไม่ต้องอาศัยสารอื่นๆ ช่วยในการเกิดเจล ซึ่งการเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า physical gels และมีความสามารถในการเกิดเจลเกิดขึ้นในระหว่างการก่อตัวของเกลียวระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองสายและเก็บกักน้ำไว้ภายในเครือข่าย การเกิดเจลของวุ้นเกิดจากปริมาณของอากาโรสที่มีในโครงสร้างเท่านั้น โดยเมื่อโมเลกุลของอากาโรส (Agarose) ละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะโครงสร้างเป็น random coil ซึ่งในระยะนี้ โครงสร้างของโมเลกุลจะอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบเนื่องจาก มีการเคลื่อนที่แบบ Brownian จากนั้นจะเกิดเจลเมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลงจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจล

กลไกการเกิดเจลลักษณะนี้เรียกว่า กลไกการเกิดเจลแบบ cold-set (Glicksman, 1987) โดย (Rees และ Welsh, 1977) ได้อธิบายกลไกการเกิดเจล ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยโครงสร้างแบบ random coil (A) เมื่ออุณหภูมิของสารละลายลดลงจะส่งผลให้สายพอลิเมอร์แต่ละสายเกิดการพัน

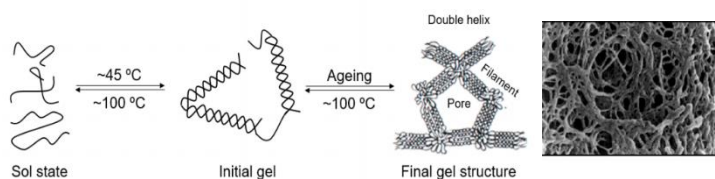
กันเป็นเกลียวในลักษณะเกลียวคู่ (double helice) แบบไม่สมมาตรกัน (B_1) แล้วรวมตัวกันเพื่อเกิดเป็นร่างแหขนาดใหญ่ C และ D ตามลำดับ



ภาพที่ 3 กลไกการเกิดเจลของวุ้น

ที่มา : Rees และ Welsh (1977)

นอกจากนั้น Foord และ Atkins (1989) อธิบายว่า เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงอีกปลายสายของ double helice แต่ละคู่จะรวมตัวเข้ามาใกล้กัน ส่งผลให้อาจจะมีการเกิดโครงสร้างเกลียวแบบสมมาตร (B_2) ด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยจุดเชื่อมต่อนี้เรียกว่า junction zone ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจลมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดเป็นโครงสร้างต่อไปเป็น C และ D ตามลำดับ ซึ่งสุดท้ายจะเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติที่มีความแข็งแรง ณ จุดที่อุณหภูมิทำให้เกิดเจล โดยกลไกการเกิดเจลทั้งสองนี้สามารถเกิดขึ้นร่วมกันหรือเกิดอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยการที่จะเกิดรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการเกิดเจล ถ้าลดอุณหภูมิลงเร็วจะทำให้เกิดรูปแบบแรก (B_1) มากกว่า โดยทั้งสองแบบนี้ถือเป็นพื้นฐานของการยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและการเกิดโครงสร้างร่างแหขนาดใหญ่ และถ้าหากนำเจลวุ้น (Agar) ไปให้ความร้อนอีกครั้ง สายพอลิเมอร์ที่จับตัวกันเป็นเกลียวนั้นจะค่อยๆ คลายตัวออกจากกัน เมื่อทำการให้อุณหภูมิสูงกว่า 95 องศาเซลเซียส โครงสร้างของเจลจะเกิดการคลายตัวกลายเป็นสารละลายในลักษณะของ random coil อีกครั้ง ดังนั้น เจลวุ้นจึงมีสมบัติเป็น Thermoreversible gel เนื่องจากโครงสร้างของเจลไม่ได้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์แต่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจึงมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Dai และ Matsukawa, 2012) หมายความว่า อากาศโรสไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโครงสร้างเป็นเกลียวคู่แต่จะละลายที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากเกิดการแยกตัวของเกลียวคู่ ทำให้อากาศโรสละลายในน้ำและปล่อยให้เย็นลงจะส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์ที่เคลื่อนที่ด้วยความร้อนถูกจำกัด พันธะไฮโดรเจนจะพัฒนาขึ้นเพื่อสร้างโครงสร้างเกลียวคู่ ถ้าความเข้มข้นของพอลิเมอร์สูงเพียงพอ โครงสร้างขดลวดจะสร้างโครงข่ายสามมิติซึ่งโครงสร้างเป็นเกลียวจะไม่ละลายน้ำ โครงสร้างเครือข่ายสามมิติจึงไม่บวมน้ำ ดังนั้น ปริมาณน้ำจำนวนมากจึงถูกกักไว้ภายในโครงข่ายเครือข่ายทำให้เกิดเจลอากาศโรสขึ้น (Kaneda, 2018) และสามารถทำซ้ำได้อย่างไม่มีกำหนดหากไม่มีสารที่มีฤทธิ์รุนแรงที่สามารถย่อยสลายโมเลกุลของอากาศโรสหรือทำลายโมเลกุลด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะกลไกการเกิดเจลแบบ thermoreversible gel ของวุ้น

ที่มา : Dai และ Matsukawa (2012)

อุณหภูมิการเกิดเจลนั้นได้รับอิทธิพลจากระดับ methoxylation ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (C6) ของ agarobioses ที่มีอยู่ในวุ้น ถ้าบริเวณตำแหน่งดังกล่าวมีปริมาณมากจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเกิดเจลสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ส่วนของ methoxylation ของคาร์บอนตำแหน่งอื่นที่เหลือนั้นจะลดอุณหภูมิการเกิดเจลและให้ความแข็งแรงของเจลในเวลาเดียวกัน เนื่องด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ไม่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้เพราะตำแหน่งนี้มีส่วนทำให้เกิดเจลของขดลวด (gelling helices) ในขณะที่กลุ่มไฮดรอกซิลที่เหลือเป็นจุดเชื่อมซึ่งสามารถสร้างสะพานไฮโดรเจนได้

2.2.3 ลักษณะเจลของวุ้น

เจลของวุ้น มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ยืดหยุ่น (elastic colloid) ที่ยังคงรักษารูปร่างตามภาชนะที่บรรจุไว้ได้แม้จะถอดออกจากภาชนะ เนื้อแข็ง ใส เปราะ แตกง่าย เนื้อสัมผัสมีลักษณะ juicy และ crunchy และสามารถเกิดการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นจะเกิดการรวมตัวของ double helices ของสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Lahrech และคณะ, 2005) และคุณสมบัติที่สำคัญของเจลวุ้นที่ได้จากปริมาณอากาศคือ เจลจะแสดงฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ที่ทำให้เกิดเจลที่สูงมาก ซึ่งมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างการเกิดเจลกับอุณหภูมิหลอมเหลวของเจล

โดยทั่วไปวุ้น (Agar) มีอุณหภูมิเกิดเจลประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 82-92 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจลวุ้นนั้น จะสัมพันธ์กับความแข็งของเจล น้ำหนักโมเลกุลของวุ้นและระดับความเข้มข้นของวุ้นที่ใช้ หากวุ้นมีความแข็งของเจลสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้นเช่นกัน

2.3 ผลของน้ำตาลต่อสมบัติเจลของวุ้น

ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มของเจล เช่น เยลลี่ มีส่วนประกอบหลักคือ น้ำตาล ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติเจลของผลิตภัณฑ์ โดยการศึกษาผลของน้ำตาลต่อสมบัติเจลของวุ้น สรุปดังแสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 1 ชนิดและปริมาณของน้ำตาลต่อคุณสมบัติเจลของวุ้น

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของน้ำตาล	ผลการศึกษา	เอกสารอ้างอิง
เจลอากาศ โรส	น้ำตาลซูโครส มอลโตส ฟรุกโตส และกลูโคสที่ระดับ ความเข้มข้น 10- 50 % (w/w)	การแยกตัวของน้ำตาลลงเมื่อค่ามอดูลัสของเจลมีค่าสูงขึ้น โดยพบว่า ค่าการแยกตัวของน้ำตาลลงตามปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นซึ่งกลุ่มของน้ำตาลไดแซ็กคาไรด์มีแนวโน้มในการยับยั้งการแยกตัวของน้ำดีกว่ากลุ่มของมอลโทแซ็กคาไรด์ ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดน้ำตาลที่ต่างกัน n(e-OH)	Nagasaka และ Taneya (2000)
เจล อากาศโรส	น้ำตาลและ พอลิออล 10 ชนิด (โรโบส, เอทิลีน ไกลคอล, กลีเซอ รีน, แมนโนส, ฟรุก โตส, กาแลคโตส, กลูโคส, ซูโครส, มอลโตส และแรฟ ทิโนส)	การเติมน้ำตาลโรโบสและน้ำตาลแอลกอฮอล์ จะส่งผลให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวและการเกิดเจลต่ำลง ในขณะที่น้ำตาลชนิดอื่นจะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวและการเกิดเจลสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมข้าม (cross-linking) เพิ่มขึ้นจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในน้ำตาลและอากาศโรส โดยน้ำตาลที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (n(e-OH)) ขนาดใหญ่จะทำให้โครงสร้างของน้ำค้างตัวมากกว่าขนาดเล็ก	Stephen และ Phillips (2006)
เจล อากาศโรส	น้ำตาลซูโครส และ ฟรุกโตส ที่ระดับ ความเข้มข้น 20 40 และ 60 % (w/w)	การเติมน้ำตาลฟรุกโตสถึง 60% ทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่พบว่า เมื่อเติมน้ำตาลซูโครสที่ 60% นั้นทำให้ค่าความแข็งลดลงแต่ก็เก็บน้ำได้ดีกว่า ซึ่งความแตกต่างของน้ำตาลทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับ hydration number และความสามารถของน้ำตาลในการเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำ ทั้งนี้การก่อตัวของเจลและความร้อนที่เสถียรกว่านั้นใช้ได้กับน้ำตาลซูโครสเท่านั้น	Maurer และ คณะ (2012)
เจล อากาศโรส	น้ำตาลซูโครสและ ทรีฮาโลส ที่ระดับ ความเข้มข้น 20 และ 40 % (w/w)	ทรีฮาโลสมีอุณหภูมิการเกิดเจลสูงกว่าซูโครสเนื่องจาก มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่สูงกว่าจึงทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรงกับโมเลกุลของน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจนและน้ำอิสระที่อยู่รอบๆซึ่งมีเกลียวของอากาศโรสกระจายลดลง ดังนั้นเกลียวอากาศโรสจึงถูกเร่งให้เกิดการสร้างเครือข่ายสามมิติเร็วขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลสูงขึ้น	Russ และ คณะ (2014)

ตารางที่ 1 ชนิดและปริมาณของน้ำตาลต่อคุณสมบัติเจลของวุ้น (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของน้ำตาล	ผลการศึกษา	เอกสารอ้างอิง
วุ้นกะทิ	น้ำตาลซูโครส ซอร์บิทอล ไอโซมอลท์ มอลทิทอล และ ซูคราโลส ที่ระดับ การทดแทน 25, 50, 75 และ 100 % (w/w)	วุ้นกะทิสูตรใช้สารทดแทนน้ำตาลทุกชนิดมีปริมาณ ความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด และ ค่าความแข็งลดลงจากสูตรควบคุมรวมถึงมีอุณหภูมิการ หลอมเหลวของเจลต่ำกว่า และสูตรใช้น้ำตาล แอลกอฮอล์มีอุณหภูมิการเกิดเจลสูงกว่าสูตร ควบคุม	เอมนิกา เทียน ไสว (2557)
เจลอาการ์	น้ำตาลซูโครสที่ ระดับความเข้มข้น 10-50 % (w/w)	ความหนาแน่นของเจลเป็นส่วนโดยตรงกับความ เข้มข้นของน้ำตาล ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของวุ้นและค่า มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาล	Kohyama และคณะ (2016)
เจลอาการ์	น้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส ที่ ระดับความเข้มข้น 50-60 % (w/w) และแล็กทูโลส 10 % (w/w)	เจลอาการ์สามารถรับแรงกดสูงสุดได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ชนิดของน้ำตาล เจลกลุ่มมอโนแซ็กคาไรด์มีผลเด่นชัด น้อยกว่าต่อกลไกการเกิดเจลเมื่อเทียบกับเจลที่มีไดแซ็ก คาไรด์ซึ่งมีส่วนช่วยในความแข็งแรง เนื่องจาก น้ำหนัก โมเลกุลที่ต่างกัน และความสามารถในการละลายของ น้ำตาล และการเพิ่มแล็กทูโลสผสมลงไปช่วยสร้าง โครงสร้างเจลที่ก่อตัวขึ้น โดยเฉพาะความแข็งแรงมอโน แซ็กคาไรด์เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการเพิ่มจำนวน hydration ของน้ำตาลทั้งหมดจึงมีผลให้ยึดเกาะน้ำและ โครงสร้างของระบบที่มากขึ้น	Dorohovich และคณะ (2018)
เจล อากาโรส	น้ำตาลซูโครส, ไซลิทอลที่ระดับ ความเข้มข้น 10-50 % (w/w)	โครงสร้างเจลอากาโรสที่มีการเพิ่มน้ำตาลซูโครส เมื่อเพิ่ม ระดับความเข้มข้น ขนาดตาข่ายของเครือข่ายเจลมี แนวโน้มเล็กลง ส่วนการเติมไซลิทอลมีลักษณะคล้ายกัน จึงส่งผลให้ความเร็วของการเคลื่อนที่โมเลกุลตัวทำ ละลายลดลงและสามารถลดหรือป้องกันการแยกน้ำได้	Kaneda (2018)

2.4 น้ำตาลและสารให้ความหวาน

น้ำตาล (Sugar) คือ สารที่ให้ความหวานกับผลิตภัณฑ์วุ้น ซึ่งมีคุณสมบัติคือ ช่วยให้เกิดความหวานแก่ผลิตภัณฑ์ และมีความสามารถในการช่วยสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโครงสร้างของเจล ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นร่างแหเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของเจลแข็งแรงขึ้น (Nishinari และคณะ, 1997)

2.4.1 คุณสมบัติของน้ำตาล

2.4.1.1 สมบัติด้านรสชาติ

น้ำตาลมอโนแซ็กคาไรด์ ไดแซ็กคาไรด์ และน้ำตาลแอลกอฮอล์ให้รสหวาน ยกเว้นบางชนิดมีรสขมปน เช่น β -D-mannose และ gentibiose ดังนั้นจึงใช้น้ำตาลเป็นสารให้รสหวานแก่อาหารและยา สารให้ความหวานที่สำคัญคือ ซูโครส (Sucrose) หรือที่เรียกทั่วไปว่า น้ำตาลทราย เพราะให้ความหวานในระดับสูงและผลิตได้ง่ายจากพืชหลายชนิด เช่น ผลิตจากต้นอ้อยและหัวบีท เป็นต้น น้ำตาลชนิดต่างๆ มีระดับความหวานสัมพันธ์กับน้ำตาลซูโครสและเนื่องจากน้ำตาลซูโครส เป็นสารที่ให้พลังงาน ถ้าร่างกายมีมากเกินไปก็จะเก็บสะสมไว้ทำให้อ้วน หรือคนที่เป็นโรคเบาหวานจะมีน้ำตาลในเลือดสูงหากบริโภคน้ำตาลเช่นเดียวกับคนทั่วไป ปัจจุบันจึงมีการคิดค้นและผลิตสารให้ความหวานซึ่งให้ความหวานสูงกว่าน้ำตาลทรายจึงใช้ในปริมาณที่น้อยลง

2.4.1.2 สมบัติด้านกายภาพ

2.4.1.2.1 การละลาย (Solubility)

ปริมาณน้ำตาลที่จะละลายในสารละลายน้ำขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลและอุณหภูมิของน้ำ ขณะที่อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น โดยการละลายนั้นมีความสำคัญเนื่องจากการละลายมีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัสของอาหาร ความสามารถในการละลายน้ำของน้ำตาลแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยที่ฟรุคโทสละลายดีกว่าน้ำตาลชนิดอื่น รองมาคือ ซูโครส ส่วนกลูโคสและมอลโทสละลายได้ดีพอกัน แล็กโทส ละลายได้น้อยที่สุด

2.4.1.2.2 คุณสมบัติทางประสาทสัมผัส (Sensory properties)

น้ำตาลแต่ละชนิดจะหวานไม่เท่ากันและบางชนิดจะหวานขม เช่น β -D-Mannose ความหวานของน้ำตาลขึ้นอยู่กับจำนวนตำแหน่งของหมู่ OH และอะตอมออกซิเจน ถ้าความยาวของโมเลกุลมาก ความหวานจะลดลง และนอกจากโครงสร้างของโมเลกุลแล้ว ความหวานยังขึ้นกับอุณหภูมิ pH และ สารอื่นๆ ที่ปรากฏอยู่ในระบบ

2.4.1.2.3 ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity: a_w)

ค่าปริมาณน้ำอิสระ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นอิสระของโมเลกุลของน้ำในสิ่งแวดล้อมหนึ่งๆ แรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) และการเก็บรักษา เมื่อเราเติมน้ำตาลลงไปใต้น้ำตาลจะละลาย ทำให้โมเลกุลอิสระของน้ำลดลง ดังนั้น ค่า a_w ก็จะต่ำลง และ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลยิ่งสูงขึ้น ค่า a_w ก็จะยิ่งลดลง ส่วนความดันออสโมติกก็จะสูงขึ้น และจุลินทรีย์ที่อยู่ในสารละลายที่มีความดันออสโมติกสูง เซลล์จะเกิดการสูญเสียน้ำ (plasmolysis) เนื่องจากเกิดการออสโมซิสทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตในสภาวะแวดล้อมนั้น

2.4.1.2.4 ความหนืด (Viscosity)

การต้านทานต่อการไหล มีความสำคัญต่อความข้น และการคงรูปของผลิตภัณฑ์อาหาร เมื่ออุณหภูมิลดลง สารละลายน้ำตาลจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากกว่าร้อยละ 40

2.4.1.2.5 จุดเดือดของสารละลายน้ำตาล (Boiling point)

เมื่อน้ำตาลละลายในน้ำเป็นสารละลายเรียกว่า น้ำเชื่อม น้ำเชื่อมมีจุดเดือดสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำตาลที่ละลาย ปกติน้ำบริสุทธิ์มีจุดเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส แต่สารละลายหรือน้ำเชื่อมมีจุดเดือดสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จุดเดือดสูงขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำเชื่อม ดังนั้นอาจเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำเชื่อมโดยการวัดจุดเดือดของน้ำเชื่อมนั้น นอกจากนั้นน้ำเชื่อมที่จุดเดือด ณ อุณหภูมิต่างๆ จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

2.4.1.2.6 การเกิดเจล (Gelation)

ชนิดและปริมาณของน้ำตาลที่ใช้มีผลต่อลักษณะความแข็งแรงของเจล โดยเจลจะมีความแข็งแรงสูงขึ้นหากปริมาณน้ำตาลที่ใช้เพิ่มขึ้น (Doesburg, 1965)

2.4.2 สารให้ความหวาน (Sweeteners)

สารให้ความหวานแทนน้ำตาลเป็นหนึ่งในวัตถุเจือปนอาหารที่ใช้แทนน้ำตาล เพื่อทดแทนความหวาน นิยมเรียกกันว่า น้ำตาลเทียม มีการใช้เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน โดยสารให้ความหวานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามคุณค่าทางโภชนาการได้แก่ สารให้ความหวานที่มีคุณค่าทางโภชนาการ (nutritive sweeteners) หรือสารให้ความหวานที่ให้มวล (bulk sweeteners) และสารให้ความหวานที่ไม่มีคุณค่าทางโภชนาการ (non-nutritive sweeteners) หรือสารให้ความหวานที่ยังยวด (intense sweeteners) (สุขใจ ชูจันทร์, 2555)

2.4.2.1 สารให้ความหวานที่มีคุณค่าทางโภชนาการ (nutritive sweeteners)

เช่น น้ำตาลซูโครส (sucrose), ฟรุคโทส (fructose), กลูโคส (glucose) ซึ่งให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี/กรัม และน้ำตาลแอลกอฮอล์หรือที่เป็นที่รู้จักในชื่อ Polyols, Polyhydric alcohol หรือ Polyalcohol เช่น ซอร์บิทอล (sorbitol), แมนนิทอล (mannitol) และแล็กทิตอล (lactitol) ซึ่งจะให้พลังงานต่ำกว่าคือประมาณ 1.6-2.6 กิโลแคลอรี/กรัม น้ำตาลแอลกอฮอล์นั้นเป็นสารประกอบที่ได้จากการเพิ่มไฮโดรเจนของกลุ่มคาร์บอนิล (แอลดีไฮด์หรือคีโตน) ที่ถูกรีดิวซ์กลุ่มคาร์บอนปฐมภูมิและทุติยภูมิไปเป็นหมู่ไฮดรอกซิล มีสูตรทั่วไปคือ $H(HCHO)_{n+1}H$ แต่สูตรของน้ำตาลคือ $H(HCHO)_nHCO$ (Ghosh และ ML, 2011) โดยสารให้ความหวานประเภทนี้เป็นสารให้ความหวานที่ให้มวล (bulk sweeteners) คือ มีความหวานน้อย ต้องใช้ในปริมาณมาก จึงทำให้เกิดมวลหรือเนื้อ (mass and body) ของผลิตภัณฑ์ ถูกดูดซึมได้ช้ากว่า จึงทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงขึ้นช้ากว่าน้ำตาลซูโครส

หรือกลูโคส แต่ถ้ารับประทานมากอาจทำให้ท้องเสียได้ เนื่องจากร่างกายไม่สามารถดูดซึมได้จึงดึงน้ำเข้าสู่โพรงลำไส้ ทำให้เกิดอาการท้องเสียตามมาได้ รวมทั้งสามารถลดค่า water activity และชะลอการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ได้ (Lyn, 2001)

ตารางที่ 2 รสชาติและความหวานของน้ำตาลแอลกอฮอล์

น้ำตาลแอลกอฮอล์	ค่าความหวาน (น้ำตาลซูโครส = 1.0)	คำอธิบายความหวาน	ลักษณะรสชาติอื่นๆ
ไซลิทอล	0.87 – 1.00	เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่หวานที่สุด รสชาติหวานถูกใจ	เมื่อรับประทานจะมีความรู้สึกเย็นที่สูง (Intense cooling sensation)
มอลทิทอล	0.85 – 0.95	เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่หวานรองลงมา มีความหวานเหมือนน้ำตาลซูโครส	มีความรู้สึกเย็นที่ต่ำ และมีลักษณะคล้ายน้ำตาลซูโครส
อิริทริทอล	0.53 – 0.70	มีความหวานคล้ายน้ำตาลซูโครส มีความเป็นกรดและขมเล็กน้อย แต่ไม่มีรสคั่งในปาก	เมื่อรับประทานจะมีความรู้สึกเย็น (cooling sensation)
ซอร์บิทอล	0.50 – 0.60	รสชาติหวานถูกใจ	หลังรับประทานมีความรู้สึกเย็น (Cooling effect)
ไอโซมอลต์	0.45 – 0.60	มีความหวานเหมือนน้ำตาลซูโครส ไม่มีรสคั่งในปาก (aftertaste)	หลังรับประทานไม่มีความรู้สึกเย็น (Cooling effect)
แมนนิทอล	0.50	รสชาติหวานถูกใจ	หลังรับประทานมีความรู้สึกเย็น (Cooling effect)
แล็กทิทอล	0.30 – 0.40	ไม่มีรสคั่งในปาก (aftertaste) หวานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส มาก	หลังรับประทานมีความรู้สึกเย็น (Cooling effect)

หมายเหตุ : 10% ในน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ที่มา : ดัดแปลงจาก Embuscado (2006)

2.4.2.1.1 มอลทิทอล (Maltitol)

มอลทิทอล (Maltitol) ได้จากน้ำตาลมอลโตส จัดเป็นน้ำตาลประเภทไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide) ในทางเคมีรู้จักกันในชื่อ 4-O-a-glucopyranosyl-D-sorbitol ส่วนในทางการค้ารู้จักกันในชื่อ Maltisorb, Maltisweet และ Lesys Maltitol มีความหวานประมาณ 85-95% หรือ

ประมาณ 0.9 เท่าของน้ำตาลซูโครส มีคุณสมบัติต่างๆ ใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครส เช่น hygroscopicity, การละลาย และจุดหลอมเหลว (Struck และคณะ, 2014) ค่าพลังงานของมอลทิทอลมีค่าน้อยกว่าน้ำตาลซูโครสประมาณ 30-50% หรือประมาณ 2.0-3.8 kcal/g (Dobrova และคณะ, 2013) มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก (Prebiotic) ช่วยปรับสภาพระบบขับถ่าย ช่วยให้ร่างกายดูดซึมแร่ธาตุได้ง่าย ช่วยให้อาหารเงานามขึ้น น้ำตาลไม่ตกผลึกเมื่อโดนความร้อน ช่วยรักษาคุณภาพของอาหารและเครื่องดื่ม โดยมอลทิทอลดูดซึมได้ช้ากว่าจึงทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดขึ้นช้ากว่าน้ำตาลซูโครสหรือกลูโคส เหมาะที่จะนำมาแปรรูปอาหารเพื่อสุขภาพ (สุขใจ ชูจันทร์, 2555)

2.4.2.1.2 ซอร์บิทอล (Sorbitol)

