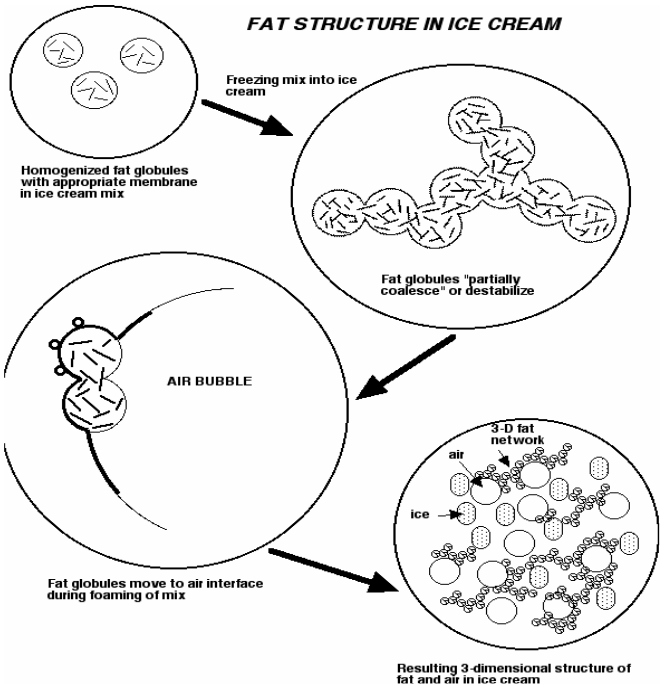
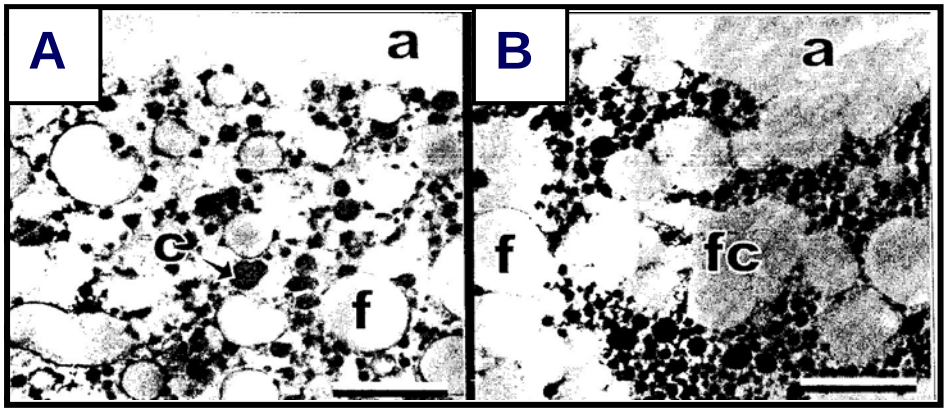
2.2 โครงสร้างและความสำคัญของไขมันในไอศกรีม

หลังจากที่ไอศกรีมเหลวผ่านกระบวนการโฮโมจิไนซ์เม็ดไขมันมีขนาดเล็กลงทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวของเม็ดไขมัน ในระหว่างกระบวนการบ่มไอศกรีมเหลว เม็ดไขมันเกิดผลึกโครงสร้างที่ซับซ้อนของผลึกรูปเข็ม (needle – like crystals) ผลึกไขมันที่เกิดขึ้นจะแทงผนังของเม็ดไขมันทำให้ไขมันเหลวไหลออกมาเชื่อมเม็ดไขมันที่อยู่ใกล้เคียงกัน ทำให้เม็ดไขมันเกาะกันเป็นกลุ่ม (clump) เชื่อมโยงกันเป็นสาย กระบวนการนี้เรียกว่า partial coalescence (ภาพที่ 5) ทำให้เซลล์อากาศที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการปั่นไอศกรีมสามารถคงอยู่ได้ หลังจากนำไอศกรีมเหลวที่ผ่านกระบวนการบ่มไปผ่านกระบวนการปั่นเยือกแข็ง (freezing) และเติมอากาศ (whipping) เซลล์อากาศถูกหุ้มด้วยชั้นของเม็ดไขมัน (Krog, 1998) ดังนั้นโครงสร้างของไอศกรีมจึงประกอบด้วยเซลล์อากาศซึ่งมีเม็ดไขมันล้อมรอบ และมีผลึกน้ำแข็งกระจายตัวอยู่ในส่วนของของเหลวที่ไม่แข็งตัว โครงสร้างของไอศกรีมดังกล่าวส่งผลต่อลักษณะปรากฏที่ดี มีความแห้ง ให้ความรู้สึกในปาก (mouth feel) ที่ดีและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 5 การเกิดโครงสร้างร่างแหของเม็ดไขมัน (Fat globules network)ในไอศกรีม
ที่มา: Goff (2004)

กระบวนการ partial coalescence หรือ fat destabilization ของเม็ดไขมันในไอศกรีมเกิดได้ดีเมื่อเติมสารช่วยลดแรงตึงผิว (surfactant) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างของไขมันในไอศกรีมเมื่อไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์ (A) และเติมอิมัลซิไฟเออร์ (B) โดยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน

a = air bubble, f = fat globule, c = casein micelle, fc = fat cluster ; bar = 1 ไมโครเมตร

ที่มา : Goff *et al.* (1999)