ซอร์บิทอล (Sorbitol) เป็นอนุพันธ์ของกลูโคส จัดเป็นน้ำตาลประเภทมอโนแซ็กคาไรด์ (Monosaccharide) พบตามธรรมชาติในผักและผลไม้ หรือผลิตได้จากกลูโคสไซรัป เป็นที่รู้จักกันในชื่อ glucitol, Sorbogem และ Sorbo เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่มีการใช้มากที่สุดในอาหาร ทั้งในรูปแบบของแข็งและของเหลว มีความหวานประมาณ 60% ของน้ำตาลซูโครส ให้พลังงาน 2.6 กิโลแคลอรีต่อกรัม เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ร่างกายมนุษย์เผาผลาญได้ช้า เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลแอลดีไฮด์ (aldehyde group) เป็นหมู่ไฮดรอกซิล มีความสามารถในการจับกับน้ำที่มีประสิทธิภาพจึงสามารถละลายน้ำได้ดี (Hannou และคณะ, 2018) เป็นสารที่ใช้ประโยชน์ในการดูดความชื้นและเพิ่มปริมาตรให้ความหวานที่ดี สามารถรวมกันได้ดีกับส่วนประกอบอาหารอื่นๆ เช่น น้ำตาล สารก่อเจล โปรตีน และไขมัน นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเสริมฤทธิ์กันกับสารให้ความหวานอื่นๆ ส่งผลให้มีความหวานและรสชาติที่ดีขึ้น (Grembecka, 2015) จึงนิยมนำมาใช้ปรับลักษณะเนื้ออาหาร ทนต่อการเกิดสีน้ำตาล แต่ไม่มีส่วนร่วมกับปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Chow และคณะ, 1958) ช่วยจำกัดการเจริญเติบโตของรา และทางด้านการแพทย์ใช้ซอร์บิทอลเป็นสารช่วยระบายสำหรับคนท้องผูก (สุขใจ ชูจันทร์, 2555)

2.4.2.1.3 ไอโซมอลต์ (Isomalt)

ไอโซมอลต์ (Isomalt) เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซูโครสที่ได้จากกระบวนการผลิตสองขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกของการผลิตเป็นขั้นตอนของ Enzymatic transglucosidation ซึ่งน้ำตาลซูโครสจะถูกเปลี่ยนด้วยเอนไซม์โดยการสลายพันธะ 1-2 glycosidic ระหว่างโมเลกุลของกลูโคสและฟรุกโตสเป็น Isomaltulose (6-O- D-glucopyranosyl fructose) และในขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนไฮโดรจีเนชันของ Isomaltulose โดยทำให้เกิด Stereoisomer disaccharide alcohol 1-O-Dglucopyranosyl-D-mannitol dihydrate (1,1-GPM dihydrate) และ 6-O-D-glucopyranosyl-Dsorbitol (1,6-GPS) ในปริมาณโมลที่เท่ากันได้เป็น ไอโซมอลต์ โดยโครงสร้างโมเลกุลที่ได้เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลโมเลกุลคู่ มีลักษณะคล้ายกับมอลทิทอล (maltitol) แต่มีความสามารถในการดูด

ความชื้นได้น้อยกว่าน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดอื่น ความหวานขึ้นอยู่กับความเข้มข้น อุณหภูมิ ตลอดจนรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ มีความหวานเป็น 45-60% ของน้ำตาลซูโครส (Grembecka, 2015) ให้พลังงานต่ำ โดยให้พลังงาน 2.0 กิโลแคลอรีต่อกรัม มีรสหวานคล้ายกับน้ำตาลซูโครส ไม่มีรสหวานติดคอ ทนต่อการสูญเสียความหวานในระหว่างการให้ความร้อน ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงได้แต่ไม่ให้ความรู้สึกเย็น มีกลิ่นเล็กน้อย และมักใช้ร่วมกับสารให้ความหวานที่ยาวเนื่องจากมีคุณสมบัติช่วยปกปิดรสขมของวัตถุเจือปนอาหารที่มีรสหวานและสารเพิ่มปริมาณ (bulking agents) (Sáska และคณะ, 2010)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลแอลกอฮอล์

คุณสมบัติ	น้ำตาลแอลกอฮอล์			
	น้ำตาลซูโครส	มอลทิทอล	ซอร์บิทอล	ไอโซมอลต์
Relative sweetness (%)	100	80	60	40
จำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (n)	7	9	6	9
มวลโมเลกุล (MW)	342.30	344.31	182.17	344.31
ค่าพลังงาน (Kcal/g)	4.0	2.0-3.0	2.6-3.0	2.0
ค่าดัชนีน้ำตาล (GI)	กลาง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
การละลายที่ 20 °C (g/100 g solution)	66.7	63	75	24.5
จุดเดือด (°C)	160-186	144-150	99-101	145-150
Hygroscopic (20°C)	ต่ำ	ต่ำ	กลาง	ต่ำมาก
ความคงตัวทางความร้อน	สลายตัวที่ 160-186 °C	>160 °C	>160 °C	>160 °C
ความคงตัวต่อปฏิกิริยา เคมี/เอนไซม์	เกิด Millard browning ภายใต้สภาวะที่มีกรด, เกิด caramelization เมื่อมีการ hydrolyze ด้วยเอนไซม์	มีความคงตัว, ไม่เกิด	มีความคงตัว, ไม่เกิด	มีความคงตัว, ไม่เกิด

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Embuscado (2006)

2.4.2.2 สารให้ความหวานที่ไม่มีคุณค่าทางโภชนาการ (non-nutritive sweeteners) ในปัจจุบันมีหลายชนิด แต่ที่องค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา ยอมรับให้ใช้ได้ อย่างปลอดภัยถ้าใช้ในปริมาณที่เหมาะสม มีอยู่ 5 ชนิดคือ แซ็กคาริน (Saccharin), แอสปาร์แตม (Aspartame), นีโอแทม (Neotame), ซูคราโลส (Sucralose) และอะซีซัลแฟมโพแทสเซียม

(Acesulfame potassium) และสารจากธรรมชาติอีก 2 ชนิดคือ สตีวียอลไกลโคไซด์ (Steviol glycosides) และสารสกัดจากผลหล่อฮังก้วย (Siraitia grosvenorii) สารให้ความหวานประเภทนี้มักเป็นสารให้ความหวานที่ยังยวด (Intense sweeteners) ซึ่งมีความหวานอย่างมากเมื่อเทียบกับน้ำตาลซูโครส (sucrose) จึงใช้ในปริมาณน้อย ไม่ทำให้ฟันผุและไม่ทำให้ดัชนีน้ำตาลเพิ่มขึ้น และได้แสดงการเปรียบเทียบความหวานของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลกับน้ำตาลซูโครส รวมถึงค่าดัชนีน้ำตาลและพลังงาน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบความหวานของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลกับน้ำตาลซูโครส รวมถึงค่าดัชนีน้ำตาลและพลังงาน

Type of sweetener	Approximate sweetness	Aftertaste	Glycemic index	Energy (kcal/g)	Caution
Sucrose (reference)	1	-	100	4	-
Aspartame	180-200	Bitter	0	4 (It is protein, which provides 4 Kcal/g)	Phenylketonuria
Saccharin	200-700	Bitter	0	0	Pregnancy
Acesulfame-K	200	Bitter	0	0	Headache
Sucralose	600	Bitter	0	0	Thymus shrinkage
Neotame	6,000-10,000	Liquorice	0	0	Hepatotoxic
Steviol glycosides	100-450	Bitter	0	0	-
Monk fruit	250-400	Liquorice	0	0	-

ที่มา : ดัดแปลงจาก (Edwards และคณะ, 2016; Jain และ Grover, 2015; Laffitte และคณะ, 2017; Varzakas และคณะ, 2012)

2.4.2.2.1 หญ้าหวาน (Stevia)

หญ้าหวานมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Stevia rebaudiana Bertoni* หรือเรียกสั้นๆว่า Stevia เป็นพืชในวงศ์ Asteraceae ที่พบตามเขตร้อนชื้น ตามฝั่งตะวันตกของอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ เป็นพืชที่ให้ความหวานโดยธรรมชาติ โดยสารสกัดบริสุทธิ์ที่ให้ความหวานจากใบหญ้าหวานคือ สตีวียอลไกลโคไซด์ (Steviol glycosides) ซึ่งเป็นสารประกอบพวกไดเทอร์พีนกลัยโคไซด์ (diterpene glycoside) หลายชนิด ได้แก่ Stevioside พบมากที่สุด 2.0 -7.7% พบลำดับรองลงมาคือ Rebaudioside A ถึง F ประมาณ 0.8-2.9, Steviol, Steviolbioside และ Dulcoside A

ตามลำดับ และในสารละลายที่สกัดจากใบหญ้าหวานยังประกอบไปด้วยสารพฤกษเคมี (phytochemical) ต่างๆ เช่น ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก กรดไขมันอิสระ มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งจุลินทรีย์ ต้านเซลล์มะเร็ง ลดอาการอักเสบ และเพิ่มภูมิคุ้มกันให้แก่ร่างกาย (Gawel-Beben และคณะ, 2015) โดยส่วนใหญ่การใช้สารสกัดใบหญ้าหวานในเชิงเป็นสารให้ความหวานได้รับความนิยมมากในรูปแบบของ ผลิตภัณฑ์ไอโซด์บริสุทธิ์และใบชาอบแห้ง (Lemus-Mondaca และคณะ, 2018) อีกทั้งสารที่ให้รสหวานแต่ละชนิดนั้นมีความสัมพันธ์กับไดเทอร์ปีนกลัยโคไซด์ (diterpene glycoside) ที่แยกได้จากใบหญ้าหวานจึงมีค่าที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สารที่ให้รสหวานในหญ้าหวาน

Diterpene glycosides	Molecular Formula	Molecular Weight	Sweetness Potency
Stevioside	$C_{38}H_{60}O_{18}$	804.88	250-300
Rebaudioside A	$C_{44}H_{70}O_{23}$	967.01	350-450
Rebaudioside B	$C_{38}H_{60}O_{18}$	804.88	300-350
Rebaudioside C	$C_{44}H_{70}O_{22}$	951.01	50-120
Rebaudioside D	$C_{50}H_{80}O_{28}$	1129.15	200-300
Rebaudioside E	$C_{44}H_{70}O_{23}$	967.01	250-300
Rebaudioside F	$C_{43}H_{68}O_{22}$	936.99	ND
Steviolbioside	$C_{32}H_{50}O_{13}$	642.73	100-125
Dulcoside A	$C_{38}H_{60}O_{17}$	788.87	50-120

ที่มา : ดัดแปลงจาก Prakash และ Chaturvedula (2018)

ศิวาพร ศิวเวช (2546) พบว่า สารบริสุทธิ์ของ stevioside มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว จุดหลอมเหลว 196-202 °C ไม่มีกลิ่น มีรสหวานมากและมักมีรสขมหรือรสขะเอนเล็กน้อยที่ปลายลิ้น โดยความขมของสารให้ความหวานเหล่านี้เกิดจากการจับกับตัวรับรสขม hTAS2R4 และ hTAS2R14 (Hellfritsch และคณะ, 2012) ละลายได้ดีในน้ำ เป็นสารที่ทนต่อความร้อน ไม่ทำให้อาหารหรือสารผสมเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลคล้ำ ไม่ทำให้สารปรุงรสอื่นๆ เช่น เกลือ น้ำตาลทราย ผงชูรส น้ำส้มสายชู เปลี่ยนแปลงรสชาติเดิมแต่กลับกลมกลื่นกันได้ดีจึงเหมาะสมต่อการนำมาประกอบอาหาร รวมถึงละลายได้ดีในสารละลายกรดและด่างอ่อน รวมทั้งเป็นสารที่มีพิษเฉียบพลันต่ำและปลอดภัยสูง โดยการออกรสหวานของสารให้ความหวานในหญ้าหวานจะไม่เหมือนกับน้ำตาลทรายเพราะจะออกรสหวานช้ากว่าน้ำตาลทรายเล็กน้อยและรสหวานจะจางหายไปช้ากว่าน้ำตาลทราย

จากงานวิจัยของ Chupeerach และคณะ (2018) ได้เลือกสารให้ความหวานสำหรับการพัฒนาว่านมะพร้าวคือ สตีวียอลไกลโคไซด์ เนื่องจาก มีองค์ประกอบในการป้องกัน ปรับปรุงโรคอ้วน และมีส่วนผสมของสารยับยั้งไกลโคไลซิส เพื่อพัฒนาสูตรว่านมะพร้าวที่ส่งผลดีต่อสุขภาพมากขึ้นพบว่า ว่านมะพร้าวสูตรที่มีสตีวียอลไกลโคไซด์ทดแทนร้อยละ 50 ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสมากกว่าสูตรอื่นๆ และเมื่อนำมาศึกษาระดับน้ำตาลในเลือดและอินซูลินเทียบกับสูตรควบคุมพบว่า มีแนวโน้มต่ำกว่า อาจเนื่องจากองค์ประกอบของสารอาหารมีน้ำตาลทั้งหมดต่ำกว่าและมีเส้นใยสูงกว่า ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ว่านมะพร้าวที่มีการใช้สตีวียอลไกลโคไซด์อาจเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารสำหรับผู้ที่มีสุขภาพดีหรือผู้ป่วยกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) เช่น โรคอ้วน โรคเบาหวาน เป็นต้น

องค์การอาหารและยา ประเทศสหรัฐอเมริกา (US FDA) ได้รับรองให้ใช้สตีวียอลไกลโคไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (ความบริสุทธิ์ $\geq 95\%$) เป็นวัตถุที่ใช้สำหรับแต่งรสหวานในอาหาร โดยกำหนดปริมาณการใช้ที่ยอมรับได้ (Acceptable Daily Intake (ADI)) เท่ากับ 4 มิลลิกรัมของสารสตีวียอลต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน อย่างไรก็ตามยังไม่รับรองการนำไปและสารสกัดหยาบจากใบหญ้าหวานมาเป็นวัตถุปรุงแต่งรสอาหาร เนื่องจากข้อมูลทางพิษวิทยายังไม่เพียงพอ และปัจจุบันในประเทศไทยมีการจำหน่ายหญ้าหวานในรูปแบบเครื่องดื่มชาสมุนไพร และสารปรุงแต่งรสอาหารในรูปแบบสารสตีวียอลไกลโคไซด์ โดยมีการกำหนดปริมาณการใช้เป็นสารปรุงแต่งรสที่เหมาะสมในอาหารแต่ละประเภท ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 381 พ.ศ.2559 เรื่อง วัตถุเจือปนอาหาร (ฉบับที่ 4) เพื่อกำหนดให้ใช้สตีวียอลไกลโคไซด์อย่างปลอดภัยมากขึ้น โดยรูปแบบของสารให้ความหวานจากหญ้าหวานที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันมากที่สุดมี 2 ชนิดคือ สตีวิโอไซด์ (Stevioside) และรีบาดิโอไซด์ เอ (Rebaudioside A) ซึ่งจากงานวิจัยของ Singh และคณะ (2020) พบว่า รีบาดิโอไซด์ เอ (Rebaudioside A) มีความหวาน ความเสถียรมาก และมีรสขมน้อยกว่าสตีวิโอไซด์ (Stevioside)

รูปแบบการให้รสหวานของสารให้ความหวานจากหญ้าหวานซึ่งถือเป็นสารให้ความหวานที่ยังยวด (Intense sweeteners) มีความฝาดและรสที่ไม่พึงประสงค์จึงอาจทำให้เปลี่ยนลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายและลดการยอมรับของผู้บริโภคได้ ในการผลิตภาคอุตสาหกรรมจึงมักนำสารให้ความหวานที่ยังยวด (Intense sweeteners) ผสมกับสารให้ความหวานที่ให้มวล (Bulk sweeteners) เช่น คาร์โบไฮเดรต น้ำตาลทรายหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ (Portmann และ Kilcast, 1998) เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีค่าความเข้มข้นของลักษณะในทางลบ เช่น ความขม, ฝาด และกลิ่นรสหวานแบบปลอม ต่ำกว่าสารให้ความหวานที่ยังยวด (Gwak และคณะ, 2012) จากงานวิจัย Jung และคณะ (2021) ได้นำรีบาดิโอไซด์ เอ (Rebaudioside A) มาผสมกับสารให้ความหวานอื่นๆ ได้แก่ อัลลูลูโลส (allulose) และมอลทิทอล (maltitol) มาศึกษาเพื่อประเมินความสามารถในการเสริมฤทธิ์กันของ

ความหวาน ความชุ่ม และการปรับปรุงคุณภาพรสชาติพบว่า รีบาวดิโอไซด์ เอ (Rebaudioside A) ที่ผสมกับสารให้ความหวานทั้ง 2 ชนิด มีรสขมและรสที่ค้างอยู่ในปากลดลง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Prakash และคณะ (2008) ที่พบว่า เมื่อนำรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่ระดับความเข้มข้นสูงมาผสมกับสารให้ความหวานอื่นๆ ส่งผลให้ช่วยลดความขมและรสขะเอมให้อยู่ในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบหรือรู้สึกได้ จึงเป็นแนวโน้มที่ดีในการนำไปเป็นแนวทางพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบ

3.1.1.1 กะทิสำเร็จรูปยูเอชที (ตรา อร่อยดี บริษัท ไทย อกริ ฟู้ดส์ จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย)

3.1.1.2 เกลือป่น (ตรา ประทุมพิพย์ บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ ประเทศไทย)

3.1.1.3 น้ำตาลทราย (ตรา ลิน บริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด ประเทศไทย)

3.1.1.4 ผงวุ้นอาการ์ (ตรา นางเงือก ห้างหุ้นส่วนจำกัด พัฒนาสินเอ็นเตอร์ไพรส์ ประเทศไทย)

3.1.1.5 กลิ่นมะลิ (ตรา ตราเบสท์โอเตอร์ บริษัท เบสท์โอเตอร์ จำกัด ประเทศไทย)

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 สตีวียอลไกลโคไซด์ (Rebaudioside A 98% Stevia) (บริษัท Zhucheng Haotian Pharm Co., Ltd. China)

3.1.2.2 ซอร์บิทอล (Sorbitol) (บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย)

3.1.2.3 มอลทิทอล (Maltitol) (บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย)

3.1.2.4 ไอโซมอลต์ (Isomalt) (บริษัท Beneo-Palatinit Ltd., Germany)

3.1.2.5 น้ำกลั่น (Distilled water, Vunique, Thailand)

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์คุณภาพ

3.1.3.1 เตาให้ความร้อน (Hot plate) (EGO, Germany)

3.1.3.2 เทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิตอล (WT-1, Elitech Technology, Inc, USA)

3.1.3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital balance, BP 221S, Sartorius, Germany)

3.1.3.4 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง (Digital balance, TE 3102S Sartorius, Germany)

3.1.3.5 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดแบบดิจิตอล (Digital refractometer, Pal-3 (ALPHA), Atago, Japan)

- 3.1.3.6 เครื่องวัดสี (Hunter lab, Colorflex EZ, Hunter Associates Laboratory, Inc, USA)
- 3.1.3.7 ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Hot air oven) (FED53, Binder, Germany)
- 3.1.3.8 เครื่องวัดค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (Aqua Lab, 4TE, USA)
- 3.1.3.9 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (TA-xT2i, Stable Microsystems™, England)
- 3.1.3.10 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (DSC 8000, Perkin Elmer, USA)
- 3.1.3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope) (FEI Quanta 450, Netherlands)
- 3.1.3.12 เครื่องฉาบผิว (Sputter coater) (Quorum SC7620, UK)
- 3.1.3.13 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) (Telstar LyoQuest, Spain)
- 3.1.3.14 ตู้แช่เย็น (Refrigerator) (Singer, Thailand)
- 3.1.3.15 กระดาษกรอง เบอร์ 1 (Whatman, England)
- 3.1.3.16 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.3.17 ถ้วยอะลูมิเนียม (Moisture can)
- 3.1.3.18 เครื่องแก้วต่างๆ ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์
- 3.1.3.19 ถ้วยพลาสติกโพลีโพรไพลีน (PP) ชนิดมีฝาปิดสนิท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 cm ฐาน 3.7 cm และสูง 2.5 cm สำหรับบรรจุตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์
- 3.1.3.20 แม่พิมพ์ซิลิโคนสี่เหลี่ยมขนาดช่อง 1.5x1.5x1.0 cm สำหรับบรรจุตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด ปริมาณน้ำอิสระ ปริมาณความชื้น ค่าการแยกตัวของน้ำ และค่าสี
- 3.1.3.21 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์และประมวลผล

- 3.1.4.1 คอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL., USA) สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

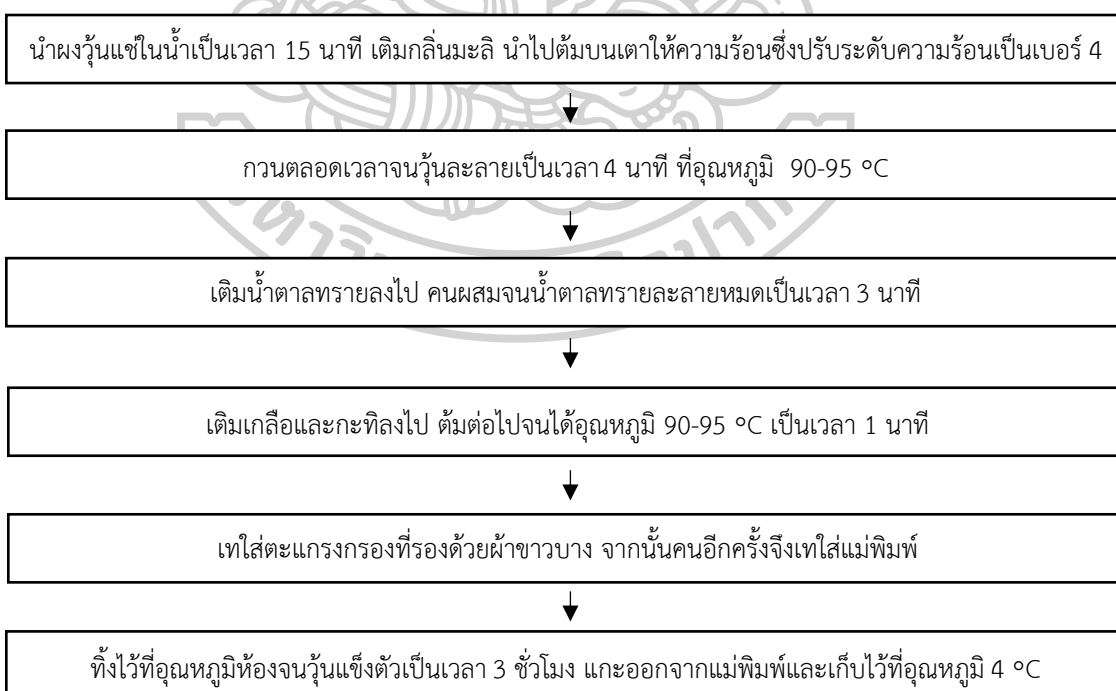
3.1.4.2 โปรแกรมสำเร็จรูป XLSTAT เวอร์ชัน 2021 (Addinssoft, New York, USA) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูล

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.2.1.1 การเตรียมตัวอย่างวุ้นกะทิสูตรต้นแบบ

เตรียมส่วนผสมสูตรต้นแบบวุ้นกะทิตามสูตรที่ใช้ในการผลิตดังแสดงในตารางที่ 6 โดยวิธีการผลิตเริ่มจากนำผงวุ้นแช่ในน้ำเป็นเวลา 15 นาที เติมหลื่นมะลิ นำไปต้มบนเตาให้ความร้อนซึ่งปรับระดับความร้อนของเตาเป็นเบอร์ 4 จากนั้นกวนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการไหม้ของวุ้นที่ก้นหม้อเป็นเวลา 4 นาที ที่อุณหภูมิ 90-95 °C เพื่อให้วุ้นละลายจนหมด จากนั้นใส่น้ำตาลทรายลงไป คนผสมจนน้ำตาลทรายละลายหมดเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นจึงใส่เกลือและกะทิลงไป ต้มต่อไปจนได้อุณหภูมิ 90-95 °C เป็นเวลา 1 นาที เทใส่ตะแกรงกรองที่รองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นคนอีกครั้งจึงเทใส่แม่พิมพ์ พักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนวุ้นแข็งตัวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แกะออกจากแม่พิมพ์และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C กระบวนการผลิตวุ้นกะทิดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาพที่ 5



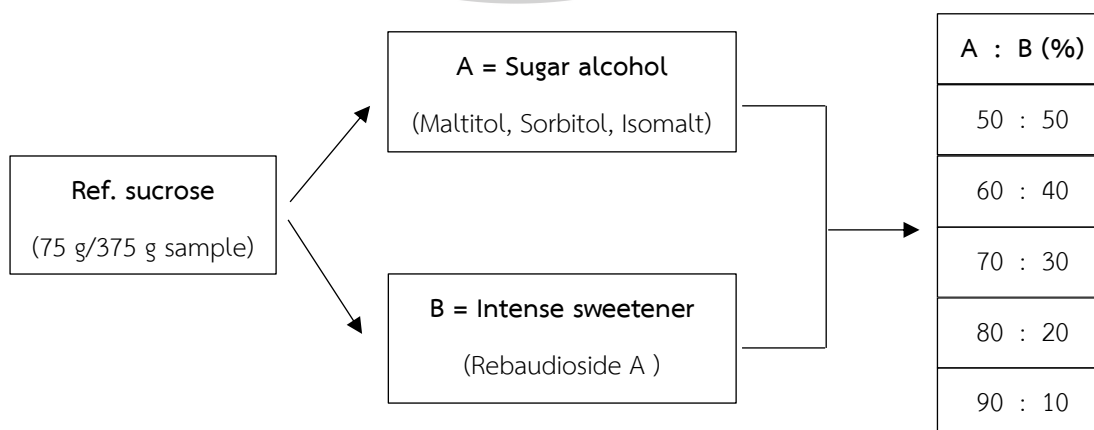
ภาพที่ 5 ตัวอย่างกระบวนการผลิตวุ้นกะทิ

ตารางที่ 6 สูตรต้นแบบของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ

ส่วนผสม	ปริมาณ (g)	ร้อยละ (%)
กะทิกล่อง	150	40
น้ำ	144.4	38.51
น้ำตาลทราย	75	20
เกลือ	1.13	0.30
ผงวุ้น	4.5	1.2
กลี้นมะลิ	0.1	0.03
รวม	375	100

3.2.1.2 การเตรียมตัวอย่างวุ้นกะทิสูตรที่มีการใช้สารให้ความหวาน

เตรียมส่วนผสมสูตรวุ้นกะทิที่มีการใช้สารให้ความหวาน โดยใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายที่อัตราส่วนแตกต่างกัน 5 อัตราส่วน ได้แก่ 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 และ 90:10 (%) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งใช้สารให้ความหวาน 2 กลุ่มเพื่อให้มีผลในการช่วยเสริมกัน ให้ A คือ กลุ่มของน้ำตาลแอลกอฮอล์ได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ ส่วน B คือ สารให้ความหวานยิ่งยวด ได้แก่ สตีวียอลไกลโคไซด์ชนิดรีบาวดิโอไซด์ เอ 98% โดยใช้ปริมาณน้ำตาลทรายจากสูตรต้นแบบในตารางที่ 6 เป็นปริมาณอ้างอิง คำนวณปริมาณตามอัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน ดังแสดงในตารางที่ 7 และคำนวณปริมาณสารให้ความหวานที่ใช้จากค่า relative sweetness ของสารให้ความหวานแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 8 ถึง 11 ดังนั้นจึงมีวุ้นกะทิที่ต้องผลิตทั้งหมด 16 สูตร โดยแต่ละสูตรจะทำการทดลองผลิต 3 ซ้ำ นำตัวอย่างวุ้นกะทิไปทำการวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพ เคมี ความร้อน และโครงสร้างระดับจุลภาค รวมถึงการทดสอบทางประสาทสัมผัสในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 6 อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานที่ศึกษา

ตารางที่ 7 ปริมาณของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายที่อัตราส่วนการทดแทนแตกต่างกัน

A : B (%)	ตัวอย่าง A (กรัม)	ตัวอย่าง B (กรัม)
50:50	37.5	37.5
60:40	45	30
70:30	52.5	22.5
80:20	60	15
90:10	67.5	7.5

หมายเหตุ : ตัวอักษร A คือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ และ B คือ รีบาวติโอไซด์ เอ โดยใช้ น้ำตาลทราย 75 กรัมในสัดส่วนสูตรฐานกะทิ 375 กรัม เป็นตัวอย่างอ้างอิง (R)

ตารางที่ 8 ค่า Relative sweetness ของสารให้ความหวานแต่ละชนิด

สารให้ความหวาน	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล	ค่า Relative Sweetness (Sucrose = 1)
มอลทิทอล	$C_{12}H_{24}O_{11}$	344.31	0.8
ซอร์บิทอล	$C_6H_{14}O_6$	182.17	0.6
ไอโซมอลต์	$C_{12}H_{24}O_{11}$	344.31	0.4
รีบาวติโอไซด์ เอ	$C_{44}H_{70}O_{23}$	967.01	400

ที่มา : ดัดแปลงจาก (Embuscado, 2006; Prakash และ Chaturvedula, 2018)

ตารางที่ 9 สูตรผลิตภัณฑ์ฐานกะทิที่ใช้อัตราส่วนมอลทิทอลต่อรีบาวติโอไซด์ เอ แตกต่างกัน

ส่วนผสม	สัดส่วนของวัตถุดิบ (กรัม)				
	มอลทิทอล:รีบาวติโอไซด์ เอ				
	50:50	60:40	70:30	80:20	90:10
กะทิกล่อง	150	150	150	150	150
น้ำ	172.40	163.05	153.69	144.34	134.98
มอลทิทอล	46.88	56.25	65.63	75	84.38
รีบาวติโอไซด์ เอ	0.094	0.075	0.056	0.038	0.019
เกลือ	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
ผงวุ้น	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
กลิ่นมะลิ	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
รวม	375	375	375	375	375

ตารางที่ 10 สูตรผลิตภัณฑ์ขี้ผึ้งกะทิที่ใช้อัตราส่วนซอร์บิทอลต่อรีบาวดีไฮไซด์ เอ แตกต่างกัน

ส่วนผสม	สัดส่วนของวัตถุดิบ (กรัม)				
	ซอร์บิทอล:รีบาวดีไฮไซด์ เอ				
	50:50	60:40	70:30	80:20	90:10
กะทิกล่อง	150	150	150	150	150
น้ำ	156.78	144.30	131.82	119.34	106.86
ซอร์บิทอล	62.50	75	87.50	100	112.50
รีบาวดีไฮไซด์ เอ	0.094	0.075	0.056	0.038	0.019
เกลือ	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
ผงขี้ผึ้ง	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
กลีเซอรีน	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
รวม	375	375	375	375	375

ตารางที่ 11 สูตรผลิตภัณฑ์ขี้ผึ้งกะทิที่ใช้อัตราส่วนไอโซมอลต์ต่อรีบาวดีไฮไซด์ เอ แตกต่างกัน

ส่วนผสม	สัดส่วนของวัตถุดิบ (กรัม)				
	ไอโซมอลต์:รีบาวดีไฮไซด์ เอ				
	50:50	60:40	70:30	80:20	90:10
กะทิกล่อง	150	150	150	150	150
น้ำ	125.53	106.80	88.07	69.34	50.61
ไอโซมอลต์	93.75	112.50	131.25	150.00	168.75
รีบาวดีไฮไซด์ เอ	0.094	0.075	0.056	0.038	0.019
เกลือ	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
ผงขี้ผึ้ง	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
กลีเซอรีน	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
รวม	375	375	375	375	375

3.2.2 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.2.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพ

3.2.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าสี (Color)

นำตัวอย่างขี้ผึ้งกะทิไปทำการวัดค่าสี โดยใช้เครื่องวัดสี (Hunter lab, Colorflex EZ, Hunter Associates Laboratory, Inc, USA) เพื่อประเมินคุณภาพด้านสี โดยนำตัวอย่างขี้ผึ้งกะทิมาวางที่ตำแหน่งสำหรับวัดสีของเครื่องมือ เครื่องจะรายงานในรูปแบบของ CIELAB หรือ L*, a*, และ b*

จากนั้นคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE^*) และค่าดัชนีความขาว (WI) ด้วยวิธีของ Briones และ Aguilera (2005) ประเมินผลการทดลองจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบและทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละสูตรของวุ้นกะทิทั้ง 16 สูตร

3.2.2.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)

นำตัวอย่างวุ้นกะทิไปวัดค่าความแข็งของเจล (Hardness; N) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร (Chewiness; N-mm) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (TA-xT2i, Stable Microsystems™, England) เพื่อประเมินคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของวุ้นกะทิ โดยใช้หัววัด spherical stainless P 0.5S ทำการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA (Texture Profile Analysis) กำหนดค่าความเร็วในช่วงก่อนการทดสอบ (pre-test speed) เท่ากับ 2.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าความเร็วขณะทดสอบ (test speed) เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าความเร็วในช่วงหลังการทดสอบ (post-test speed) เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที และลดลงไปเป็นระยะทาง 40% ของตัวอย่าง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการกดและระยะทาง โดยใช้ตัวอย่างที่บรรจุในถ้วยพลาสติกพอลิโพรไพลีน (PP) ชนิดมีฝาปิดสนิท เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวหน้าของตัวอย่างแห้งจากการสัมผัสกับอากาศโดยตรงซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสได้ โดยประเมินผลการทดลองจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ และทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละสูตรของวุ้นกะทิทั้ง 16 สูตร

3.2.2.1.3 การวิเคราะห์ค่าการแยกตัวของน้ำ (Syneresis)

นำตัวอย่างวุ้นกะทิมาวิเคราะห์ค่าการแยกตัวของน้ำ ดัดแปลงจากวิธีของ Villanueva และคณะ (2010) โดยการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากนำสารละลายวุ้นกะทิภายหลังการต้มเทลงในช่องแม่พิมพ์และปล่อยให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหลีกเลี่ยงการตัดแบ่งตัวอย่าง ป้องกันไม่ให้เจลที่ใช้ในการทดสอบเสียหายหรือเกิดการแยกตัวของน้ำมากกว่าความเป็นจริง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น วางบนกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วจับเวลา 5 นาที และนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง โดยทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละสูตรของวุ้นกะทิทั้ง 16 สูตร

3.2.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางด้านเคมี

3.2.2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด

นำตัวอย่างวุ้นกะทิมาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด ด้วยเครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดแบบดิจิตอล (Digital refractometer, Pal-1

(ALPHA), Atago, Japan) โดยใช้ตัวอย่างที่เตรียมจากแม่พิมพ์ซิลิโคนสีเหลือง นำมาบดและกรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำตัวอย่างใส่ลงในช่องสำหรับวัดตัวอย่างของเครื่อง และทำการอ่านค่า โดยประเมินผลการทดลองจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ก่อนการทดสอบ และทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละสูตรของวันกะทิทั้ง 16 สูตร

3.2.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

นำตัวอย่างวันกะทิมาวินิจฉัยวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยวิธีของ Horwitz (2000) ใช้ตัวอย่างที่เตรียมจากแม่พิมพ์ซิลิโคนสีเหลือง โดยประเมินผลการทดลองจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน ก่อนการทดสอบ และทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละสูตรของวันกะทิทั้ง 16 สูตร

3.2.2.3 การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity : a_w)

นำตัวอย่างวันกะทิมาวินิจฉัยค่าปริมาณน้ำอิสระ ด้วยเครื่องวัดค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (Aqua Lab, 4TE, USA) โดยใช้ตัวอย่างที่เตรียมจากแม่พิมพ์ซิลิโคนสีเหลือง นำมาบดเป็นชิ้นขนาดเล็ก บรรจุใส่ถ้วยสำหรับวัดในปริมาณ $\frac{1}{2}$ ของถ้วย จากนั้นใส่ถ้วยตัวอย่างลงในเครื่อง แล้วทำการอ่านค่าที่ได้ โดยประเมินผลการทดลองจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ก่อนการทดสอบ และทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละสูตรของวันกะทิทั้ง 16 สูตร

3.2.2.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermal property)

นำตัวอย่างวันกะทิมาวินิจฉัยคุณสมบัติในการหลอมเหลวและการเกิดเจลของอาหารในระบบที่เกี่ยวข้องกับวันกะทิที่ทำการทดแทนน้ำตาลทรายด้วยสารให้ความหวานชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของอาการ์ 12% (w/w) และใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (DSC 8000, Perkin Elmer, USA)

ทำการเตรียมตัวอย่างและชั่งตัวอย่างประมาณ 32-35 มิลลิกรัม ใส่ Stainless pan จากนั้นนำตัวอย่างใส่เครื่อง DSC ทำการคงอุณหภูมิในตัวอย่างให้เริ่มต้นที่ 30 °C เป็นเวลา 1 นาที แล้วให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนถึง 120 °C ด้วยอัตรา 5 °C/min ทำการคงอุณหภูมิในตัวอย่างไว้ที่ 120 °C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ -20 °C ด้วยอัตรา 5 °C/min แล้วคงไว้ที่ -20 °C เป็นเวลา 1 นาที บันทึกผลเป็นกราฟ (thermogram) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง heat flow endo up (แกน y) กับอุณหภูมิ (แกน x) เพื่อหาอุณหภูมิที่เริ่มหลอมเหลวของอาการ์จากเจลเป็นของเหลว (gel to sol) ($T_{m_{onset}}$), อุณหภูมิที่มีพีคสูงสุดในการหลอมเหลวของอาการ์ (T_m) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการหลอมเหลว ($T_{m_{end}}$) และค่าเอนทาลปี (ΔH) ในการหลอมเหลว และอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลของอาการ์ ($T_{s_{onset}}$), อุณหภูมิที่มีการเกิดเจลของอาการ์มากที่สุด (T_s) และอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเกิดเจล ($T_{s_{end}}$) และค่าเอนทาลปี (ΔH) ของการเกิดเจลของอาการ์ ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

3.2.2.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

นำตัวอย่างวุ้นกะทิที่ทำการทดแทนน้ำตาลทรายด้วยสารให้ความหวานมาทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนา (Generic descriptive analysis) เปรียบเทียบกับวุ้นกะทิสูตรต้นแบบ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 5-6 คน ช่วงอายุ 21-30 ปีที่อาศัยอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครปฐม มีสุขภาพโดยรวมปกติและไม่มีประวัติการแพ้อาหาร ประเมินผลการรับรู้รสชาติของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบของรสชาติแต่ละสูตรที่นำมาศึกษา (แบบทดสอบแสดงอยู่ในภาคผนวก ข) โดยให้ผู้ทดสอบกรอกแบบทดสอบคุณภาพด้านประสาทสัมผัสด้วยตนเองซึ่งจะไม่มีกรอกข้อมูลที่สามารถระบุตัวตนของผู้ทดสอบชิมได้

การทดสอบทางประสาทสัมผัสในงานวิจัยนี้ได้รับการตรวจสอบและผ่านการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (หมายเลขใบรับรอง COE 65.0120-018) และได้รับความยินยอมจากผู้เข้าร่วมทดสอบชิมทั้งหมด

3.2.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

นำตัวอย่างวุ้นกะทิมารวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope) (FEI Quanta 450, Netherlands) โดยใช้ตัวอย่างที่เตรียมจากแม่พิมพ์ซิลิโคนสี่เหลี่ยม นำมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 วัน เพื่อกำจัดน้ำตาลทรายหรือสารให้ความหวาน จากนั้นทำชิ้นตัวอย่างให้แห้งถึงจุดวิกฤตอย่างสมบูรณ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) (Telstar LyoQuest, Spain) และตัดชิ้นตัวอย่างเพื่อให้เห็นโครงสร้างภายในที่ชัดเจน เคลือบชิ้นตัวอย่างด้วยทอง (sputter coater) (Quorum SC7620, UK) โดยจ่ายกระแส 15 mA เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้หน้าไฟฟ้าก่อนนำไปเข้าเครื่อง จากนั้นสังเกตโครงสร้างในระดับจุลภาคของตัวอย่างด้วยโหมด High vacuum

3.2.2.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารให้ความหวานชนิดเดียวกันแต่ใช้อัตราส่วนการทดแทนในระดับที่แตกต่างกัน และใช้แผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) วิเคราะห์ ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารให้ความหวานต่างชนิดกันแต่ใช้อัตราส่วนการทดแทนในระดับเดียวกัน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL., USA) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล และวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) ของตัวแปรด้วย

โปรแกรมสำเร็จรูป XLSTAT เวอร์ชัน 2021 (Addinsoft, New York, USA) เพื่อใช้ในการพิจารณา
คัดเลือกอัตราส่วนของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่เหมาะสมแต่ละชนิด



บทที่ 4

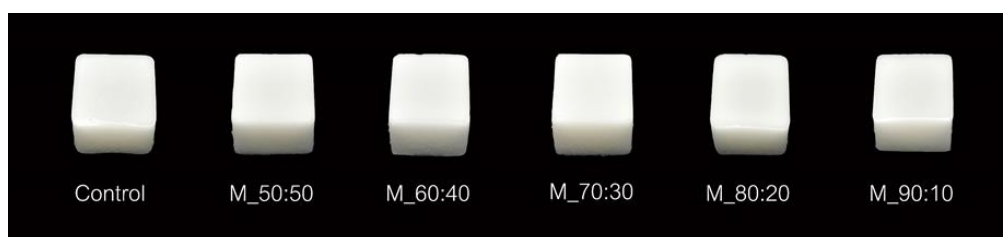
ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อลักษณะทางกายภาพของวุ้นกะทิ

เมื่อทำการผลิตวุ้นกะทิสูตรควบคุมและสูตรที่มีการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลโดยใช้สารให้ความหวานผสมระหว่างสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดมาศึกษา ได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ กับสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ สตีวียอลไกลโคไซด์ ชนิดรีบาดีโอไซด์ เอ จะได้วุ้นกะทิที่มีลักษณะปรากฏในภาพที่ 7 ถึง 9 การทดแทนน้ำตาลด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลพบว่า การใช้มอลทิทอลและซอร์บิทอล ให้ลักษณะปรากฏภายนอกของวุ้นกะทิที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุมหรือ Control คือ ลักษณะของผิวหน้าและความชุ่มชื้นของผลิตภัณฑ์ แต่มีความแตกต่างด้านสีเล็กน้อย ทำให้สีที่ได้แตกต่างจากสูตรควบคุม ส่วนการใช้ไอโซมอลต์นั้นพบว่า มีเพียง 1 อัตราส่วนการทดแทนที่มีลักษณะปรากฏภายนอกใกล้เคียงกับสูตรควบคุมคือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการทดแทนด้วยไอโซมอลต์ในระดับอื่นได้แก่ 60:40 70:30 80:20 และ 90:10 ตามลำดับ ส่งผลให้ลักษณะปรากฏภายนอกของวุ้นกะทิที่ได้มีผลึกน้ำตาลเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ความชุ่มชื้นของวุ้นกะทิลดลงและอาจทำให้เนื้อสัมผัสที่ได้แตกต่างจากสูตรควบคุมและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเพราะ วุ้นกะทิสูตรควบคุมทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดต้องไม่มีผลึกน้ำตาลอยู่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สีที่ปรากฏมีความแตกต่างจากสูตรควบคุมมาก ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระดับการทดแทนด้วยไอโซมอลต์ สีที่ได้นั้นจะมีความเงาและกลบสีของกะทิที่ใช้เป็นส่วนผสมจากการแทรกตัวของผลึกน้ำตาลที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ลักษณะการเกิดเจลในวุ้นกะทิขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของผงวุ้นอาหาร ชนิดและปริมาณของตัวทำละลายที่ใช้ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครงตาข่ายเจล (Nishinari และคณะ, 1994; Watase และคณะ, 1990) และจากงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณของตัวทำละลายจากการเปรียบเทียบระดับความหวานด้วยค่า relative sweetness ของสารให้ความหวานแต่ละชนิดให้มีความหวานเท่ากับน้ำตาลที่ใช้ในสูตรควบคุม จึงทำให้สารให้ความหวานที่มีระดับความหวานต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้คือ ไอโซมอลต์ ต้องใช้ปริมาณที่มากกว่าสารให้ความหวานชนิดอื่นจึงส่งผลให้วุ้นกะทิที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน

การเกิดผลึกบนผิวหน้าของวุ้นกะทิที่ใช้ไอโซมอลต์ทดแทนน้ำตาลในอัตราส่วนการทดแทนที่มากกว่า 50:50 อาจเกิดจากการที่มีปริมาณน้ำในส่วนผสมไม่เพียงพอในกลไกการเกิดเจลของวุ้นที่มี

การห่อหุ้มน้ำไว้ภายในโครงสร้าง เพราะไอโซมอลต์มีระดับความหวานที่ต่ำสุดเมื่อเทียบกับสารให้ความหวานชนิดอื่น จึงจำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก น้ำที่ใสในสูตรจึงถูกปรับให้ลดลง เพื่อให้มวลรวมของสูตรมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้ไอโซมอลต์ละลายและกระจายตัวได้น้อยในโครงสร้างร่างแห จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกผลึกเมื่อมีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (Evrendilek, 2012)



ภาพที่ 7 ลักษณะปรากฏของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนมอลทิทอลต่อรีบาวดีโอไซด์ เอ ทดแทนน้ำตาล



ภาพที่ 8 ลักษณะปรากฏของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนซอร์บิทอลต่อรีบาวดีโอไซด์ เอ ทดแทนน้ำตาล



ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนไอโซมอลต์ต่อรีบาวดีโอไซด์ เอ ทดแทนน้ำตาล

4.1.1 ค่าสี

เมื่อวิเคราะห์ค่าสีของวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ กับสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ รีบาวติโอไซด์ เอ ในอัตราส่วนแตกต่างกันเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส ได้ผลดังตารางที่ 12 ถึง 16

ตารางที่ 12 ค่า L* ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:รีบาวติโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:รีบาวติโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:รีบาวติโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	78.85±0.81 ^d	78.85±0.81 ^b	78.85±0.81 ^a
50:50	83.49±0.42 ^{aA}	80.14±0.46 ^{aB}	75.32±0.17 ^{bC}
60:40	81.26±0.54 ^{bA}	77.80±0.30 ^{cB}	68.33±0.78 ^{cC}
70:30	80.18±0.60 ^{cA}	75.41±0.71 ^{dB}	60.14±0.64 ^{dC}
80:20	78.10±0.62 ^{eA}	74.81±0.88 ^{dB}	50.87±0.61 ^{eC}
90:10	76.12±0.46 ^{fA}	68.99±0.83 ^{eB}	42.46±0.98 ^{fC}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง (p<0.05) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน (p<0.05) และค่าหลังเครื่องหมาย ± หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

วุ้นกะทิที่ผลิตในงานวิจัยนี้ไม่มีการเติมสีผสมอาหารในผลิตภัณฑ์จึงมีสีขาว ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่า L* และค่า WI ซึ่งเป็นค่าดัชนีความขาว จากตารางที่ 12 แสดงค่า L* ที่สามารถบอกค่าความสว่างของสีซึ่งมีค่า 0-100 โดยค่า 0 แสดงถึงสีดำ และ 100 แสดงถึงสีขาว เมื่อค่า L* มีค่ามากแสดงว่าสีของตัวอย่างที่วัดมีความสว่างมากพบว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลผสมกับสารให้ความหวานยิ่งยวดที่อัตราส่วนการทดแทนระดับต่างๆ ทำให้ค่า L* มีความแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และหากมีการเพิ่มอัตราส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ มอลทิทอล ซอร์บิทอลและไอโซมอลต์ พบว่า ค่า L* มีค่าลดลงตามระดับการเพิ่มขึ้นของการทดแทนน้ำตาล ทั้งนี้เนื่องจาก การเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายส่งผลต่อค่าดัชนีการกระเจิงแสง ทำให้การกระเจิงแสงน้อยลง (Carpenter และ Deitz, 1962) ค่า L* หรือความสว่างที่วิเคราะห์ได้จึงลดลง

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า วุ้นกะทิที่มีการทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์นั้นมีค่า L* ที่ต่ำที่สุดโดยมีค่าต่ำกว่ามอลทิทอลและซอร์บิทอลในทุกๆระดับของอัตราส่วนการทดแทนอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) เนื่องจาก ส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลแต่ละ

ชนิดนั้นมีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันจึงมีสมบัติการดูดกลืนหรือหักเหของแสงที่แตกต่างกัน (Bodurov และคณะ, 2017)

ตารางที่ 13 ค่า a^* ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวดีโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวดีโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวดีโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	-0.75±0.03 ^c	-0.75±0.03 ^b	-0.75±0.03 ^a
50:50	-0.57±0.07 ^{aA}	-0.69±0.05 ^{aB}	-0.85±0.06 ^{bC}
60:40	-0.64±0.05 ^{bA}	-0.75±0.07 ^{bB}	-1.07±0.04 ^{cC}
70:30	-0.68±0.03 ^{bA}	-0.83±0.04 ^{cB}	-1.50±0.08 ^{dC}
80:20	-0.74±0.02 ^{cA}	-0.84±0.06 ^{cB}	-1.69±0.10 ^{eC}
90:10	-0.77±0.07 ^{cA}	-1.06±0.04 ^{dB}	-1.70±0.08 ^{eC}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p<0.05$) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน ($p<0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่า a^* นั้นแสดงถึงค่าสีแดง-เขียว โดยถ้ามีค่ามากหรือมีค่าเป็นบวกจะแสดงความเป็นสีแดงมาก แต่ถ้ามีค่าน้อยหรือมีค่าติดลบจะแสดงความเป็นสีเขียวมาก จากตารางที่ 13 พบว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่เพิ่มอัตราส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลหรือน้ำตาลแอลกอฮอล์ได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ มีแนวโน้มทำให้ค่า a^* ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับวุ้นกะทิสสูตรควบคุมพบว่า วุ้นกะทิสสูตรที่ใช้มอลทิทอลในอัตราส่วนการทดแทน 80:20 และ 90:10 ตามลำดับ รวมถึงสูตรที่ใช้ซอร์บิทอลในอัตราส่วนการทดแทน 60:40 นั้นไม่แตกต่างกับสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระดับของสารให้ความหวานที่ให้มวลทำให้วุ้นกะทิมีความเป็นสีเขียวเพิ่มขึ้น แต่มีความเป็นสีแดงลดลง

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์จะให้ค่า a^* ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสารให้ความหวานชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนสูงสุดคือ ที่อัตราส่วนการทดแทนน้ำตาล 90:10 การใช้ไอโซมอลต์จะทำให้ค่า a^* มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับค่า a^* ของสูตรควบคุม ในขณะที่การใช้มอลทิทอลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

ตารางที่ 14 ค่า b* ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทน สารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวติโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	2.68±0.27 ^{ab}	2.68±0.27 ^a	2.68±0.27 ^a
50:50	2.29±0.18 ^{bA}	2.24±0.18 ^{bA}	2.43±0.44 ^{aA}
60:40	2.51±0.35 ^{abA}	2.21±0.12 ^{bcA}	2.10±0.80 ^{aA}
70:30	2.60±0.37 ^{abA}	2.32±0.37 ^{abA}	-0.10±0.08 ^{bB}
80:20	2.48±0.27 ^{abA}	2.00±0.31 ^{bcA}	-0.56±0.71 ^{bB}
90:10	2.73±0.73 ^{aA}	1.82±0.79 ^{cB}	-1.97±0.94 ^{cC}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง (p<0.05) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน (p<0.05) และค่าหลังเครื่องหมาย ± หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่า b* นั้นแสดงถึงค่าสีเหลือง-น้ำเงิน โดยถ้ามีค่ามากหรือมีค่าเป็นบวกจะแสดงว่าความเป็นสีเหลืองมาก แต่ถ้ามีค่าน้อยหรือมีค่าติดลบจะแสดงว่าความเป็นสีน้ำเงินมาก จากตารางที่ 14 พบว่าการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลทำให้มีค่า b* เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการทดแทนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การทดแทนน้ำตาลด้วยซอร์บิทอลและไอโซมอลต์ที่อัตราส่วนการทดแทนที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ค่า b* มีแนวโน้มลดลง

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์ที่อัตราส่วนการทดแทนสูงสุดคือ 90:10 ให้ค่า b* ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเรียงลำดับค่า b* จากน้อยไปมากคือ ไอโซมอลต์ ซอร์บิทอลและมอลทิทอล แสดงว่าไอโซมอลต์นั้นทำให้วุ้นกะทิมีความเป็นสีน้ำเงินมาก ส่วนมอลทิทอลทำให้วุ้นกะทิมีความเป็นสีเหลืองมาก

ตารางที่ 15 ค่าดัชนีความขาว (whiteness index) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวดีไอโซต์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวดีไอโซต์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวดีไอโซต์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	78.66±0.80 ^d	78.66±0.80 ^b	78.66±0.80 ^a
50:50	83.32±0.39 ^{aA}	80.00±0.47 ^{aB}	75.19±0.20 ^{bC}
60:40	81.08±0.53 ^{bA}	77.67±0.29 ^{cB}	68.23±0.82 ^{cC}
70:30	79.99±0.63 ^{cA}	75.29±0.74 ^{dB}	60.11±0.64 ^{dC}
80:20	77.95±0.64 ^{eA}	74.72±0.88 ^{dB}	50.83±0.61 ^{eC}
90:10	75.94±0.53 ^{fA}	68.91±0.84 ^{eB}	42.39±0.96 ^{fC}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p < 0.05$) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน ($p < 0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย ± หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ค่าดัชนีความขาว (whiteness index) สามารถคำนวณจากค่า L^* และ b^* แสดงถึงความขาวของตัวอย่าง ถ้ามีค่ามากแสดงว่าตัวอย่างมีความขาวมาก จากตารางที่ 15 พบว่า การทดแทนน้ำตาลที่อัตราส่วนการทดแทนระดับต่างๆ ทำให้ค่าดัชนีความขาวมีความแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และหากมีการเพิ่มอัตราส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ มอลทิทอล ซอร์บิทอลและไอโซมอลต์ พบว่า ค่าดัชนีความขาวมีค่าลดลงตามระดับการเพิ่มขึ้นของการทดแทนน้ำตาลซึ่งสอดคล้องกับค่า L^* เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่าการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลให้ค่าดัชนีความขาวสูงสุดเมื่อเทียบกับการทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานชนิดอื่น รองลงมาคือ ซอร์บิทอลและไอโซมอลต์ ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ดังนั้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสีจากตารางที่ 12 ถึง 15 แสดงให้เห็นว่า สารให้ความหวานที่ให้มวลมีผลกระทบต่อค่าสีมากกว่าสารให้ความหวานยิ่งยวด เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า (344.31, 182.17 และ 344.31 g/mol สำหรับมอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับริบาวดีไอโซต์ เอ ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 967.01 g/mol (Embuscado, 2006; Prakash และ Chaturvedula, 2018) หมายความว่า หากใช้สารในปริมาณเท่ากัน ยิ่งสารมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้มีจำนวนโมเลกุลในระบบมากขึ้นเท่านั้นจึงทำให้การใช้สารให้ความหวานที่ให้มวลในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลกระทบบต่อโมเลกุลในระบบมากกว่าสารให้ความหวานยิ่งยวด

ตารางที่ 16 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวดีไอโซต์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวดีไอโซต์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวดีไอโซต์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	-	-	-
50:50	4.67±0.41 ^{aA}	1.37±0.49 ^{cC}	3.56±0.16 ^{eB}
60:40	2.44±0.55 ^{bB}	1.16±0.31 ^{cC}	10.57±0.77 ^{dA}
70:30	1.39±0.57 ^{cC}	3.48±0.68 ^{bB}	18.93±0.64 ^{cA}
80:20	0.92±0.43 ^{dC}	4.10±0.87 ^{bB}	28.19±0.57 ^{bA}
90:10	2.81±0.46 ^{bC}	9.93±0.85 ^{aB}	36.71±0.88 ^{aA}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p < 0.05$) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน ($p < 0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

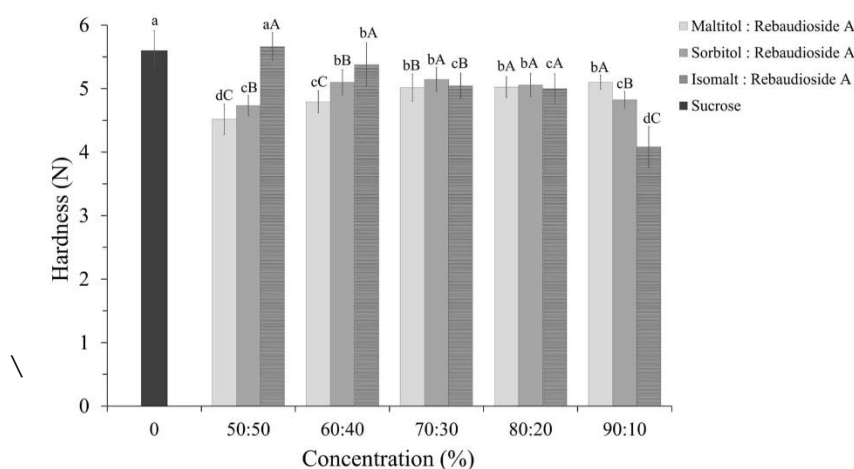
เมื่อวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) เทียบกับสูตรควบคุม จากตารางที่ 16 พบว่าอัตราส่วนการทดแทนของการเพิ่มสารให้ความหวานที่ให้มวลแต่ละชนิดที่มีค่า ΔE^* น้อยสุดได้แก่ มอลทิทอลที่อัตราส่วนการทดแทน 80:20 ซอร์บิทอลที่อัตราส่วนการทดแทน 60:40 และไอโซมอลต์ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 และเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า การใช้ไอโซมอลต์ในการทดแทนน้ำตาลมีแนวโน้มของค่า ΔE^* มากที่สุดแสดงว่า มีการเปลี่ยนแปลงของสีมากที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม

4.1.2 ค่าลักษณะเนื้อสัมผัส

เมื่อวิเคราะห์ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ กับสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ รีบาดีโอไซด์ เอ ในอัตราส่วนแตกต่างกันเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส

4.1.2.1 ค่าความแข็งของเจล (Hardness; N)

ค่าความแข็ง (Hardness) ถือเป็นการบ่งบอกถึงแรงที่กระทำต่ออาหารทำให้อาหารแตกหรือแยกออก ในการวัดค่าโดยใช้ประสาทสัมผัส คิดเป็นแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างในระหว่างฟังก์ชันการบีบที่เป็นของแข็ง และในระหว่างลิ้นและเพดานปากในการบีบที่เป็นกึ่งของแข็ง (จินตนา อุบัติสสกุล, 2540) จึงนำมาใช้ในการทดสอบเพื่อวัดความแข็งของเจลในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ โดยหากมีค่ามากแสดงว่า เจลนั้นมีความแข็งมาก



ภาพที่ 10 ค่าความแข็งของเจล (Hardness) (N) ของวุ้นกะทิ

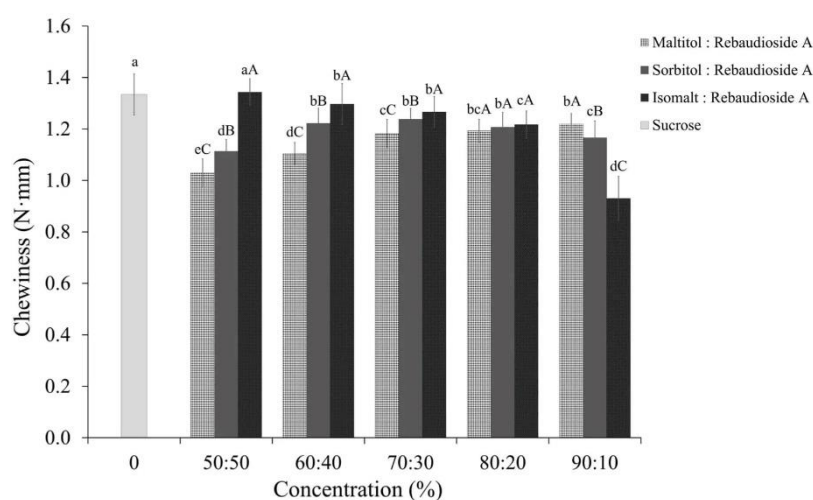
จากภาพที่ 10 พบว่า การทดแทนน้ำตาลที่อัตราส่วนการทดแทนระดับต่างๆ ด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ มอลทิทอล ซอร์บิทอลและไอโซมอลต์ ให้แนวโน้มค่าความแข็งของเจลที่แตกต่างกัน โดยการใช่มอลทิทอลทำให้ค่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้นและมีค่าแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อใช้ซอร์บิทอลพบว่า ค่าความแข็งของเจลมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มมีค่าลดลงที่อัตราส่วนการทดแทน 80:20 โดยทุกอัตราส่วนการทดแทนนั้นมีค่าแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และเมื่อใช้ไอโซมอลต์พบว่า ค่าความแข็งของเจล

ที่ได้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มีค่าไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

การก่อตัวของเจลอาหารนั้นถูกกำหนดด้วยพันธะไฮโดรเจนเท่านั้นซึ่งมีส่วนในการก่อตัวของเกลียวเดี่ยว (single helices) และเกลียวคู่ (double helices) โดยเกลียวเหล่านี้เกิดความเสถียรได้จากการเก็บกักโมเลกุลของน้ำไว้ในโพรงหรือช่องว่างบริเวณเกลียวคู่และกลุ่มของไฮดรอกซิลที่อยู่ภายนอกกระบวน (external hydroxyl groups) ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดยึดเชื่อมต่อของสะพานไฮโดรเจน (hydrogen bridges) ที่ถูกสร้างขึ้น (Armisen และ Gaiatas, 2009; Dorohovich และคณะ, 2018) ทั้งนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงข่ายเจลอาหารคือ ชนิดและความเข้มข้นของน้ำตาล น้ำหนักของโมเลกุล และความสามารถในการจับน้ำได้ (Dorohovich และคณะ, 2018; Kohyama และคณะ, 2016; Russ และคณะ, 2014) เนื่องจากในระหว่างการเกิดเจลของอาหาร จำเป็นต้องมีน้ำอิสระ (free-unbound water) ที่มีปริมาณที่เพียงพอ โดยสามารถนำไปใช้ในการเกิดเจลที่มีความแข็งแรงและโครงสร้างที่เหมาะสม (Kronberga และคณะ, 2011) ซึ่งงานวิจัยการทดแทนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทินี้ใช้ปริมาณของตัวทำละลายจากการเปรียบเทียบระดับความหวานด้วยค่า relative sweetness ของสารให้ความหวานแต่ละชนิดให้มีความหวานเท่ากับน้ำตาลซูโครสที่ใช้ในสูตรควบคุม จึงทำให้สารให้ความหวานที่มีระดับความหวานต่ำที่สุดคือ ไอโซมอลต์ ต้องใช้ปริมาณที่มากกว่าสารให้ความหวานชนิดอื่น ส่งผลให้อัตราส่วนการทดแทนที่เพิ่มขึ้นของสูตรที่ใช้ไอโซมอลต์และสูตรที่ใช้ซอร์บิทอลที่อัตราส่วนการทดแทนมากกว่า 70:30 มีค่าความแข็งแรงของเจลลดลงเพราะ การมีตัวถูกละลายในปริมาณมาก ทำให้เกิดการเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำมาก ส่งผลให้เกิดความเหนียวหนืดจนเกินไปและมีปริมาณน้ำอิสระที่ไม่เพียงพอต่อการเกิดเจลของอาหาร ดังนั้น การจับตัวกันระหว่างสายโซ่จึงเป็นไปได้ยากและนำไปสู่ความไม่เสถียรของเครือข่ายเจลอาหาร เจลที่ได้จึงมีความแข็งแรงของเจลลดลง สมมติฐานเหล่านี้เกี่ยวกับการรักษาเสถียรภาพของเจลอาหารที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Deszczynski และคณะ, 2003; Normand และคณะ, 2003; Watase และคณะ, 1990) และการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลพบว่า ทำให้เกิดการยับยั้งปฏิสัมพันธ์ของหมู่ไฮดรอกซิลในอาหารกับน้ำจึงเป็นเหตุให้ไปยับยั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของอาหาร ซึ่งมีผลมาจากปริมาณน้ำอิสระที่ลดลง (Nishinari และ Watase, 1987; Watase และคณะ, 1990) จึงทำให้การเกิดเจลของอาหารเกิดพันธะไฮโดรเจนลดลง เพราะ สารให้ความหวานมีโมเลกุลที่เล็กและมีความสามารถในการจับน้ำได้ดีกว่าน้ำตาลซูโครส ดังนั้น วุ้นกะทิที่ทำการทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานจึงมีความแข็งแรงของเจลที่น้อยกว่าวุ้นกะทิสูตรควบคุม แต่กรณีการเติมไอโซมอลต์ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มีค่าความแข็งแรงของเจลไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า การทดแทนน้ำตาลที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 และ 60:40 นั้น การใช้ไอโซมอลต์จะทำให้ฟันกะทิมีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือ ซอร์บิทอลและมอลทิทอล ตามลำดับ ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับชนิดและปริมาณสารให้ความหวาน โดยสารให้ความหวานที่ให้มวล หากเรียงระดับความหวานจากน้อยไปมากคือ ไอโซมอลต์ ซอร์บิทอลและมอลทิทอล ตามลำดับจึงทำให้ต้องใช้ไอโซมอลต์ในปริมาณมากที่สุด

4.1.2.2 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร (Chewiness; N·mm)



ภาพที่ 11 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร (Chewiness) (N·mm) ของฟันกะทิ

ค่า Chewiness แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหารแข็งจนถึงขั้นที่พร้อมที่จะกลืน ในการวัดค่าโดยใช้ประสาทสัมผัส หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการเคี้ยวตัวอย่างด้วยอัตราคงที่ แรงคงที่ จนกระทั่งสามารถกลืนอาหารนั้นได้ โดยหากมีค่ามากแสดงว่า ใช้พลังงานในการเคี้ยวมาก (จินตนา อุบัติสสกุล, 2540) จากภาพที่ 11 พบว่า เมื่อมีการทดแทนน้ำตาลด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการทดแทนมอลทิทอลทำให้ค่า Chewiness เพิ่มขึ้นและมีค่าแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้ซอร์บิทอลพบว่า ค่า Chewiness มีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มมีค่าลดลงที่อัตราส่วนการทดแทน 80:20 โดยทุกอัตราส่วนการทดแทนนั้นมีค่าแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญและเมื่อใช้ไอโซมอลต์พบว่า ค่า Chewiness ที่ได้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มีค่าไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนการทดแทนนี้ใช้พลังงานในการเคี้ยวใกล้เคียงกับสูตรควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบการใช้สารให้ความหวานต่างชนิดกันทดแทนน้ำตาลในระดับเดียวกันพบว่า การทดแทนน้ำตาลที่อัตราส่วน 50:50 60:40 และ 70:30 ตามลำดับนั้น การใช้ไอโซมอลต์จะทำให้ฟันกะทิมีค่า Chewiness มากที่สุด รองลงมาคือ ซอร์บิทอลและมอลทิทอล ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร

คือ ค่าความแข็งของเจลและค่า Chewiness ด้วยวิธีของเพียร์สัน (Pearson Correlation) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ฉ.1 พบว่า ค่าสหสัมพันธ์หรือ r มีค่าเท่ากับ 0.975 และมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.01 แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน เนื่องจาก ค่า Chewiness ของการกัดตัววุ้นกะทิมีแนวโน้มเหมือนกับค่าความแข็งของเจลเพราะ ถ้าตัวอย่างมีความแข็งมากแสดงว่าต้องใช้แรงในการกัดหรือพลังงานในการเคี้ยวมากเช่นกัน

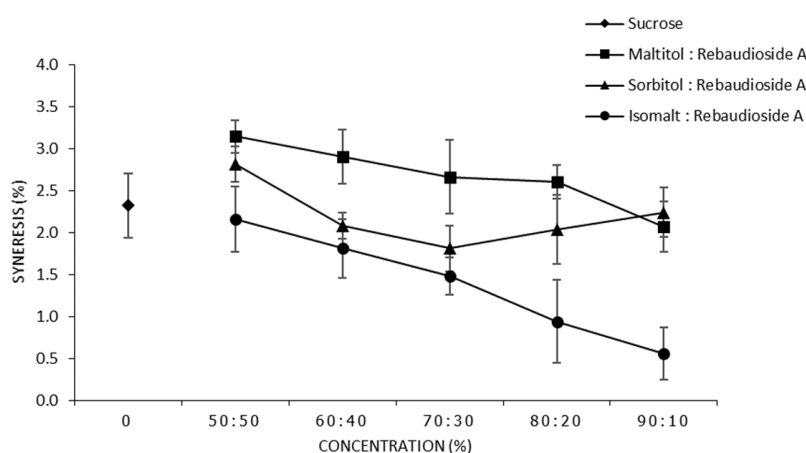
4.1.3 ค่าการแยกตัวของน้ำ

เมื่อวิเคราะห์ค่าการแยกตัวของน้ำของวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ กับสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ รีบาดีโอไซด์ เอ ในอัตราส่วนแตกต่างกันเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส

การแยกตัวของน้ำ (Syneresis) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการรวมตัวกันของสายโมเลกุลพอลิเมอร์จึงทำให้เกิดการหดตัวของโครงตาข่ายพอลิเมอร์ส่งผลให้ช่องว่างที่สามารถอุ้มน้ำได้นั้นมีขนาดลดลง (Armisen และ Gaiatas, 2009) ดังนั้น เมื่อเกิดการหดตัวของโครงสร้างเจลทำให้เกิดการขับน้ำออกมาจากโครงสร้างของเจล (Saartrat และคณะ, 2005) โดยสามารถวิเคราะห์ค่าการแยกตัวของน้ำ เพื่อวัดปริมาณน้ำที่แยกออกมาจากเจลตัวอย่างหลังจากมีการเก็บเจลไว้ระยะเวลาหนึ่งและสามารถใช้เป็นหนึ่งในดัชนีที่บ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะของระบบเจลได้ (Toncheva และคณะ, 1994) จากการศึกษาผลของสารให้ความหวานของวุ้นกะทิดังแสดงในภาพที่ 12 พบว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราทดแทนมอลทิทอลและไอโซมอลต์มีแนวโน้มทำให้ค่าการแยกตัวของน้ำลดลง ส่วนการทดแทนน้ำตาลด้วยการเพิ่มขึ้นของซอร์บิทอลพบว่า ค่าการแยกตัวของน้ำมีค่าลดลงแต่ที่อัตราทดแทนมากกว่า 70:30 พบว่า ค่าการแยกตัวของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมพบว่า การใช้มอลทิทอลและซอร์บิทอลนั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่อัตราทดแทนด้วยไอโซมอลต์ 50:50 มีค่าไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า การใช้ไอโซมอลต์จะทำให้วุ้นกะทิมีค่าการแยกตัวของน้ำต่ำที่สุด รองลงมาคือ ซอร์บิทอลและมอลทิทอล ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสัดส่วนของสารให้ความหวานผสม 2 ชนิดมีสมบัติของการจับน้ำอิสระที่ต่างกัน ประกอบกับการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลได้ใช้น้ำในการทดแทนมวลรวมมากกว่าสารให้ความหวานที่ให้มวลชนิดอื่นเพราะ มีระดับความหวานที่มากที่สุดจึงใช้ปริมาณน้อย ทำให้มีปริมาณของน้ำอิสระสูงและเกิดการจับตัวกันเองของโครงตาข่ายของอาคารเพื่อลดช่องว่างภายในโครงสร้างจึงทำให้มีการบีบน้ำที่เป็นส่วนประกอบออกมาจากโครงสร้างเจลจึงมีปริมาณน้ำที่แยกออกมาจากเจลใน

ปริมาณมากกว่าสารให้ความหวานชนิดอื่น ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรคือ ค่าความแข็งของเจลและค่าการแยกตัวของน้ำด้วยวิธีของเพียร์สัน (Pearson Correlation) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ฉ.2 พบว่า ค่าสหสัมพันธ์หรือ r มีค่าเท่ากับ -0.614 และมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.034 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้ามเช่นเดียวกับการศึกษาของ Nagasaka และ Taneya (2000) ที่พบว่า การแยกตัวของน้ำในเจลอาหารมีค่าลดลงเมื่อค่ามอดูลัสของเจลมีค่าสูงขึ้นเนื่องจาก เจลที่มีความแข็งแรงสูงจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ในเจลได้ดีจึงลดการแยกน้ำออกจากเจลได้



ภาพที่ 12 ค่าการแยกน้ำ (Syneresis) (%) ของวุ้นกะทิ

และจากการศึกษาพบว่า มีผลบางส่วนนั้นไม่สอดคล้องกับค่าความแข็งของเจล จึงทำให้ผลส่วนดังกล่าวไม่ได้นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคือ การเพิ่มขึ้นของอัตราการทดแทนที่ใช้ไอโซมอลต์มากกว่า 50:50 เนื่องจาก ปริมาณที่มากขึ้นของตัวทำละลายของไอโซมอลต์นั้น ส่งผลให้วุ้นกะทิที่อัตราส่วนการทดแทนมากกว่า 50:50 เกิดผลึกน้ำตาลขึ้นบริเวณผิวหน้าตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ไอโซมอลต์มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าสารให้ความหวานชนิดอื่น ส่งผลให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย ดังนั้น ค่าการแยกตัวของน้ำจึงลดลงแทนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามผลของค่าความแข็งของเจลเพราะ ผลึกที่เกิดบนผิวหน้าขัดขวางการเคลื่อนที่ของตัวทำละลายจึงส่งผลให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาภายนอกเจลได้แสดงให้เห็นว่า ควรจำกัดการใช้ปริมาณของไอโซมอลต์ไว้ที่ความเข้มข้นต่ำจึงจะเหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ ดังนั้น การรักษาความเสถียรของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิให้เกิดการแยกตัวของน้ำที่น้อยในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารให้ความหวานที่ใช้ในผลิตภัณฑ์เพราะ สารให้ความหวานมีความสามารถในการดูดความชื้นที่แตกต่างกันและความสามารถในการกักเก็บน้ำแปรผันตามองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จึงส่งผลต่อการแยกตัวของน้ำที่ได้ (Farias และคณะ, 2019; Sinthusamran และคณะ, 2018)

4.2 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อลักษณะทางเคมีของวุ้นกะทิ

4.2.1 ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด

เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดของวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ กับสารให้ความหวานที่ยืดคือ ธีบาวดีโอไซด์ เอ ในอัตราส่วนแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส ได้ผลดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด ($^{\circ}$ Brix) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ธีบาวดีโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ธีบาวดีโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ธีบาวดีโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	29.6±0.41 ^b	29.6±0.41 ^d	29.6±0.41 ^f
50:50	19.8±0.40 ^{fC}	24.1±0.35 ^{fB}	33.4±0.28 ^{eA}
60:40	22.9±0.37 ^{eC}	28.1±0.65 ^{eB}	40.2±0.34 ^{dA}
70:30	25.8±0.56 ^{dC}	32.1±0.38 ^{cB}	45.4±0.55 ^{cA}
80:20	29.0±0.37 ^{cC}	35.2±0.69 ^{bB}	50.0±0.54 ^{bA}
90:10	32.1±0.55 ^{aC}	39.9±0.77 ^{aB}	55.4±0.51 ^{aA}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p < 0.05$) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน ($p < 0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 17 แสดงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน พบว่า เมื่อมีการทดแทนน้ำตาลด้วยอัตราส่วนที่มีการเพิ่มสารให้ความหวานที่ให้มวลหรือกลุ่มน้ำตาลแอลกอฮอล์ได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอลและไอโซมอลต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับวุ้นกะทิสสูตรควบคุม พบว่า วุ้นกะทิสสูตรที่มีการใช้สารให้ความหวานทดแทนนั้นมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า วุ้นกะทิที่ทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดสูงที่สุดในทุกระดับการทดแทนอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับวุ้นกะทิที่ทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลและซอร์บิทอล ทั้งนี้เนื่องจาก ในสูตรของวุ้นกะทิที่ใช้ไอโซมอลต์ทดแทนน้ำตาลนั้น ใช้ไอโซมอลต์ปริมาณมากเพื่อปรับ

ส่วนผสมให้ได้ระดับความหวานตามอัตราส่วนการทดแทน เพราะ ไอโซมอลต์ให้ความหวานน้อยมากเพียง 40% เมื่อเทียบกับน้ำตาลซูโครส ในขณะที่กลุ่มน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดอื่นได้แก่ มอลทิทอลให้ความหวาน 80% และซอร์บิทอลให้ความหวาน 60% ตามลำดับจึงทำให้สูตรที่ใช้ไอโซมอลต์ทดแทนที่ระดับความหวานเดียวกันนั้นใช้ปริมาณน้ำในการทดแทนมวลรวมของสูตรน้อยกว่าสูตรอื่น ซึ่งน้ำมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดเป็นศูนย์จึงมีผลต่อความเข้มข้นและส่งผลให้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามระดับการทดแทนน้ำตาล ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณความชื้นที่วิเคราะห์ได้

4.2.2 ปริมาณความชื้น

เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นของวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ กับสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ ริบาวดีโอไซด์ เอ ในอัตราส่วนแตกต่างกันเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส ได้ผลดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ปริมาณความชื้น (%) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวดีโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวดีโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวดีโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	65.44±0.22 ^d	65.44±0.22 ^b	65.44±0.22 ^a
50:50	73.66±0.29 ^{aA}	68.86±0.34 ^{aB}	61.47±0.37 ^{bC}
60:40	70.97±0.21 ^{bA}	65.17±0.61 ^{bB}	55.71±0.39 ^{cC}
70:30	68.14±0.51 ^{cA}	61.42±0.69 ^{cB}	49.90±0.77 ^{dC}
80:20	65.30±0.43 ^{dA}	58.74±0.51 ^{dB}	45.35±0.53 ^{eC}
90:10	62.68±0.48 ^{eA}	54.02±0.76 ^{eB}	40.27±0.52 ^{fC}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p < 0.05$) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน ($p < 0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 18 แสดงค่าปริมาณความชื้นของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน พบว่า ค่าปริมาณความชื้นของวุ้นกะทิที่ทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานสัมพันธ์กับการเพิ่มอัตราส่วนของสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ ได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ โดยค่ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและที่อัตราส่วนการทดแทนสูงสุดคือ 90:10 มีค่าปริมาณความชื้นต่ำที่สุด หากเปรียบเทียบกับวุ้นกะทิสสูตรควบคุมจะพบว่า ที่อัตราส่วนการทดแทนมอลทิทอลต่อริบาวดีโอไซด์ เอ เท่ากับ 80:20 และที่อัตราส่วนการทดแทนซอร์บิทอลต่อ

รีบาดิโอไฮด์ เอ เท่ากับ 60:40 นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) หมายความว่า มีค่าปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุม แต่การใช้ไอโซมอลต์นั้นพบว่า ที่อัตราส่วนการทดแทนทั้ง 5 อัตราส่วนมีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับรุ่นกะทิสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า รุ่นกะทิที่ทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์ในแต่ละระดับการทดแทนมีค่าปริมาณความชื้นต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยการที่รุ่นกะทิสูตรที่ใช้ไอโซมอลต์มีค่าปริมาณความชื้นต่ำกว่าสูตรอื่นอย่างชัดเจนตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นเพราะ ในสูตรมีปริมาณน้ำน้อยกว่าสูตรอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจาก ไอโซมอลต์มีความหวานเพียง 40% ของน้ำตาลซูโครสจึงจำเป็นต้องใช้ในปริมาณและน้ำหนักที่มากกว่าน้ำตาลซูโครสในระดับความหวานที่เท่ากัน ทำให้มวลน้ำโดยรวมในสูตรหายไปมาก ส่งผลให้รุ่นกะทิที่ได้มีค่าปริมาณความชื้นต่ำจากการทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์ ส่วนการทดแทนน้ำตาลในรุ่นกะทิด้วยมอลทิทอลและซอร์บิทอลนั้นไม่ได้ลดค่าปริมาณความชื้นในรุ่นกะทิมากเท่ากับไอโซมอลต์ เนื่องจาก มีความหวานสูงกว่า จึงทำให้มวลน้ำโดยรวมในสูตรหายไปไม่มาก ดังนั้น การใช้ไอโซมอลต์ทดแทนน้ำตาลซูโครสจึงส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณความชื้นของรุ่นกะทิมากที่สุด

4.2.3 ค่าปริมาณน้ำอิสระ

เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระของรุ่นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มีผลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ กับสารให้ความหวานยั้งยวดคือ รีบาดิโอไฮด์ เอ ในอัตราส่วนแตกต่างกันเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมคือ รุ่นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส ได้ผลดังตารางที่ 19

จากตารางที่ 19 แสดงค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของรุ่นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกันซึ่งสามารถใช้ประเมินความคงตัวต่อการเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์และมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารให้ความหวาน โดยสารให้ความหวานที่ให้มีผลในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการจับน้ำได้ดีเนื่องจากมีโมเลกุลที่เล็กจึงทำให้ค่าปริมาณน้ำอิสระลดลงได้ (Evrendilek, 2012) และเมื่อนำมาผสมกับสารให้ความหวานยั้งยวดคือ รีบาดิโอไฮด์ เอ ซึ่งมีมวลโมเลกุลที่ใหญ่กว่าและมีความสามารถในการจับน้ำที่ต่ำจึงทำให้สามารถปรับปริมาณน้ำอิสระให้สูงขึ้นได้ (Mendonça และคณะ, 2017; Nikooie และคณะ, 2015) ดังนั้น พบว่า หากมีการเพิ่มขึ้นของสารให้ความหวานที่ให้มีผลผสมกับการลดลงของสารให้ความหวานยั้งยวดจะทำให้ค่าปริมาณน้ำอิสระมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับรุ่นกะทิสูตรควบคุมพบว่า อัตราส่วนการทดแทนที่ใช้มอลทิทอลนั้นมีอัตราส่วน 2 อัตราส่วนที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) คือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 80:20 และ 90:10 ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนการทดแทนที่ใช้ซอร์บิทอลและไอโซมอลต์นั้นมี

เพียง 1 อัตราส่วนที่มีลักษณะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จากสูตรควบคุมคือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 และแสดงให้เห็นว่า สารให้ความหวานที่ให้มวลมีผลกระทบต่อค่าปริมาณน้ำอิสระมากกว่าสารให้ความหวานที่ยืดหยุ่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า ดังนั้น หากใช้สารในปริมาณเท่ากัน ยิ่งสารมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำจะส่งผลให้จำนวนโมล (ปริมาณที่ใช้/น้ำหนักโมเลกุล) ที่บ่งบอกถึงจำนวนโมเลกุลที่อยู่ภายในระบบมีค่ามาก โมเลกุลที่อยู่ในระบบดังกล่าวจึงเข้าไปจับกับปริมาณน้ำอิสระได้มาก ค่าปริมาณน้ำอิสระที่ได้จึงเปลี่ยนแปลงมาก

ตารางที่ 19 ค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวติโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	0.9767±0.0037 ^c	0.9767±0.0037 ^a	0.9767±0.0037 ^a
50:50	0.9916±0.0053 ^{aA}	0.9757±0.0060 ^{aB}	0.9745±0.0063 ^{aB}
60:40	0.9886±0.0064 ^{abA}	0.9702±0.0068 ^{bB}	0.9644±0.0084 ^{bC}
70:30	0.9857±0.0066 ^{bA}	0.9667±0.0021 ^{bB}	0.9538±0.0094 ^{cC}
80:20	0.9769±0.0084 ^{cA}	0.9581±0.0059 ^{cB}	0.9400±0.0089 ^{dC}
90:10	0.9746±0.0038 ^{cA}	0.9310±0.0076 ^{dB}	0.9171±0.0094 ^{eC}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p < 0.05$) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน ($p < 0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย ± หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ระดับของอัตราส่วนทดแทนเดียวกันพบว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยการใช้มอลทิทอลนั้น ในทุกอัตราส่วนทดแทนให้ผลเช่นเดียวกันคือ มีค่าปริมาณน้ำอิสระที่มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ส่วนการทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์มีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ความสามารถในการลดค่าปริมาณน้ำอิสระเกิดจากผลของสมบัติคอลลิเกทีฟ (colligative properties) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายในเฟสของเหลวของอาหาร (Barbosa-Cánovas และ Vega-Mercado, 1996; Schmidt, 2007) ดังนั้น ในการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอล ทำให้ตัวอย่างมีค่าปริมาณน้ำอิสระสูง แสดงว่า มีปริมาณของน้ำอิสระอยู่เป็นจำนวนมาก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดที่พบว่า มีค่าต่ำ เนื่องจาก ปริมาณของน้ำที่ใช้สำหรับทดแทนมวลมีปริมาณมาก ทำให้มีปริมาณของสารที่ละลายอยู่ในระบบน้อยลงจึงทำให้ค่าความดันไอจากสูตรที่ทำการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลมีค่ามากเมื่อเทียบกับการทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานชนิดอื่นที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน

ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้การทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลนั้นมีค่าปริมาณน้ำอิสระที่สูงกว่าการทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานชนิดอื่น

4.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การรับรู้รสหวานของรุ่นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ ผสมกับสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ รีบาวดิโอไซด์ เอ ในอัตราส่วนการทดแทนแตกต่างกันได้แก่ 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 และ 90:10 (%) ที่ทำให้มีระดับความหวานเทียบเท่ากับตัวอย่างควบคุมคือ รุ่นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส พบว่า

สูตรที่ใช้มอลทิทอลผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ เมื่อบริโภคแล้วให้ความรู้สึกถึงรสหวานเร็วโดยมีลักษณะหวานแหลม มีความหวานน้อยกว่าสูตรควบคุม โดยการเพิ่มอัตราส่วนการทดแทนของมอลทิทอลและลดส่วนของรีบาวดิโอไซด์ เอ พบว่า ทั้ง 5 อัตราส่วนให้ความหวานที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนการทดแทน 80:20 และ 90:10 (%) ให้ความหวานใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ แต่มีรสขมตกค้างที่ปลายลิ้นหรือมี after taste เล็กน้อย

สูตรที่ใช้ซอร์บิทอลผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ พบว่า ลักษณะของความหวานคล้ายกับน้ำตาลซูโครสมากกว่าสูตรอื่น แต่ทั้งรสหวานตกค้างระยะเวลาสั้นกว่าสูตรควบคุม โดยการเพิ่มอัตราส่วนการทดแทนของซอร์บิทอลและลดส่วนของรีบาวดิโอไซด์ เอ ทั้ง 5 อัตราส่วนพบว่า ให้ความหวานเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการทดแทน ทำให้ที่อัตราส่วนการทดแทน 90:10 (%) ให้ความหวานมากที่สุด แต่ยังคงมีความหวานใกล้เคียงกับสูตรควบคุมและมีรสขมตกค้างที่ปลายลิ้นหรือมี after taste เล็กน้อย เช่นเดียวกับสูตรที่ใช้มอลทิทอล

และสูตรที่ใช้ไอโซมอลต์ผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ พบว่า เมื่อบริโภคทั้ง 5 อัตราส่วนการทดแทน ไม่มีรสขมตกค้างที่ปลายลิ้นหรือไม่มี after taste แสดงให้เห็นว่า มีความแตกต่างจากสูตรที่ใช้มอลทิทอลและซอร์บิทอลอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Embuscado (2006) ที่พบว่า ไอโซมอลต์ไม่มีรสตกค้างในปากและหลังรับประทานไม่มีความรู้สึกเย็น (cooling effect) โดยการเพิ่มอัตราส่วนการทดแทนของไอโซมอลต์และลดส่วนของรีบาวดิโอไซด์ เอ พบว่า ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 และ 60:40 (%) ให้ลักษณะความหวานใกล้เคียงกับสูตรควบคุม แต่ที่อัตราส่วนการทดแทน 70:30 (%) ขึ้นไปนั้นมีลักษณะหวานแหลมและพบว่า มีลักษณะความหวานมากกว่าสูตรควบคุม

ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะมีความรู้สึกถึงรสหวานเท่ากัน แต่ก็ยังมีความแตกต่างจากรสหวานของน้ำตาลซูโครสที่เป็นสารให้ความหวานมาตรฐานที่ใช้กัน ในอาหารทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจาก ความสามารถในการปลดปล่อยรสชาติหรือการรับรู้ถึงความหวานและลักษณะทางประสาทสัมผัสอาจแตกต่างกันไป

ขึ้นอยู่กับชนิดของสารให้ความหวานและพบว่า ลักษณะของเนื้อสัมผัสของอาหารที่แตกต่างกัน มีผลต่อกระบวนการบดเคี้ยว (Mastication) จึงอาจส่งผลต่อการปลดปล่อยสารแต่งรสของผลิตภัณฑ์ (Medeiros และคณะ, 2022) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Boland และคณะ (2006) ที่พบว่า เจลที่มีความแข็งแรงสูงหรือคงตัวได้นานมีอัตราการปล่อยกลิ่นรสที่ต่ำกว่าเจลที่มีความแข็งแรงต่ำหรือมีความนิ่มกว่า ลักษณะของเนื้อสัมผัสจึงส่งผลกระทบต่อ การสลายตัวของเจลและการรับรู้รสชาติในผลิตภัณฑ์

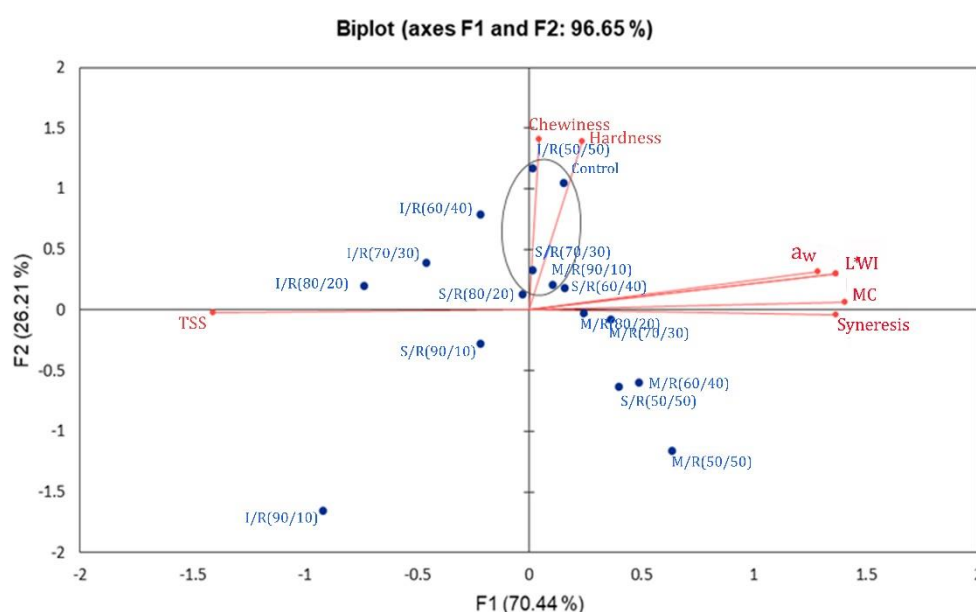
4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA)

เมื่อพิจารณาผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ มาจัดกลุ่มตัวแปรด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) ซึ่งมีค่า Eigenvalue เท่ากับหรือไม่ต่ำกว่า 1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานที่ให้มวลคือ น้ำตาลแอลกอฮอล์ 3 ชนิดได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ ผสมกับสารให้ความหวานที่ยาวคือ รีบาดีโอไซด์ เอ ในอัตราส่วนแตกต่างกันได้แก่ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 60:40 70:30 80:20 และ 90:10 (%) ตามลำดับ เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส สามารถจัดกลุ่มของข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างวุ้นกะทิได้ 2 องค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนในชุดข้อมูลทั้งหมดได้ 96.65% ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งองค์ประกอบหลักที่ 1 (PC1) 70.44% ประกอบด้วย ค่าสี L^* ค่าดัชนีความขาว (WI) การแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid) ปริมาณความชื้น (Moisture content) และปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ส่วนองค์ประกอบหลักที่ 2 (PC2) 26.21% ประกอบด้วย ค่าความแข็งของเจล (Hardness) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร (Chewiness) ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่า Factor loadings ของแต่ละองค์ประกอบดัชนีชี้วัดคุณภาพ

Parameter	PC1	PC2
L^*	0.966	0.213
WI	0.966	0.214
Hardness	0.165	0.982
Chewiness	0.032	0.995
Syneresis	0.965	-0.026
Total Soluble Solid (TSS)	-0.995	-0.014
Moisture content (MC)	0.996	0.043
Water activity (a_w)	0.909	0.220

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) พบว่า การใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลแต่ละชนิดของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิให้ลักษณะที่แตกต่างกัน โดยค่าสี L^* ค่าดัชนีความขาว (WI) การแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ปริมาณความชื้น (Moisture content) และปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) มีความสัมพันธ์ในทางบวกคือ มีทิศทางเดียวกัน เนื่องจาก ค่าการวิเคราะห์ที่ได้มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid) ค่าการวิเคราะห์ที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีด้านอื่นๆ ในทางลบ เนื่องจาก มีทิศทางตรงกันข้าม



ภาพที่ 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis) ของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ
หมายเหตุ : ตัวอักษร M คือ มอลทิทอล, S คือ ซอร์บิทอล, I คือ ไอโซมอลต์และ R คือ รีบาวดิโอไซด์ เอ

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการทดแทนที่เหมาะสมในแต่ละชนิดของสารให้ความหวานที่ให้มวลผสมสารให้ความหวานยิ่งยวด เทียบกับสูตรควบคุม (Control) พบว่า มอลทิทอลผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 90:10 ซอร์บิทอลผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 70:30 และไอโซมอลต์ผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มีค่าสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุด ดังนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิสูตรที่เหมาะสมทั้ง 3 สูตรนี้ไปศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและโครงสร้างระดับจุลภาคเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมต่อไป

4.5 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติเชิงความร้อนของวุ้นกะทิ

การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของวุ้นกะทิ ได้นำอัตราส่วนการทดแทนที่เหมาะสมในแต่ละชนิดของสารให้ความหวานที่ให้มวลผสมสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ รีบาวดิโอไซด์ เอ ที่ผ่านการคัดเลือกด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ทั้งหมด 3 สูตรได้แก่ มอลทิทอลที่อัตราส่วนการทดแทน 90:10 ซอร์บิทอลที่อัตราส่วนการทดแทน 70:30 และไอโซมอลต์ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสูตรควบคุมคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 21 และ 22

4.5.1 อุณหภูมิของการหลอมเหลวในวุ้นกะทิ

ตารางที่ 21 อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวของอาหารจากเจลเป็นของเหลว (gel to sol) และค่าเอนทัลปีการหลอมเหลว (ΔH_m) ของวุ้นกะทิ

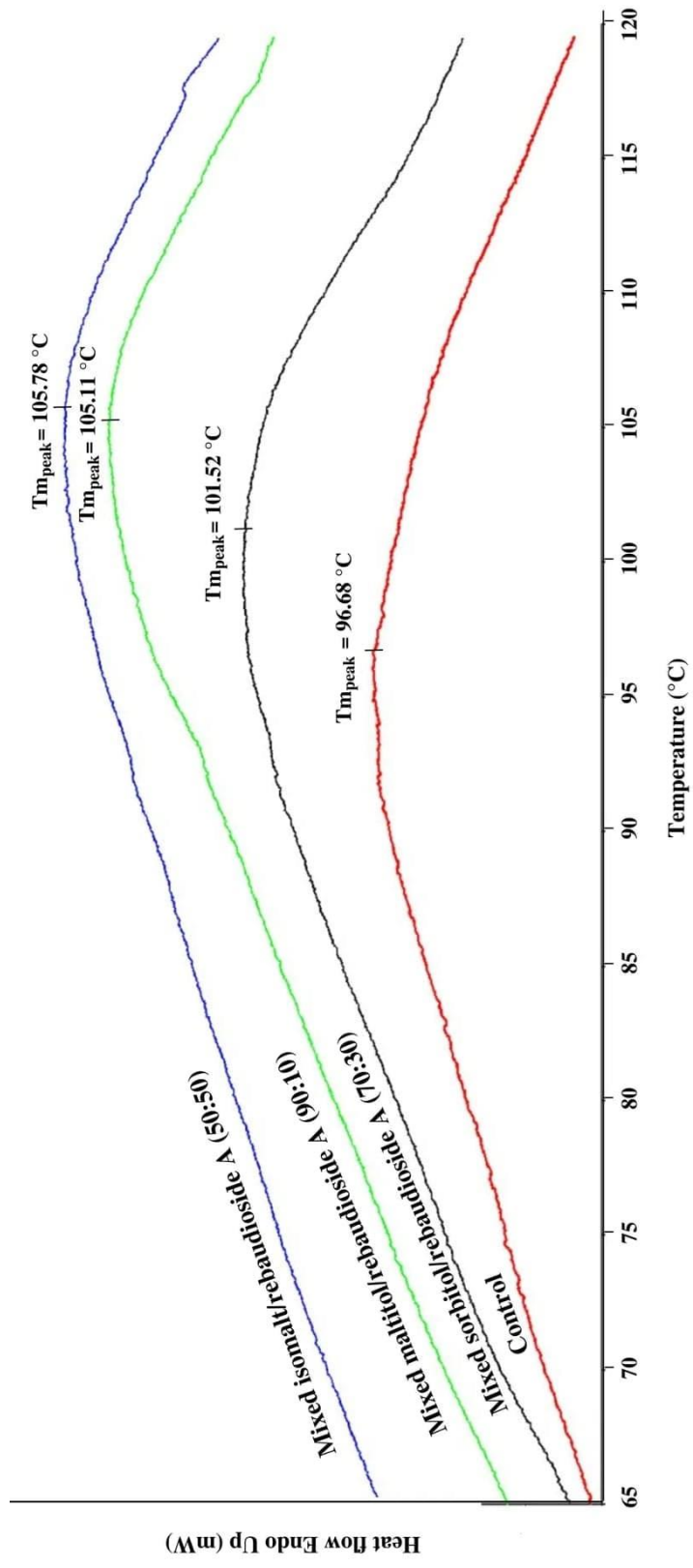
ชนิดของสารให้ความหวาน	$T_{m_{onset}}$ ($^{\circ}C$)	$T_{m_{peak}}$ ($^{\circ}C$)	$T_{m_{end}}$ ($^{\circ}C$)	ΔH_m (J/g)
สูตรควบคุม (น้ำตาลซูโครส)	72.14 \pm 0.83 ^c	100.14 \pm 1.65 ^a	116.92 \pm 1.40 ^a	2.6869 \pm 0.12 ^a
สูตรมอลทิทอลต่อรีบาวดิโอไซด์ เอ (90:10)	83.87 \pm 1.03 ^a	102.99 \pm 3.15 ^a	118.30 \pm 0.33 ^a	2.2951 \pm 0.07 ^b
สูตรซอร์บิทอลต่อรีบาวดิโอไซด์ เอ (70:30)	77.64 \pm 1.48 ^b	100.32 \pm 2.00 ^a	117.08 \pm 1.77 ^a	2.3944 \pm 0.08 ^b
สูตรไอโซมอลต์ต่อรีบาวดิโอไซด์ เอ (50:50)	79.36 \pm 0.34 ^b	103.45 \pm 1.31 ^a	119.15 \pm 0.62 ^a	2.5799 \pm 0.10 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p < 0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ในการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของวุ้นกะทิ ทำการวิเคราะห์ที่ความเข้มข้นของผงวุ้นอาหาร 12% (w/w) (ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข) เนื่องจากความเข้มข้นของผงวุ้นอาหารในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิสูตรควบคุมคือ 1.2% (w/w) เป็นความเข้มข้นที่ต่ำเกินไปจนทำให้ไม่ปรากฏพีคในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC จึงทำให้พีคที่ได้แสดงพื้นที่ใต้กราฟน้อยจนไม่สามารถเทียบกันได้ โดยทำการเปรียบเทียบชนิดของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในวุ้นกะทิ เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างเพื่อทำการหลอมเหลวของอาหารจากเจลเป็นของเหลว (gel to sol) สำหรับศึกษาการเปลี่ยนการจัดเรียงโครงสร้างระดับโมเลกุลของอาหารที่เปลี่ยนจากรูปร่างแบบเกลียว (helix) ไปเป็นรูปร่างอิสระ (random coil) (Amici และคณะ, 2000) ซึ่งเป็นการดูดพลังงานเข้าไปเพื่อเป็นการสลายพันธะภายในโครงสร้าง จากตารางที่ 21 พบว่า อุณหภูมิที่วุ้นกะทิเริ่มเกิดการหลอมเหลวของอาหาร ($T_{m_{onset}}$) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยพบว่า การทดแทนน้ำตาลด้วยการใช้มอลทิทอลผสมรีบาวดิโอไซด์ เอ นั้นมีค่า $T_{m_{onset}}$ สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่า การใช้สารให้ความหวานกลุ่มของน้ำตาลโมเลกุลคู่ในปริมาณมากส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมเหลวมีค่าสูงกว่ากลุ่มของน้ำตาล

โมเลกุลเดี่ยวซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างทางโครงสร้าง หมูไฮดรอกซิลของสารให้ความหวานแต่ละชนิดและความเข้มข้นของสารให้ความหวานที่ใช้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Baek และคณะ (2004) ที่พบว่า น้ำตาลโมเลกุลคู่มีอุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{m_{onset}}$) ที่สูงกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเพราะน้ำตาลโมเลกุลคู่มีจำนวนหมูไฮดรอกซิลมากกว่าน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ความเข้มข้นของโมลาร์เท่ากัน และอุณหภูมิสิ้นสุดการหลอมเหลวของอาหาร ($T_{m_{end}}$) ของทุกตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับอุณหภูมิที่มีการหลอมเหลวสูงสุด ($T_{m_{peak}}$) พบว่า ตัวอย่างที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตรนั้นมีค่า $T_{m_{peak}}$ สูงกว่าสูตรควบคุมหรือสูตรที่ใช้น้ำตาล แม้ว่าจะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าเอนทาลปี (ΔH_m) บ่งบอกถึงพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวอาหาร โดยถือเป็นพลังงานทั้งหมดที่ใช้สลายพันธะภายในโครงสร้างเจลพบว่า ค่า ΔH_m ของรุ่นกะทิ สูตรที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล 2 สูตรมีค่าต่ำกว่าสูตรควบคุมคือ สูตรที่ใช้โมลต์ฟอสเฟตผสมรีวาติโอไซด์ เอ (90:10) และสูตรซอร์บิทอลผสมรีวาติโอไซด์ เอ (70:30) ส่วนสูตรไอโซมอลต์ผสมรีวาติโอไซด์ เอ (50:50) นั้นมีค่าไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากภาพที่ 14 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบพีคการหลอมเหลวด้วยความร้อนของรุ่นกะทิที่ทำการทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวานชนิดต่างๆ พบว่า พีคของรุ่นกะทิที่ได้ทั้งหมดมีลักษณะเป็นฐานกว้าง โดยพีคของสูตรที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตร มีความสูงที่มากกว่าพีคของสูตรควบคุม เนื่องจาก สูตรของสารให้ความหวานมีจำนวนหมูไฮดรอกซิลที่มากกว่าน้ำตาลซูโครสจึงทำให้โครงสร้างของน้ำคงตัวมากกว่า แนวโน้มเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า จำนวนหมูไฮดรอกซิลในโมเลกุลของสารให้ความหวานเป็นปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการหลอมเหลว (Stephen และ Phillips 2006) ถึงแม้ว่าจะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมจึงส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 19 เพราะพีคที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์นี้ถือเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมูไฮดรอกซิลในเจลของอาหารกับน้ำ (Nishinari และ Watase, 1987) และเมื่อดูส่วนของค่าเอนทาลปี (ΔH_m) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ใต้พีคและถือเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของพันธะพบว่า รุ่นกะทิสูตรควบคุมมีค่า ΔH_m มากที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรที่มีการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลแสดงให้เห็นว่า รุ่นกะทิสูตรควบคุมนั้นมีการดูดพลังงานเข้าไปเพื่อทำให้เกิดการทำลายพันธะที่เป็นระเบียบของโครงสร้างรูปร่างแบบเกลียว (helix) ไปเป็นรูปร่างอิสระ (random coil) ภายในเจลหรือทำให้เกิดการหลอมเหลวของอาหารมากกว่าสูตรที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล ดังนั้น หากเปรียบเทียบชนิดของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตรพบว่า สูตรที่ใช้ไอโซมอลต์ผสมรีวาติโอไซด์ เอ (50:50) มีลักษณะการหลอมเหลวของอาหารที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุด



ภาพที่ 14 Heating curve ของสารให้ความหวานชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำกะทิ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

4.5.2 อุณหภูมิของการเกิดเจลในวุ้นกะทิ

ตารางที่ 22 อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลของอาหารและค่าเอนทาลปีของการเกิดเจล (ΔH_s) ของวุ้นกะทิ

ชนิดของสารให้ความหวาน	$T_{s_{onset}}$ ($^{\circ}C$)	$T_{s_{peak}}$ ($^{\circ}C$)	$T_{s_{end}}$ ($^{\circ}C$)	ΔH_s (J/g)
สูตรควบคุม (น้ำตาลซูโครส)	39.12 \pm 0.31 ^b	35.38 \pm 0.22 ^c	31.36 \pm 1.54 ^a	-0.8804 \pm 0.12 ^a
สูตรมอลทิทอลต่อรีบาวดีไอโซด์ เอ (90:10)	40.84 \pm 1.64 ^a	37.64 \pm 0.06 ^a	32.55 \pm 1.44 ^a	-1.3101 \pm 0.16 ^b
สูตรซอร์บิทอลต่อรีบาวดีไอโซด์ เอ (70:30)	40.77 \pm 0.28 ^a	36.69 \pm 0.18 ^b	32.36 \pm 1.00 ^a	-1.0768 \pm 0.10 ^{ab}
สูตรไอโซมอลต์ต่อรีบาวดีไอโซด์ เอ (50:50)	41.34 \pm 0.29 ^a	37.81 \pm 0.16 ^a	33.38 \pm 2.00 ^a	-0.9291 \pm 0.19 ^a

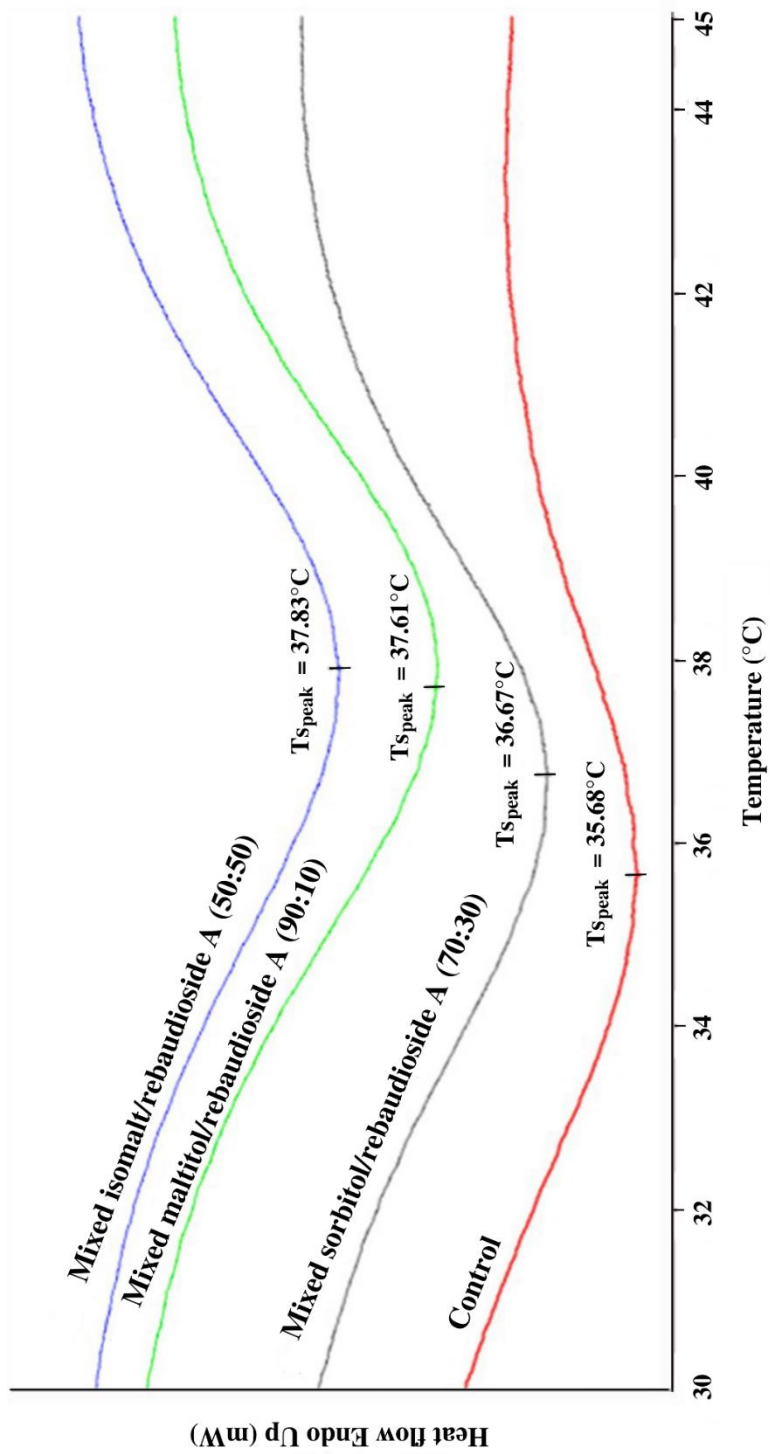
หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p < 0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

เมื่อทำการให้ความเย็นกับตัวอย่างภายหลังการหลอมเหลวเพื่อทำการศึกษากลไกของสารให้ความหวานต่อการเกิดเจลในวุ้นกะทิ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 22 พบว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดเจล ($T_{s_{onset}}$) ขึ้นนั้น อยู่ในช่วง 39.12 ถึง 41.34 $^{\circ}C$ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตรพบว่า สูตรไอโซมอลต์ผสมรีบาวดีไอโซด์ เอ (50:50) มีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารให้ความหวานชนิดอื่น แม้ว่าจะมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมพบว่า วุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตรนั้นมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนอุณหภูมิที่มีการคายพลังงานในการเกิดเจลมากที่สุด ($T_{s_{peak}}$) อยู่ในช่วง 35.38 ถึง 37.81 $^{\circ}C$ โดยวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตรมีค่า $T_{s_{peak}}$ สูงกว่าและมีค่าแตกต่างจากวุ้นกะทิสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับอุณหภูมิสิ้นสุดการเกิดเจล ($T_{s_{end}}$) นั้นอยู่ในช่วง 31.36 ถึง 33.38 $^{\circ}C$ โดยวุ้นกะทิที่ทำการทดแทนน้ำตาลด้วยไอโซมอลต์ผสมรีบาวดีไอโซด์ เอ (50:50) มีค่า $T_{s_{end}}$ สูงที่สุด เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมพบว่า วุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตรนั้นมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเอนทาลปี (ΔH_s) ซึ่งเป็นพลังงานที่คายออกในการเกิดเจล โดยจะทำให้สายเกลียว (helix) ของอาหารโกล์ซิดกันและเกิดเป็นโครงร่างสามมิติของเจลซึ่งทำให้โครงสร้างเจลเกิดการแข็งตัวพบว่า วุ้นกะทิที่ทำการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลผสมรีบาวดีไอโซด์ เอ (90:10) นั้นมีค่า ΔH_s ตีลบมากที่สุดและสูตรควบคุมนั้นมีค่า ΔH_s ตีลบน้อยที่สุดซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารให้ความหวานพบว่า ตัวอย่างสูตรไอโซมอลต์ผสมรีบาวดีไอโซด์ เอ (50:50) มีค่า ΔH_s ใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุด แสดงให้เห็นว่า วุ้นกะทิที่เป็นสูตรควบคุม คายพลังงานในการเกิดเจln้อยที่สุด หมายถึง อาหารที่มีน้ำตาลซูโครสในส่วนผสมคายพลังงานในการสร้างพันธะน้อยกว่าตัวอย่างอื่น

ในทางตรงกันข้ามวุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล 2 สูตรได้แก่ สูตรมอลทิทอลผสมรีบาวติโอไซด์ เอ (90:10) และสูตรซอร์บิทอลผสมรีบาวติโอไซด์ เอ (70:30) นั้นมีการคายพลังงานออกมามากกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก ความแตกต่างของค่าที่เกิดขึ้นเกิดจากชนิดและโครงสร้างของสารให้ความหวานที่มีลักษณะแตกต่างกัน

จากภาพที่ 15 เมื่อทำการเปรียบเทียบพีคการเกิดเจลเมื่อลดอุณหภูมิลงพบว่า พีคของวุ้นกะทิสูตรที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตร มีความสูงที่มากกว่าพีคของสูตรควบคุม เนื่องจาก สูตรของสารให้ความหวานมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่มากกว่าน้ำตาลซูโครสจึงส่งเสริมให้สร้างพันธะไฮโดรเจนและโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกลียวของอาคารเกิดการสร้างเครือข่ายสามมิติได้เร็วขึ้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลสูงขึ้น (Russ และคณะ, 2014) ดังนั้น การใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเกิดเจลอย่างชัดเจนและค่าที่ได้จากการศึกษานี้สอดคล้องกับการเรียงลำดับเอนทัลปีของการเปลี่ยนแปลงซึ่งมักพบในเจลอาคาร (Norton และคณะ, 1999) และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทั้ง 3 สูตร พบว่า สูตรที่ใช้ไอโซมอลต์ผสมรีบาวติโอไซด์ เอ (50:50) มีลักษณะการเกิดเจลของอาคารที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุด

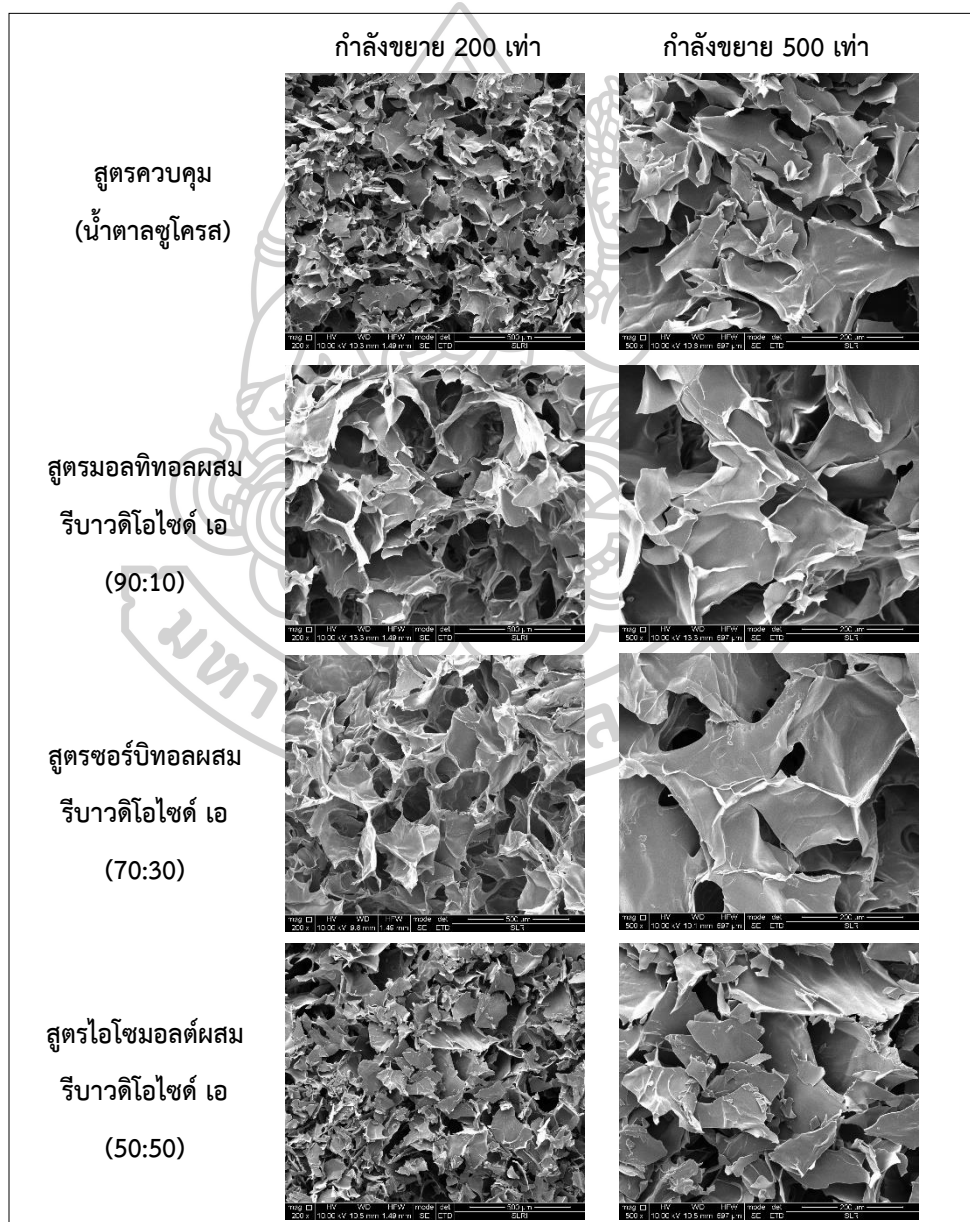




ภาพที่ 15 Cooling curve ของสารให้ความหวานชนิดต่างๆ ในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

4.6 ผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ ได้นำอัตราส่วนการทดแทนที่เหมาะสมในแต่ละชนิดของสารให้ความหวานที่ให้มวลผสมสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ ธีบาวดีไอโซด์ เอ ที่ผ่านการคัดเลือกด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ทั้งหมด 3 สูตรได้แก่ มอลทิทอลที่อัตราส่วนการทดแทน 90:10 ซอร์บิทอลที่อัตราส่วนการทดแทน 70:30 และไอโซมอลต์ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสูตรควบคุมคือ วุ้นกะทิที่ใช้น้ำตาลซูโครส โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวุ้นกะทิ

ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ ทำการวิเคราะห์ด้วยตัวอย่างที่ไม่เติมกะทิ (ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข) เนื่องจากการมีส่วนของกะทิอยู่ในตัวอย่าง ส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำมันมะพร้าวอบคั้งโครงสร้างภายในที่แท้จริงจึงไม่สามารถนำภาพถ่ายที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มาเทียบกันได้ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1.1 ดังนั้นจึงแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้น้ำมาแทนที่ส่วนของกะทิที่หายไป ปริมาณที่เทียบเท่ากับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของตัวอย่างและทำการทวนสอบผลของการใช้น้ำมาแทนที่จากการวิเคราะห์ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสดังแสดงในตารางผนวกที่ ง.1 พบว่า ค่าที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับผลของตัวอย่างที่มีการเติมกะทิ แต่ค่าที่ได้มีค่ามากกว่าเนื่องจาก ส่วนของโครงสร้างอากาศโรเพคตินที่เป็นส่วนประกอบของอาการ์นั้นมีประจุที่สามารถจับกับไอออนลบได้ดี (Usov, 1998) ทำให้เมื่อเติมกะทิซึ่งเป็นอิมัลชันของน้ำมันมะพร้าว โดยที่มีสารก่ออิมัลชันตามธรรมชาติคือ ฟอสโฟลิปิด (phospholipid) ที่มีประจุลบค่อนข้างแรงนั้น (Birosele และคณะ, 1963) ไปจับส่วนที่เป็นอากาศโรเพคตินในอาการ์ ทำให้เข้าไปขัดขวางการสร้างร่างแหของอาการ์ในน้ำส่งผลให้โครงสร้างที่ได้มีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีการเติมกะทิ จากนั้นจึงนำตัวอย่างมากำจัดฟลิกน้ำตาลหรือสารให้ความหวานออกซึ่งดัดแปลงจากวิธีของ Kaneda (2018) โดยนำตัวอย่างมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างภายในได้อย่างชัดเจน ไม่มีส่วนของฟลิกเข้ามาบดบังโครงสร้าง เนื่องจากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ตัวอย่างที่ไม่เติมกะทิและไม่ได้กำจัดน้ำตาลดังแสดงในภาพผนวกที่ ง.2 มีส่วนของฟลิกน้ำตาลบดบังโครงสร้างภายในของตัวอย่าง จึงได้นำตัวอย่างที่เตรียมดังกล่าว มาใช้ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคในงานวิจัยนี้

จากภาพที่ 16 พบว่า ชนิดของสารให้ความหวานมีผลต่อโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ อย่างเห็นได้ชัดสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaneda (2018) โดยเมื่อสังเกตจากขนาดตาข่ายของเครือข่ายเจลพบว่า ตัวอย่างสูตรมอลทิพอลผสมรีบาวดีไอโซด์ เอที่อัตราทดแทน 90:10 มีขนาดตาข่ายที่ใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ สูตรซอร์บิทอลผสมรีบาวดีไอโซด์ เอที่อัตราทดแทน 70:30 และสูตรไอโซมอลต์ผสมรีบาวดีไอโซด์ เอที่อัตราทดแทน 50:50 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้างเกลียว (spiral structure) ของระบบอาการ์เกิดการเปลี่ยนแปลงลำดับการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่แตกต่างกันจากการเติมสารให้ความหวานที่มีชนิด ความเข้มข้น น้ำหนักของโมเลกุลและความสามารถในการจับน้ำได้ที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้โครงสร้างเครือข่ายเจลมีความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะของขนาดตาข่ายซึ่งแสดงให้เห็นถึง การรวมตัวของสายโซ่เพื่อสร้างเส้นใยที่นำไปสู่โครงสร้างระดับจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Kaneda, 2018; Normand และคณะ, 2003) หากขนาดตาข่ายมีขนาดเล็กกระจายทั่วโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอแสดงว่า ตัวอย่างมีความแข็งแรงของเจลที่ดีเนื่องจาก มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีจุดเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของอาการ์ (junction zone) มากกว่า จึงส่งผลให้

ช่องว่างภายในระบบน้อย ในทางตรงกันข้าม ตัวอย่างที่มีขนาดตาข่ายขนาดใหญ่ นั้น การรวมตัวของสายโซ่ยังไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีจุดเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของอาคาร (junction zone) น้อยกว่า จึงส่งผลให้ช่องว่างภายในระบบมาก ผลลัพธ์ที่กล่าวข้างต้นสอดคล้องกับผลของค่าความแข็งแรงของเจลที่วิเคราะห์ได้ในการศึกษานี้อย่างชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ตัวอย่างที่มีการทดแทนด้วยสารให้ความหวานทั้ง 3 สูตรพบว่า ตัวอย่างสูตรไอโซมอลต์ผสมรีบาดีโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 มีลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากกว่าสารให้ความหวานชนิดอื่นคือ มีขนาดของตาข่ายที่เล็ก กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับสูตรควบคุม ทั้งนี้เนื่องจาก รีบาดีโอไซด์ เอ มีความสามารถในการจับน้ำได้น้อยที่สุด รองลงมาคือ ไอโซมอลต์ มอลทิทอล และซอร์บิทอลตามลำดับ (Embuscado, 2006; Nikooie และคณะ, 2015) ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารให้ความหวานที่ใช้ในการผลิตมีอิทธิพลต่อขนาดตาข่ายและความแข็งแรงของเครือข่ายเจล โดยสูตรที่ใช้มอลทิทอลและซอร์บิทอลใช้สัดส่วนของความเข้มข้นในปริมาณที่มากกว่าสูตรที่ใช้ไอโซมอลต์ แต่มีความสามารถในการจับน้ำได้ดีกว่าจึงส่งผลให้เกิดการเข้าไปยับยั้งปฏิสัมพันธ์ของหมู่ไฮดรอกซิลในอาคารกับน้ำมากกว่า เป็นเหตุให้ไปยับยั้งการจัดเรียงตัวของพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลอาคาร เพราะมีปริมาณน้ำที่ไม่เพียงพอสำหรับการสร้างจุดเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (junction zones) ที่เสถียรในระบบ เนื่องจาก น้ำถือเป็นตัวทำลายชนิดเดียวที่โมเลกุลอาคารสามารถก่อตัวเป็นเจล โดยไม่สามารถเกิดการก่อตัวในตัวทำลายอินทรีย์ได้ เว้นแต่จะผสมกับน้ำ จึงจำเป็นต้องมีน้ำอิสระที่มีปริมาณเพียงพอ เพื่อให้เจลอาคารที่เกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลเกลียวคู่เกิดจุดเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของอาคาร (junction zones) ที่เสถียรและน้ำจึงเป็นส่วนที่จำเป็นของโมเลกุลอาคารเหล่านี้ เพื่อสร้างเครือข่ายเจลที่มีความแข็งแรงในอาคาร (Deszczynski และคณะ, 2003; Kronberga และคณะ, 2011; Watase และคณะ, 1988) ความแข็งแรงของเจลที่ได้จึงน้อยกว่าสูตรที่ใช้ไอโซมอลต์ผสมรีบาดีโอไซด์ เอ ดังนั้น การใช้สารให้ความหวานผสม 2 ชนิดคือ ไอโซมอลต์ผสมรีบาดีโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50 จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดีในการนำมาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาลเพื่อสุขภาพในเชิงพาณิชย์ได้

บทที่ 5

สรุปผล

การใช้สารให้ความหวานผสม 2 ชนิดในการทดแทนน้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิคือ สารให้ความหวานที่ให้ความหวานได้แก่ มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไอโซมอลต์ ผสมกับสารให้ความหวานยิ่งยวดคือ รีบาวติโอไซด์ เอ ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีความหวาน ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำอิสระลดลงตามสัดส่วนของสารให้ความหวานที่ให้ความหวานที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสมีเพียง 1 สูตรที่มีค่าความแข็งแรงของเจลไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมคือ สูตรที่ใช้ไอโซมอลต์ผสมรีบาวติโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วน 50:50 ส่วนสูตรอื่นมีค่าความแข็งแรงของเจลด้อยกว่าสูตรควบคุม โดยมีความสัมพันธ์กับค่าการแยกตัวของน้ำ จากการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า สารให้ความหวานที่ให้ความหวานทั้งหมดมีความแตกต่างกันในการรับรู้รสหวาน อย่างไรก็ตามพบว่า การใช้ไอโซมอลต์ผสมรีบาวติโอไซด์ เอ ไม่มีรสตกค้างในปากเมื่อเทียบกับสารให้ความหวานชนิดอื่น

จากการศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของสูตรตัวอย่างที่ผ่านการคัดเลือกจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทั้ง 3 สูตรเทียบกับสูตรควบคุมพบว่า วุ้นกะทิที่ใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาลมีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวและการเกิดเจลสูงกว่าสูตรควบคุม ส่วนค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลวและการเกิดเจลตลอดจนขนาดตาข่ายของเครือข่ายเจลจากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคพบว่า สูตรตัวอย่างไอโซมอลต์ผสมรีบาวติโอไซด์ เอ ที่อัตราส่วน 50:50 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการทดแทนของสารให้ความหวานชนิดอื่น ดังนั้น สูตรดังกล่าวจึงสามารถใช้เป็นสูตรต้นแบบสำหรับนำไปผลิตเชิงอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาลเพื่อตอบสนองของกลุ่มตลาดอาหารเพื่อสุขภาพต่อไปได้

รายการอ้างอิง

- Amici, E., Clark, A. H., Normand, V. และ Johnson, N. B. (2000). Interpenetrating Network Formation in Gellan–Agarose Gel Composites. *Biomacromolecules*, 1(4), 721-729. doi:10.1021/bm000057d
- Armisen, R. และ Gaiatas, F. (2009). 4 - Agar. In G. O. Phillips และ P. A. Williams (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids (Second Edition)* (pp. 82-107): Woodhead Publishing.
- Baek, M. H., Yoo, B. และ Lim, S. T. (2004). Effects of sugars and sugar alcohols on thermal transition and cold stability of corn starch gel. *Food Hydrocolloids*, 18(1), 133-142. doi:10.1016/S0268-005X(03)00058-4
- Barbosa-Cánovas, G. V. และ Vega-Mercado, H. (1996). Physical, Chemical, and Microbiological Characteristics of Dehydrated Foods. In G. V. Barbosa-Cánovas และ H. Vega-Mercado (Eds.), *Dehydration of Foods* (pp. 29-99). Boston, MA: Springer US.
- Bayu, A., Warsito, M. F., Putra, M. Y., Karnjanakom, S. และ Guan, G. (2021). Macroalgae-derived rare sugars: Applications and catalytic synthesis. *Carbon Resources Conversion*, 4, 150-163. doi:10.1016/j.crcon.2021.04.002
- Birosel, D. M., Gonzales, A. L. และ Santos, M. P. (1963). The nature and properties of the emulsifier system of oil globulins in coconut milk and cream. *The Philippines Journal of science*, 92(1), 1-15.
- Bodurov, I., Vlaeva, I., Viraneva, A. และ Yovcheva, T. (2017). Discrimination of sweeteners based on the refractometric analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 794, 012033. doi:10.1088/1742-6596/794/1/012033
- Boland, A. B., Delahunty, C. M. และ van Ruth, S. M. (2006). Influence of the texture of gelatin gels and pectin gels on strawberry flavour release and perception. *Food Chemistry*, 96(3), 452-460. doi:10.1016/j.foodchem.2005.02.027
- Briones, V. และ Aguilera, J. M. (2005). Image analysis of changes in surface color of chocolate. *Food Research International*, 38(1), 87-94. doi:10.1016/j.foodres.2004.09.002
- Carpenter, F. และ Deitz, V. (1962). Status of Sugar Color and Turbidity Measurements.

- Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists*, 12(4), 326-347.
- Chow, B. F., Meier, P. และ Free, S. M. J. (1958). Absorption of Vitamin B12 Enhanced by d-Sorbitol. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 6(1), 30-33.
doi:10.1093/ajcn/6.1.30
- Chupeerach, C., Yothakulsiri, C., Chamchan, R., Suttisansanee, U., Sranacharoenpong, K., Tungtrongchitr, A. และคณะ. (2018). The Effect of Coconut Jelly with Stevia as a Natural Sweetener on Blood Glucose, Insulin and C-Peptide Responses in Twelve Healthy Subjects. *Recent Pat Food Nutr Agric*, 9(2), 127-133.
doi:10.2174/2212798410666180717163852
- Dai, B. และ Matsukawa, S. (2012). NMR studies of the gelation mechanism and molecular dynamics in agar solutions. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 181-186.
doi:10.1016/j.foodhyd.2011.04.021
- Deszczynski, M., Kasapis, S. และ Mitchell, J. R. (2003). Rheological investigation of the structural properties and aging effects in the agarose/co-solute mixture. *Carbohydrate Polymers*, 53(1), 85-93. doi:10.1016/S0144-8617(02)00327-2
- Dobrova, V., Hadjikinova, M., Slavov, A., Hadjikinov, D., Dobrev, G. และ Zhekova, B. (2013). Functional properties of maltitol. *Agricultural Science and Technology*, 5, 168-172.
- Doesburg, J. J. (1965). *Pectic substances in fresh and preserved fruits and vegetables*. Wageningen: Institute for Research on Storage and Processing of Horticultural Produce.
- Dorohovich, A., Goncharuk, O., Matias, D. และ Kambulova, J. (2018). Influence of sugars on the formation of structural and mechanical characteristics of agar polysaccharides' gels. *Ukrainian Journal of Food Science*, 6(1), 20-31.
doi:10.24263/2310-1008-2018-6-1-5
- Edwards, L., Bryant, A., Morgan, K., Keegan, R. และ Jones, A. (2016). *Edwards et al. 2016 Definitions, Foundations and Associations of Physical Literacy A Systematic Review*.
- Embuscado, M. (2006). Embuscado, ME. 2006. Polyols. In W Spillane, eds. *Optimising sweet taste in foods*. Cambridge, England: CRC Press. pp.153-174. In (pp. 153-174).
- Evrendilek, G. (2012). Sugar alcohols (Polyols). In Varzakas T, Labropoulos A, & Anestis S

- (Eds.), *Sweeteners: nutritional aspects, applications, and production technology*.: CRC Press, Boca Raton.
- Farias, T., Schiassi, M., Pereira, P., Souza, V., Lago, A., Borges, S. และคณะ. (2019). Mixed Brazilian Cerrado fruits preserves without added sugar: the effect of bodying agents. *British Food Journal, ahead-of-print*. doi:10.1108/BFJ-11-2018-0739
- Food, S. A. และ Atkins, E. D. Y. (1989). New x-ray diffraction results from agarose: Extended single helix structures and implications for gelation mechanism. *Biopolymers*, 28(8), 1345-1365. doi:10.1002/bip.360280802
- Gawel-Beben, K., Bujak, T., Niziol-Lukaszewska, Z., Antosiewicz, B., Jakubczyk, A., Karas, M. และคณะ. (2015). Stevia Rebaudiana Bert. Leaf Extracts as a Multifunctional Source of Natural Antioxidants. *Molecules*, 20, 5468-5486. doi:10.3390/molecules20045468
- Ghosh, S. และ ML, S. (2011). A review on polyols: New frontiers for health-based bakery products. *International journal of food sciences and nutrition*, 63, 372-379. doi:10.3109/09637486.2011.627846
- Glicksman, M. (1987, 1987//). *Utilization of seaweed hydrocolloids in the food industry*. Paper presented at the Twelfth International Seaweed Symposium, Dordrecht.
- Grembecka, M. (2015). Sugar alcohols—their role in the modern world of sweeteners: a review. *European Food Research and Technology*, 241(1), 1-14. doi:10.1007/s00217-015-2437-7
- Gwak, M.-J., Chung, S.-J., Kim, Y. และ Lim, C. (2012). Relative sweetness and sensory characteristics of bulk and intense sweeteners. *Food Science and Biotechnology*, 21. doi:10.1007/s10068-012-0115-0
- Hannou, S. A., Haslam, D. E., McKeown, N. M. และ Herman, M. A. (2018). Fructose metabolism and metabolic disease. *The Journal of Clinical Investigation*, 128(2), 545-555. doi:10.1172/JCI96702
- Hellfritsch, C., Brockhoff, A., Stähler, F., Meyerhof, W. และ Hofmann, T. (2012). Human Psychometric and Taste Receptor Responses to Steviol Glycosides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(27), 6782-6793. doi:10.1021/jf301297n
- Horwitz, W. (2000). *Official methods of analysis of AOAC International*. Gaithersburg, Md.: AOAC International.

- Jain, T. และ Grover, K. (2015). Sweeteners in Human Nutrition. *International Journal of Health Sciences and Research*, 5, 439-451.
- Jung, J., Kim, S., Park, S. และ Hong, J. H. (2021). Sweetness profiles of glycosylated rebaudioside A and its binary mixtures with allulose and maltitol. *Food Sci Biotechnol*, 30(3), 423-432. doi:10.1007/s10068-020-00873-w
- Kaneda, I. (2018). Effect of Sweeteners on the Solvent Transport Behaviour of Mechanically-Constrained Agarose Gels. *Gels*, 4(1). doi:10.3390/gels4010023
- Kohyama, K., Hayakawa, F., Kazami, Y. และ Nishinari, K. (2016). Sucrose release from agar gels and sensory perceived sweetness. *Food Hydrocolloids*, 60, 405-414. doi:10.1016/j.foodhyd.2016.04.003
- Kronberga, M., K rkljFa, D., Nkrniece, I. และ Kruma, Z. (2011). *CHANGES OF AGAR-AGAR GEL PROPERTIES AFTER REPLACING SUCROSE BY INULIN SYRUP*.
- Laffitte, A., Neiers, F. และ Briand, L. (2016). Characterization of taste compounds: chemical structures and sensory properties. In *Flavour* (pp. 154-191).
- Laffitte, A., Neiers, F. และ Briand, L. (2017). *Characterization of taste compounds: chemical structures and sensory properties*.
- Lahrech, K., Safouane, A. และ Peyrelasse, J. (2005). Sol state formation and melting of agar gels rheological study. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 358(1), 205-211. doi:10.1016/j.physa.2005.06.022
- Lemus-Mondaca, R., Vega-Galvez, A., Rojas, P., Stucken, K., Delporte, C., Valenzuela-Barra, G. และคณะ. (2018). Antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory potential of Stevia rebaudiana leaves: effect of different drying methods. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 11, 37-46. doi:10.1016/j.jarmap.2018.10.003
- Lyn, B. N. (2001). Low-Calorie sweeteners. In *Alternative sweeteners* (pp. 13-196). New York: M. Dekker.
- Maurer, S., Junghans, A. และ Vilgis, T. A. (2012). Impact of xanthan gum, sucrose and fructose on the viscoelastic properties of agarose hydrogels. *Food Hydrocolloids*, 29(2), 298-307. doi:10.1016/j.foodhyd.2012.03.002
- Medeiros, A., Tavares, E. และ Bolini, H. M. A. (2022). Descriptive Sensory Profile and Consumer Study Impact of Different Nutritive and Non-Nutritive Sweeteners on

- the Descriptive, Temporal Profile, and Consumer Acceptance in a Peach Juice Matrix. *Foods*, 11(2), 244. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/2/244>
- Mendonça, K., Correa, J., Junqueira, J., Angelis-Pereira, M. และ Cirillo, M. (2017). Mass Transfer Kinetics of the Osmotic Dehydration of Yacon Slices with Polyols. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(1). doi:10.1111/jfpp.12983
- Misra, V., Shrivastava, A. K., Shukla, S. และ Ansari, M. I. (2016). Effect of sugar intake towards human health. doi:10.21276/sjm.2016.1.2.2
- Nagasaka, K. และ Taneya, S.-I. (2000). Effects of Sugars on Syneresis of Agarose Gel(Syneresis Phenomena of Foods . Part 3.). *NIPPON SHOKUHIN KAGAKU KOGAKU KAISHI*, 47, 670-678. doi:10.3136/nskkk.47.670
- Niezgoda, E. M. (2015). *Selection and Optimization of Agar Confectionary Matrix for the Delivery of Naringenin from Grapefruit or Tomato Fruit Powders*. (The Degree Master of Science). The Ohio State University.
- Nikooie, A., Yazdi, A. P. G., Shamsaei, M. และ Boroujeni, L. S. (2015). Effect of Sucrose Replacement by Stevia as a Non-Nutritive Sweetener and Bulking Compounds on Physicochemical Properties of Foodstuffs. *Journal of Herbal Drugs: International Journal on Medicinal Herbs*, 6, 121-128.
- Nishinari, Takaya, T., Kohyama, K. และ Watase, M. (1994). Effects of Sugars on the Gel-Sol Transition of Agarose and κ -Carrageenan. In T. Yano, R. Matsuno, & K. Nakamura (Eds.), *Developments in Food Engineering: Proceedings of the 6th International Congress on Engineering and Food* (pp. 108-110). Boston, MA: Springer US.
- Nishinari และ Watase. (1987). Effects of Polyhydric Alcohols on Thermal and Rheological Properties of Polysaccharide Gels. *Agricultural and Biological Chemistry*, 51(12), 3231-3238. doi:10.1080/00021369.1987.10868569
- Nishinari, Watase, M. และ Hatakeyama, T. (1997). Effects of polyols and sugars on the structure of water in concentrated gelatin gels as studied by low temperature differential scanning calorimetry. *Colloid and Polymer Science*, 275(11), 1078. doi:10.1007/s003960050186
- Normand, V., Aymard, P., Lootens, D. L., Amici, E., Plucknett, K. P. และ Frith, W. J. (2003). Effect of sucrose on agarose gels mechanical behaviour. *Carbohydrate*

- Polymers*, 54(1), 83-95. doi:10.1016/S0144-8617(03)00153-X
- Norton, I. T., Jarvis, D. A. และ Foster, T. J. (1999). A molecular model for the formation and properties of fluid gels. *Int J Biol Macromol*, 26(4), 255-261. doi:10.1016/s0141-8130(99)00091-4
- Pereira-Pacheco, F., Robledo, D., Rodriguez-Carvajal, L. และ Freile-Pelegrin, Y. (2007). Optimization of native agar extraction from *Hydropuntia cornea* from Yucatan, Mexico. *Bioresour Technol*, 98(6), 1278-1284. doi:10.1016/j.biortech.2006.05.016
- Portmann, M.-O. และ Kilcast, D. (1998). Descriptive profiles of synergistic mixtures of bulk and intense sweeteners. *Food Quality and Preference*, 9(4), 221-229. doi:10.1016/S0950-3293(97)00071-2
- Prakash และ Chaturvedula, V. S. P. (2018). Steviol Glycosides: Natural Noncaloric Sweeteners. In J.-M. Mérillon และ K. G. Ramawat (Eds.), *Sweeteners: Pharmacology, Biotechnology, and Applications* (pp. 101-128). Cham: Springer International Publishing.
- Prakash, DuBois, G. E., Clos, J. F., Wilkens, K. L. และ Fosdick, L. E. (2008). Development of rebiana, a natural, non-caloric sweetener. *Food and Chemical Toxicology*, 46(7, Supplement), S75-S82. doi:10.1016/j.fct.2008.05.004
- Rees, D. A. และ Welsh, E. J. (1977). Secondary and Tertiary Structure of Polysaccharides in Solutions and Gels. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 16(4), 214-224. doi:10.1002/anie.197702141
- Russ, N., Zielbauer, B. I. และ Vilgis, T. A. (2014). Impact of sucrose and trehalose on different agarose-hydrocolloid systems. *Food Hydrocolloids*, 41, 44-52. doi:10.1016/j.foodhyd.2014.03.020
- Saartrat, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V. และ Uttapap, D. (2005). Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches. *Carbohydrate Polymers*, 61(2), 211-221. doi:10.1016/j.carbpol.2005.05.024
- Sáska, Z., Dredán, J., Balogh, E., Luhn, O., Shafir, G. และ Antal, I. (2010). Effect of isomalt as novel binding agent on compressibility of poorly compactable paracetamol evaluated by factorial design. *Powder Technology*, 201(2), 123-129. doi:10.1016/j.powtec.2010.03.009
- Schmidt, S. J. (2007). Water Mobility in Foods. In *Water Activity in Foods* (pp. 47-108).

- Singh, K., Tiwari, G., Nayak, P. S. และ Upadhyay, A. (2020). Masking the Bitterness of Stevia rebaudiana Ber. Extract Using Natural Adjuvant and their Effect on Recovery of Steviosides in Final Extract. *International Journal of Agriculture Sciences*, 12(14), 10067-10070.
- Sinthusamran, S., Benjakul, S. และ Hemar, Y. (2018). Physical and sensory properties of gelatin from seabass (*Lates calcarifer*) as affected by agar and **K**-carrageenan. *Journal of Texture Studies*, 49(1), 47-55. doi:10.1111/jtxs.12280
- Stephen , A. M. และ Phillips , G. O. (2006). Agar. In *Food Polysaccharides and Their Applications* (pp. 752). Boca Raton ,CRC Press.
- Struck, S., Jaros, D., Brennan, C. และ Rohm, H. (2014). Sugar replacement in sweetened bakery goods. *International Journal of Food Science & Technology*, 49. doi:10.1111/ijfs.12617
- Toncheva, G., Hadjikinov, D. และ Panchev, I. (1994). Investigation of syneresis of agar jellies with sorbitol. *Food Chemistry*, 49(1), 29-31. doi:10.1016/0308-8146(94)90228-3
- Usov, A. I. (1998). Structural analysis of red seaweed galactans of agar and carrageenan groups. *Food Hydrocolloids*, 12(3), 301-308. doi:10.1016/S0268-005X(98)00018-6
- Varzakas, T., Labropoulos, A. และ Anestis, S. (2012). *Sweeteners : Nutritional Aspects, Applications, and Production Technology*.
- Villanueva, R. D., Romero, J. B., Ragasa, A. L. R. และ Montaña, M. N. E. (2010). Agar from the red seaweed, *Laurencia flexilis* (Ceramiales, Rhodophyta) from northern Philippines. *Phycological Research*, 58(2), 151-156. doi:10.1111/j.1440-1835.2010.00573.x
- Watase, M., Nishinari, K. และ Hatakeyama, T. (1988). DSC study on properties of water in concentrated agarose gels. *Food Hydrocolloids*, 2(6), 427-438. doi:10.1016/S0268-005X(88)80043-2
- Watase, M., Nishinari, K., Williams, P. A. และ Phillips, G. O. (1990). Agarose gels: effect of sucrose, glucose, urea, and guanidine hydrochloride on the rheological and thermal properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 38(5), 1181-1187. doi:10.1021/jf00095a005
- Whitney, R. M. (1977). Chemistry of colloidal substances; General principles. In Graham (Ed.), *Food Colloids* (pp. 1-65). Avi Publishing, Westport.

- กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2553). ขนมหลิกบทบาทเป็นสินค้าเศรษฐกิจ. อุตสาหกรรมสาร 1, 1-41.
- จินตนา อุปติสสกุล. (2540). เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องหลักการและความสำคัญของการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสอาหาร: บริษัทจาร์พาเทคเซ็นเตอร์ จำกัด.
- ธีรนุช ฉายศิริโชติ และ สุวรรณ พิชัยยงค์วงศ์ดี. (2558). การพัฒนาเต้าหู้นมสดเสริมใยอาหารจากเปลือกส้มโอมง. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต.
- ประเสริฐ สิริธนากร. (2545). 856. กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- ปวีณา วรวิทย์เสรี, อุมชัย จินะดิษฐ์ และ สุวลี จันทร์กระจ่าง. (2530). การสกัดวุ้นจากสาหร่ายทะเลสกุลกราซิลาเรียในประเทศไทย. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร.
- ศิวาพร ศิวเวชช. (2546). วัตถุประสงค์อาหาร (เล่ม 1). นครปฐม: สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิรินดา กุสมภ์. (2559). 11091. กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- สุขใจ ชูจันทร์. (2555). สารให้ความหวานพลังงานต่ำ : การผลิตทางชีวภาพ คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์. กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรจิต วรรณจันทร์. (2523). การผลิตวุ้นจากสาหร่ายในประเทศไทย. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร.
- อบเชย วงศ์ทอง. (2543). เอกสารประกอบการสอนการผลิตขนมไทย. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
- อุบลรัตน์ จันทร์รังษ์, มณีฉาย ไชยนุวัติ, วีรมลล์ พันธุ์พานิช และ สุพิชา พันธเสน. (2563). Global Trend : เทรนด์อาหารมาแรงแห่งปี 2563. *BOT พระสยาม Magazine*, 2, 46-47.
- เอมิกา เทียนไสว. (2557). การใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในวุ้นกะทิและน้ำกะทิสำหรับลดช่องว่างคิงโก้. (ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศิลปากร, สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศิลปากร.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาชนะบรรจุและเครื่องมือ

ภาชนะบรรจุ

1. ถ้วยพลาสติกพอลิโพรไพลีน (PP) ชนิดมีฝาปิดสนิท

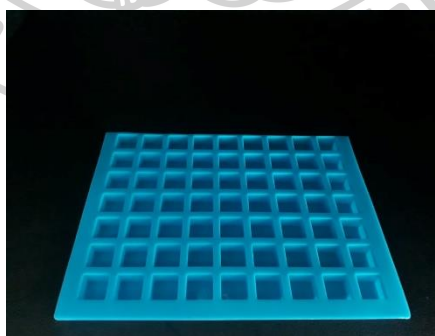
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฝา 4.5 cm ฐาน 3.7 cm และสูง 2.5 cm สำหรับบรรจุตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ ก.1 ถ้วยพลาสติกพอลิโพรไพลีน (PP)

2. แม่พิมพ์ซิลิโคนสี่เหลี่ยม

ขนาดช่อง 1.5x1.5x1.0 cm สำหรับบรรจุตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด ปริมาณความชื้น ค่าการแยกตัวของน้ำ และค่าสี ของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ ก.2 แม่พิมพ์ซิลิโคนสี่เหลี่ยม

เครื่องมือ

1. เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (TA-xT2i, Stable Microsystems™, England)



ภาพที่ ก.3 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

2. เครื่องวัดค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (Aqua Lab, 4TE, USA)



ภาพที่ ก.4 เครื่องวัดค่ากิจกรรมน้ำอิสระ

3. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (DSC 8000, Perkin Elmer, USA)



ภาพที่ ก.5 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter

4. เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) (Telstar LyoQuest, Spain)



ภาพที่ ก.6 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope) (MIRA3, Tescan, Australia)



ภาพที่ ก.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

วัดค่าความแข็งของเจล (Hardness; N) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร (Chewiness; N·mm) ของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ โดยใช้หัววัด spherical stainless P 0.5S ทำการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA (Texture Profile Analysis) กำหนดรายละเอียดสำหรับเครื่อง ดังนี้

Parameter

Pre test speed 2.0 mm/s

Test speed 1.0 mm/s

Post test speed 1.0 mm/s

Strain 40 %

Trigger

Type Auto

Force 0.049 N

Stop plot at final

วิธีการ

1.1 เปิดเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) เข้าโปรแกรม Texture expert ทำการ Calibrate force และ Calibrate height จากนั้นตั้งค่าในการทดสอบต่างๆ ตามกำหนด

1.2 ทำการทดสอบผลิตภัณฑ์ โดยให้หัววัด (probe) วัดลงตรงกึ่งกลางผิวหน้าด้านบนของผลิตภัณฑ์ บันทึกผลการทดสอบ

2. การวิเคราะห์ค่าร้อยละการแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ดัดแปลงจากวิธีของ Villanueva และคณะ (2010)

วิธีการ

- 2.1 ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (บันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน) โดยเป็นตัวอย่างที่บรรจุในแม่พิมพ์ซิลิโคนสี่เหลี่ยมขนาดช่อง 1.5x1.5x1.0 cm
- 2.2 กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ที่วางบนตะแกรง เป็นเวลา 5 นาที
- 2.3 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังแยกน้ำ
- 2.4 นำค่าที่ได้ไปคำนวณดังสมการ

$$\text{การแยกตัวของน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนแยกน้ำ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังแยกน้ำ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนแยกน้ำ}} \times 100$$

3. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Horwitz, 2000)

วิธีการ

- 3.1 ชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด หลังอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักคงที่และทำให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 2 กรัมให้ได้น้ำหนักแน่นอนลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่มีฝาทำซ้ำ 3 ครั้ง
- 3.3 นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยเปิดฝาอะลูมิเนียม
- 3.4 นำออกจากตู้อบ โดยปิดฝากล้วยอะลูมิเนียม ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 3.5 ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 3.6 ทวนสอบด้วยการนำไปอบซ้ำนานครึ่งละ 1 ชั่วโมงจนได้น้ำหนักที่คงที่ ซึ่งค่าที่ได้ต้องไม่แตกต่างกัน 0.0050 กรัม ซึ่งได้เป็นน้ำหนักสุดท้าย
- 3.7 คำนวณปริมาณความชื้น (โดยน้ำหนักเปียกหรือ Wet basis)

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

4. วิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermal property)

ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของวุ้นกะทินั้นได้มีการเตรียมตัวอย่างโดยการนำผงอาหารผสมกับน้ำและกะทิใส่ในบีกเกอร์ที่ปิดปากบีกเกอร์ด้วยแผ่นอลูมิเนียม แล้วนำไปตั้งบนแท่นให้ความร้อน (hot plate) (Yellow line, Yellow Mag HS10, Germany) โดยทำการกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก โดยไม่มีการให้ความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 1100 rpm จากนั้นเทสารให้ความหวานลงไปกวนจนละลาย แล้วนำไปให้ความร้อนที่ 150 °C พร้อมกับปิดปากบีกเกอร์ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและกวนด้วยแท่งแม่เหล็กจนมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงนำตัวอย่างที่ได้แช่ในน้ำร้อนและภาชนะเก็บความร้อนเพื่อนำไปบรรจุลงใน Stainless pan ต่อไป โดยอัตราส่วนผสมของการเตรียมตัวอย่างได้แสดงดังตารางผนวกที่ ข.1

ตารางผนวกที่ ข.1 ร้อยละ (w/w) ของส่วนผสมในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวุ้นกะทิ

ส่วนผสม	สูตรควบคุม	น้ำตาลแอลกอฮอล์ : รีบาวดีไอโซต์ เอ		
		มอลทิทอล	ซอร์บิทอล	ไอโซมอลต์
ผงวุ้น	12	12	12	12
กะทิ	34	34	34	34
น้ำ	34.00	31.50	30.66	28.98
น้ำตาล	20.00	0	0	0
มอลทิทอล	0	22.50	0	0
ซอร์บิทอล	0	0	23.33	0
ไอโซมอลต์	0	0	0	25
รีบาวดีไอโซต์ เอ	0	0.005	0.015	0.025
รวม	100	100	100	100

หมายเหตุ : สูตรมอลทิทอลที่ใช้วิเคราะห์คือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 90:10, สูตรซอร์บิทอลที่ใช้วิเคราะห์คือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 70:30 และสูตรไอโซมอลต์ที่ใช้วิเคราะห์คือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50

5. วิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ ได้มีการเตรียมตัวอย่างด้วยการไม่เติมกะทิในส่วนผสม เนื่องจากไขมันจากกะทิบดบังโครงสร้างที่แท้จริงของตัวอย่างจึงไม่สามารถเติมกะทิในการวิเคราะห์ได้ดังแสดงในตารางผนวกที่ข.2 จากนั้นนำตัวอย่างมาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 วัน เพื่อกำจัดน้ำตาลทรายหรือสารให้ความหวาน และทำขึ้นตัวอย่างให้แห้งถึงจุดวิกฤตอย่างสมบูรณ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) (Telstar LyoQuest, Spain) ตัดขึ้นตัวอย่างเพื่อให้เห็นโครงสร้างภายในที่ชัดเจน เคลือบขึ้นตัวอย่างด้วยทอง (sputter coater) (Quorum SC7620, UK) โดยจ่ายกระแส 15 mA เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้หน้าไฟฟ้าก่อนนำไปเข้าเครื่อง จากนั้นสังเกตโครงสร้างในระดับจุลภาคของตัวอย่างด้วยโหมด High vacuum

ตารางผนวกที่ ข.2 ร้อยละ (w/w) ของส่วนผสมในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของวุ้นกะทิ

ส่วนผสม	สูตรควบคุม	น้ำตาลแอลกอฮอล์ : รีบาวติโอไซด์ เอ		
		มอลทิทอล	ซอร์บิทอล	ไอโซมอลต์
ผงวุ้น	1.36	1.36	1.36	1.36
น้ำ	75.55	72.70	71.74	69.84
น้ำตาล	22.72	0	0	0
มอลทิทอล	0	25.56	0	0
ซอร์บิทอล	0	0	26.51	0
ไอโซมอลต์	0	0	0	28.40
รีบาวติโอไซด์ เอ	0	0.006	0.017	0.028
เกลือ	0.34	0.34	0.34	0.34
กลีนิมะลิ	0.03	0.03	0.03	0.03
รวม	100	100	100	100

หมายเหตุ : สูตรมอลทิทอลที่ใช้วิเคราะห์คือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 90:10, สูตรซอร์บิทอลที่ใช้วิเคราะห์คือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 70:30 และสูตรไอโซมอลต์ที่ใช้วิเคราะห์คือ ที่อัตราส่วนการทดแทน 50:50

แบบทดสอบการประเมินการรับรู้รสชาติ

คำแนะนำ : กรุณาชิมตัวอย่างผลิตภัณฑ์วันกะทิลดน้ำตาลต่อไปนี้ โดยชิมตัวอย่างตามลำดับจากซ้ายไปขวาแล้วเขียนคำศัพท์อธิบายความรู้สึกของท่านในแต่ละตัวอย่าง (ให้สูตรน้ำตาลทรายคือ ตัวอย่างอ้างอิง R)

กรุณาเติมน้ำก่อนชิมตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง

สูตรมอลทิทอลต่อรีบัวดีไอซ์ เอ

อัตราส่วน 50:50

60:40

70:30

80:20

90:10

สูตรชอร์บิทอลต่อรีบัวดีไอซ์ เอ

อัตราส่วน 50:50

60:40

70:30

80:20

90:10

สูตรไอโซมอลต์ต่อรีบัวดีไอซ์ เอ

อัตราส่วน 50:50

60:40

70:30

80:20

90:10

ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความร่วมมือค่ะ

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในวุ้นกะทิ

1. การหาปริมาณของน้ำตาลทราย(กรัม) ตามอัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน

ตัวอย่างการคำนวณ (กรณีคิดอัตราส่วน 50:50)

สารละลายน้ำตาลทราย 100 กรัม ใช้น้ำตาลทราย 50 กรัม

สารละลายน้ำตาลทราย 75 กรัม ใช้น้ำตาลทราย $(75 \times 50) / 100 = 37.5$ กรัม

2. การหาปริมาณสารให้ความหวานให้มีความหวานเทียบเท่ากับน้ำตาลทรายตามอัตราส่วนที่ต่างกัน

2.1 อัตราส่วน 50:50 (น้ำตาลแอลกอฮอล์ : รีบาวดีไอโซต์ เอ)

2.1.1 มอลทิทอล (มีความหวาน 80% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย 80 กรัม เทียบเท่ามอลทิทอล 100 กรัม

ดังนั้น น้ำตาลทราย 37.5 กรัม เทียบเท่ามอลทิทอล $(37.5 \times 100) / 80 = 46.88$ กรัม

2.1.2 ซอร์บิทอล (มีความหวาน 60% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย 60 กรัม เทียบเท่าซอร์บิทอล 100 กรัม

ดังนั้น น้ำตาลทราย 37.5 กรัม เทียบเท่าซอร์บิทอล $(37.5 \times 100) / 60 = 62.5$ กรัม

2.1.3 ไอโซมอลต์ (มีความหวาน 40% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย 40 กรัม เทียบเท่าไอโซมอลต์ 100 กรัม

ดังนั้น น้ำตาลทราย 37.5 กรัม เทียบเท่าไอโซมอลต์ $(37.5 \times 100) / 40 = 93.75$ กรัม

2.1.4 รีบาวดีไอโซต์ เอ (มีความหวาน 400 เท่าของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย 100 กรัม เทียบเท่ารีบาวดีไอโซต์ เอ 0.25 กรัม

ดังนั้น น้ำตาลทราย 37.5 กรัม เทียบเท่ารีบาวดีไอโซต์ เอ $(37.5 \times 0.25) / 100 = 0.094$ กรัม

ตารางผนวกที่ ค.1 ปริมาณ (กรัม) ของน้ำตาลแอลกอฮอล์และรีบาวดีโอไซด์ เอที่อัตราส่วนการทดแทน (50:50)

อัตราส่วนการทดแทน (50:50)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
มอลทิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	46.88: 0.094
ซอร์บิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	62.50: 0.094
ไอโซมอลต์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ	93.75: 0.094

2.2 อัตราส่วน 60:40 (น้ำตาลแอลกอฮอล์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ)

2.2.1 มอลทิทอล (มีความหวาน 80% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	80	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	45	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	$(45 \times 100) / 80 = 56.25$	กรัม

2.2.2 ซอร์บิทอล (มีความหวาน 60% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	60	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	45	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	$(45 \times 100) / 60 = 75$	กรัม

2.2.3 ไอโซมอลต์ (มีความหวาน 40% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	40	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	45	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	$(45 \times 100) / 40 = 112.50$	กรัม

2.2.4 รีบาวดีโอไซด์ เอ (มีความหวาน 400 เท่าของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	100	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	0.25	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	30	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	$(30 \times 0.25) / 100 = 0.075$	กรัม

ตารางผนวกที่ ค.2 ปริมาณ (กรัม) ของน้ำตาลแอลกอฮอล์และรีบาวดีโอไซด์ เอที่อัตราส่วนการทดแทน (60:40)

อัตราส่วนการทดแทน (60:40)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
มอลทิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	56.25: 0.075
ซอร์บิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	75.00: 0.075
ไอโซมอลต์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ	112.50: 0.075

2.3 อัตราส่วน 70:30 (น้ำตาลแอลกอฮอล์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ)

2.3.1 มอลทิทอล (มีความหวาน 80% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	80	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	52.5	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	$(52.5 \times 100) / 80 = 65.63$	กรัม

2.3.2 ซอร์บิทอล (มีความหวาน 60% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	60	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	52.5	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	$(52.5 \times 100) / 60 = 87.5$	กรัม

2.3.3 ไอโซมอลต์ (มีความหวาน 40% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	40	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	52.5	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	$(52.5 \times 100) / 40 = 131.25$	กรัม

2.3.4 รีบาวดีโอไซด์ เอ (มีความหวาน 400 เท่าของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	100	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	0.25	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	22.5	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	$(22.5 \times 0.25) / 100 = 0.056$	กรัม

ตารางผนวกที่ ค.3 ปริมาณ (กรัม) ของน้ำตาลแอลกอฮอล์และรีบาวดีโอไซด์ เอที่อัตราส่วนการทดแทน (70:30)

อัตราส่วนการทดแทน (70:30)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
มอลทิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	65.63: 0.056
ซอร์บิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	87.50: 0.056
ไอโซมอลต์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ	131.25: 0.056

2.4 อัตราส่วน 80:20 (น้ำตาลแอลกอฮอล์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ)

2.4.1 มอลทิทอล (มีความหวาน 80% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	80	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	60	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	$(60 \times 100) / 80 = 75$	กรัม

2.4.2 ซอร์บิทอล (มีความหวาน 60% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	60	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	60	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	$(60 \times 100) / 60 = 100$	กรัม

2.4.3 ไอโซมอลต์ (มีความหวาน 40% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	40	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	60	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	$(60 \times 100) / 40 = 150$	กรัม

2.4.4 รีบาวดีโอไซด์ เอ (มีความหวาน 400 เท่าของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	100	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	0.25	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	15	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	$(15 \times 0.25) / 100 = 0.038$	กรัม

ตารางผนวกที่ ค.4 ปริมาณ (กรัม) ของน้ำตาลแอลกอฮอล์และรีบาวดีโอไซด์ เอที่อัตราส่วนการทดแทน (80:20)

อัตราส่วนการทดแทน (80:20)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
มอลทิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	75.00: 0.038
ซอร์บิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	100.00: 0.038
ไอโซมอลต์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ	150.00: 0.038

2.5 อัตราส่วน 90:10 (น้ำตาลแอลกอฮอล์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ)

2.5.1 มอลทิทอล (มีความหวาน 80% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	80	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	67.5	กรัม	เทียบเท่ามอลทิทอล	$(67.5 \times 100) / 80 = 84.38$	กรัม

2.5.2 ซอร์บิทอล (มีความหวาน 60% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	60	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	67.5	กรัม	เทียบเท่าซอร์บิทอล	$(67.5 \times 100) / 60 = 112.50$	กรัม

2.5.3 ไอโซมอลต์ (มีความหวาน 40% ของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	40	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	100	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	67.5	กรัม	เทียบเท่าไอโซมอลต์	$(67.5 \times 100) / 40 = 168.75$	กรัม

2.5.4 รีบาวดีโอไซด์ เอ (มีความหวาน 400 เท่าของน้ำตาลทราย)

น้ำตาลทราย	100	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	0.25	กรัม
ดังนั้น น้ำตาลทราย	7.5	กรัม	เทียบเท่ารีบาวดีโอไซด์ เอ	$(7.5 \times 0.25) / 100 = 0.019$	กรัม

ตารางผนวกที่ ค.5 ปริมาณ (กรัม) ของน้ำตาลแอลกอฮอล์และรีบาวดีโอไซด์ เอที่อัตราส่วนการทดแทน (90:10)

อัตราส่วนการทดแทน (90:10)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
มอลทิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	84.38: 0.019
ซอร์บิทอล : รีบาวดีโอไซด์ เอ	112.50: 0.019
ไอโซมอลต์ : รีบาวดีโอไซด์ เอ	168.75: 0.019



ภาคผนวก ง

ข้อมูลตัวอย่างวุ้นกะทิสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

ตารางผนวกที่ ง.1 ข้อมูลค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่ไม่เติมกะทิสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

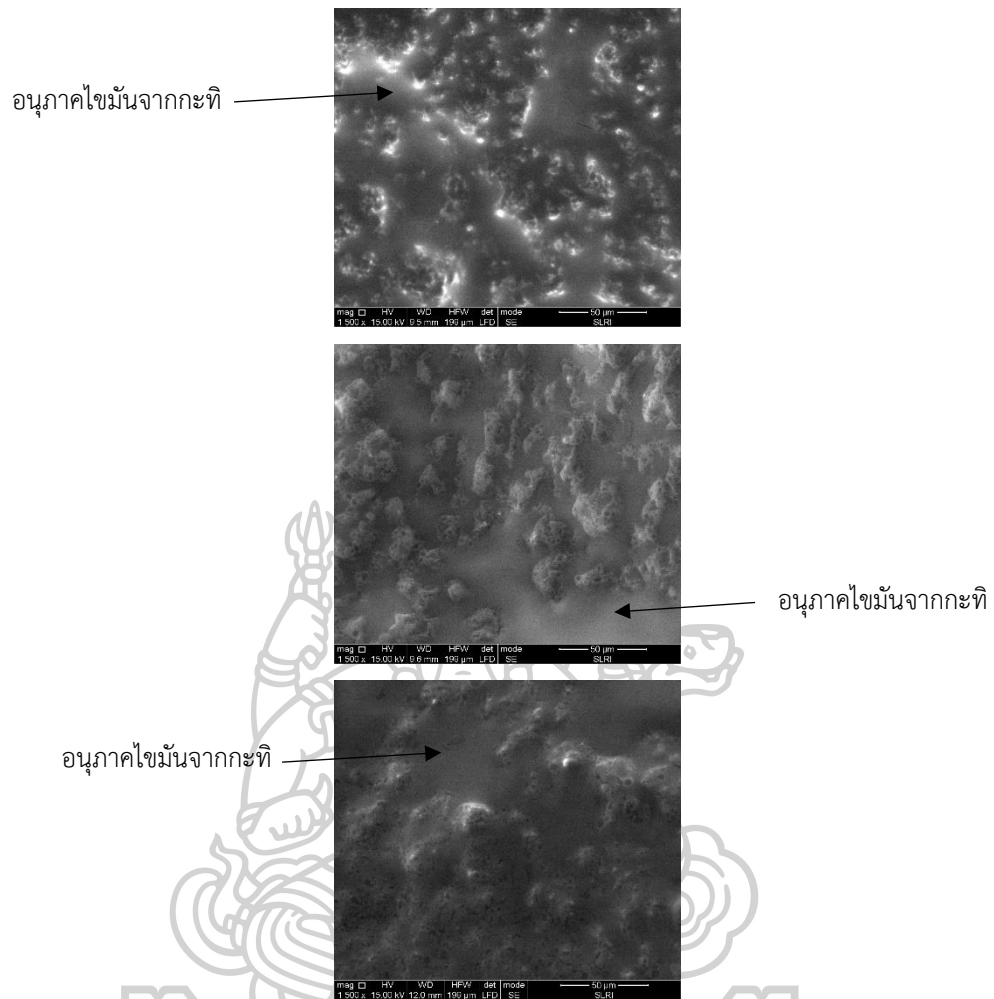
ชนิดของสารให้ความหวาน	ค่าลักษณะเนื้อสัมผัส	
	ค่า Hardness (N)	ค่า Chewiness (N-mm)
สูตรควบคุม (น้ำตาลซูโครส)	14.818±0.149 ^a	2.615±0.106 ^a
สูตรมอลทิทอลต่อรีบาวติโอไซด์ เอ (90:10)	12.304±0.151 ^c	2.047±0.066 ^d
สูตรซอร์บิทอลต่อรีบาวติโอไซด์ เอ (70:30)	12.967±0.090 ^b	2.227±0.101 ^c
สูตรไอโซมอลต์ต่อรีบาวติโอไซด์ เอ (50:50)	14.642±0.141 ^a	2.419±0.061 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p<0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

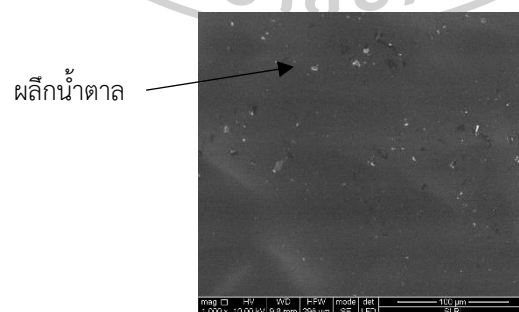
ตารางผนวกที่ ง.2 ข้อมูลค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมดของตัวอย่างที่ไม่เติมกะทิสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

ชนิดของสารให้ความหวาน	ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด ($^{\circ}$ Brix)
สูตรควบคุม (น้ำตาลซูโครส)	30.0±0.50 ^d
สูตรมอลทิทอลต่อรีบาวติโอไซด์ เอ (90:10)	31.5±0.23 ^c
สูตรซอร์บิทอลต่อรีบาวติโอไซด์ เอ (70:30)	32.6±0.07 ^b
สูตรไอโซมอลต์ต่อรีบาวติโอไซด์ เอ (50:50)	34.6±0.26 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p<0.05$) และค่าหลังเครื่องหมาย \pm หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ



ภาพผนวกที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวุ้นกะทิที่กำลังขยาย 1500 เท่า



ภาพผนวกที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างที่ไม่เติมกะทิและไม่ได้กำจัดน้ำตาลหรือสารให้ความหวานที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสและค่าการแยกน้ำของตัวอย่างวุ้นกะทิ

ตารางผนวกที่ จ.1 ข้อมูลค่าความแข็งของเจล (Hardness) (N) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวติโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	5.598±0.314 ^a	5.598±0.314 ^a	5.598±0.314 ^a
50:50	4.517±0.240 ^{d C}	4.734±0.159 ^{c B}	5.660±0.225 ^{a A}
60:40	4.794±0.173 ^{c C}	5.102±0.196 ^{b B}	5.379±0.340 ^{b A}
70:30	5.016±0.212 ^{b B}	5.146±0.185 ^{b A}	5.047±0.196 ^{c B}
80:20	5.023±0.163 ^{b A}	5.058±0.181 ^{b A}	4.997±0.238 ^{c A}
90:10	5.100±0.113 ^{b A}	4.824±0.129 ^{c B}	4.084±0.319 ^{d C}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง (p<0.05) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน (p<0.05) และค่าหลังเครื่องหมาย ± หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ตารางผนวกที่ จ.2 ข้อมูลค่าพลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร (Chewiness) (N·mm) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

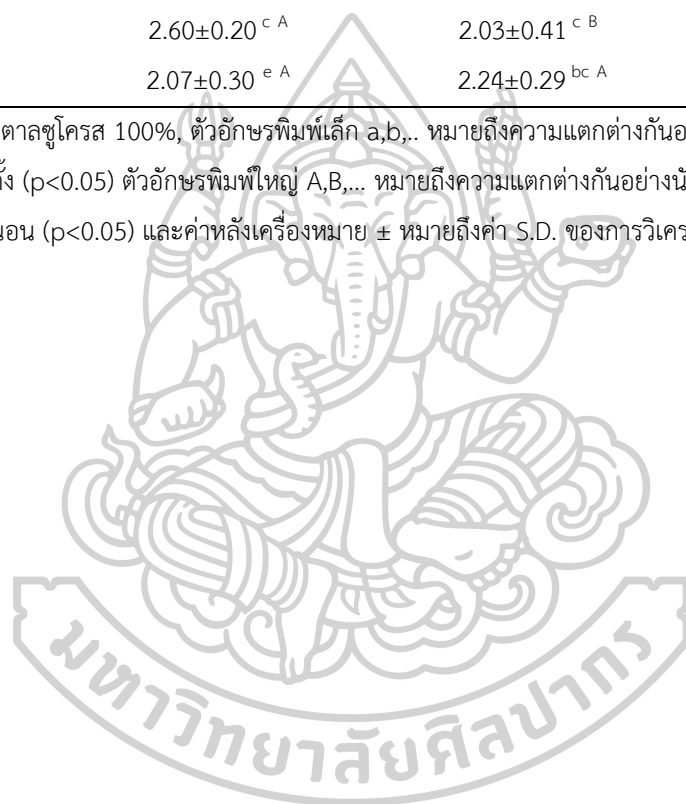
อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวติโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	1.334±0.080 ^a	1.334±0.080 ^a	1.334±0.080 ^a
50:50	1.029±0.055 ^{e C}	1.113±0.046 ^{d B}	1.343±0.052 ^{a A}
60:40	1.104±0.044 ^{d C}	1.222±0.059 ^{b B}	1.297±0.080 ^{b A}
70:30	1.182±0.055 ^{c C}	1.238±0.042 ^{b B}	1.266±0.060 ^{b A}
80:20	1.193±0.045 ^{b C A}	1.207±0.058 ^{b A}	1.217±0.053 ^{c A}
90:10	1.219±0.041 ^{b A}	1.166±0.065 ^{c B}	0.930±0.086 ^{d C}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง (p<0.05) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน (p<0.05) และค่าหลังเครื่องหมาย ± หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ตารางผนวกที่ จ.3 ข้อมูลค่าการแยกน้ำ (Syneresis) (%) ของวุ้นกะทิที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวานแตกต่างกัน

อัตราส่วนการทดแทนสารให้ความหวาน (%)	มอลทิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ซอร์บิทอล:ริบาวติโอไซด์ เอ	ไอโซมอลต์:ริบาวติโอไซด์ เอ
0:0 (สูตรควบคุม)*	2.32±0.38 ^d	2.32±0.38 ^b	2.32±0.38 ^a
50:50	3.14±0.19 ^{a A}	2.81±0.21 ^{a B}	2.16±0.39 ^{a C}
60:40	2.90±0.32 ^{b A}	2.08±0.16 ^{c B}	1.81±0.35 ^{b C}
70:30	2.66±0.44 ^{c A}	1.81±0.27 ^{d B}	1.48±0.22 ^{c C}
80:20	2.60±0.20 ^{c A}	2.03±0.41 ^{c B}	0.94±0.49 ^{d C}
90:10	2.07±0.30 ^{e A}	2.24±0.29 ^{bc A}	0.56±0.31 ^{e B}

หมายเหตุ : *น้ำตาลซูโครส 100%, ตัวอักษรพิมพ์เล็ก a,b,.. หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง (p<0.05) ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ A,B,... หมายถึงความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวนอน (p<0.05) และค่าหลังเครื่องหมาย ± หมายถึงค่า S.D. ของการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ



ภาคผนวก ฉ

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีเพียร์สันของตัวอย่างวุ้นกะทิ

ตารางผนวกที่ ฉ.1 ค่าการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีเพียร์สันของค่า Hardness และค่า Chewiness

Correlations

		Hardness	Chewiness
Hardness	Pearson Correlation	1	.975**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	16	16
Chewiness	Pearson Correlation	.975**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	16	16

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

ตารางผนวกที่ ฉ.2 ค่าการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีเพียร์สันของค่า Hardness และค่า Syneresis

Correlations

		Hardness	Syneresis
Hardness	Pearson Correlation	1	-.614*
	Sig. (2-tailed)		.034
	N	12	12
Syneresis	Pearson Correlation	-.614*	1
	Sig. (2-tailed)	.034	
	N	12	12

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวอังคิมา ศิริวัฒนาศิลป์
วัน เดือน ปี เกิด	26 มีนาคม 2541
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2562 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2563 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	49/210 ถนนนพวิทยาราชบุรี 37 แขวงสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510
ผลงานตีพิมพ์	อังคิมา ศิริวัฒนาศิลป์ และประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ. 2564. ผลของการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำตาลไซโคสต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิ. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 11 เรื่อง "วิจัยและนวัตกรรมเพื่อเตรียมพร้อมรับการเปลี่ยนแปลง", 24-25 มิ.ย. 2564 มหาวิทยาลัยศิลปากร อังคิมา ศิริวัฒนาศิลป์ และประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ. 2565. ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาล. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 12 เรื่อง "บัณฑิตวิจัย สร้างสรรค์ และนวัตกรรม : การขับเคลื่อนสังคมเข้าสู่ยุคปกติใหม่ด้วยองค์ความรู้", 23-24 มิ.ย. 2565 มหาวิทยาลัยศิลปากร
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ. 2562 ได้รับ "รางวัลรองชนะเลิศอันดับ 1" และรางวัล "ออกแบบบรรจุภัณฑ์ยอดเยี่ยม" จากการแข่งขัน Food Innovation Contest 2019 ซึ่งจัดโดย สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหารแห่งประเทศไทย (FoSTAT)