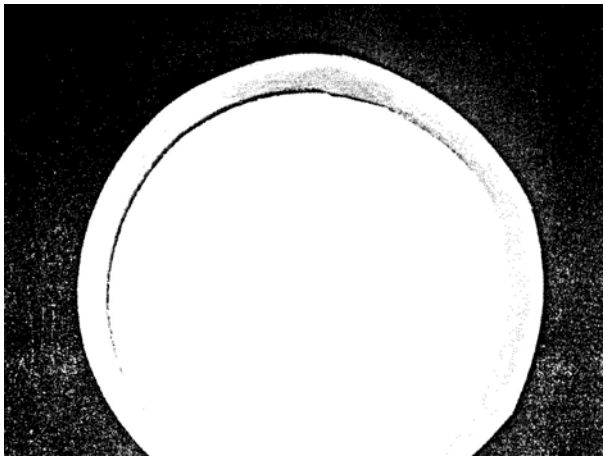
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไอศกรีมที่เติมอิมัลซิไฟเออร์กับไอศกรีมที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์พบว่าทรีทเมนต์ที่ไม่เติมอิมัลซิไฟเออร์เม็ดไขมันกระจายทั่วไปในเฟสของเหลวที่ไม่แข็งตัวเกิด fat destabilization น้อยกว่าทรีทเมนต์ที่เติมอิมัลซิไฟเออร์ ดังนั้นหน้าที่หลักของอิมัลซิไฟเออร์คือทำให้เม็ดไขมันไม่คงตัวขณะปั่นเยือกแข็งไอศกรีม เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์ช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างเม็ดไขมันจึงสามารถมารวมกันเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหของเม็ดไขมันได้ดี (Goff and Jordan, 1989)

2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับไอศกรีมลดไขมัน

ไอศกรีมลดไขมันมีความสามารถในการต้านการเกิด heat shock ต่ำ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาไอศกรีมหรือระหว่างการขนส่งเปลี่ยนแปลงขึ้น– ลง ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กมีความเสถียรน้อยกว่าผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กละลายและไปรวมกับผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น (recrystallization) ส่งผลให้ไอศกรีมมีเนื้อ

สัมผัสที่หยาบขึ้น (Walstra and Jonkman, 1998) หากเกิด heat shock หลาย ๆ ครั้ง อาจทำให้ไอศกรีมเกิดการยุบตัวลงเรียกว่า shrinkage

ไอศกรีมลดไขมันมีโครงสร้างร่างแหของไขมันที่ล้อมรอบเซลล์อากาศน้อย เซลล์อากาศขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่มาเชื่อมกันเป็นเซลล์อากาศขนาดใหญ่ได้ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งไอศกรีมและระหว่างการเก็บรักษาไอศกรีม (Marshall *et al.*,2003) เนื่องจากแรงดันภายในเซลล์อากาศขนาดเล็กมากกว่าเซลล์อากาศขนาดใหญ่ทำให้สามารถรวมกันเป็นเซลล์อากาศขนาดใหญ่ มีผลให้โครงสร้างของไอศกรีมมีปริมาตรลดลง ไอศกรีมยุบตัว (collapse) หรือเรียกว่า shringkage แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การยุบหรือหดตัว (shrinkage) ของไอศกรีมไขมันต่ำ
ที่มา: Marshall *et al.* (2003)

การลดไขมันในสูตรไอศกรีมทำให้ไอศกรีมมีคุณภาพด้อยลงในด้านลักษณะปรากฏ ไอศกรีมเป็นเกล็ดน้ำแข็งมากขึ้นทำให้เนื้อสัมผัสหยาบ ความรู้สึกในปากด้อยลง และการรับกลิ่นรสไม่ดี เนื่องจากไขมันเป็นตัวพากลิ่นรส (flavour carrier) และหน่วงกลิ่นรสที่เติมลงไปในไอศกรีมระหว่างละลายในปาก ไขมันนมที่ใช้ในไอศกรีมยังเป็นแหล่งของกลิ่นรสที่ดีของไอศกรีม สารให้กลิ่นรสส่วนใหญ่อยู่ในรูปกรดไขมัน เอสเทอร์ของกรดไขมัน แลคโทน และสารประกอบคาร์บอนิลเป็นต้น (De Roos, 1997) ไอศกรีมลดไขมันมีแนวโน้มที่กลิ่นรสจะถูกปลดปล่อยออกมาเร็วและจางหายไปอย่างรวดเร็ว ไอศกรีมลดไขมันจึงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พัฒนาปรับปรุงไอศกรีมลดไขมันโดยใช้สารทดแทนไขมัน

3. สารทดแทนไขมัน ประเภทของสารทดแทนไขมัน แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) สารทดแทนไขมันที่ผลิตจากไขมัน (Fat – based fat replacer)

เป็นสารที่ได้จากการปรับปรุงโครงสร้างไขมันหรือเลียนแบบไขมันตามธรรมชาติ สามารถทนต่อการย่อยของน้ำย่อยในร่างกาย จึงไม่ให้พลังงานหรือให้พลังงานน้อยมาก ตัวอย่าง เช่น Olestra, EPG (esterification propoxylate glycerol), DDM (dialkyl dihexadecylmalonate), TATCA (trialkoxytricarballylate) เป็นต้น (White, 1993)

2) สารทดแทนไขมันที่ผลิตจากโปรตีน (Protein– based fat replacer)

สารทดแทนไขมันที่ผลิตจากโปรตีนมีโมเลกุลขนาดเล็กจำนวนมากจึงให้ความรู้สึกคล้ายครีม สูตรทางโครงสร้างเคมีมีพันธะไดซัลไฟด์จึงสามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้ ผลิตจากโปรตีนนมและไข่ซึ่งแยกไขมันออกแล้ว ได้แก่ Simplesse®, Prolo 11 เป็นต้น สารทดแทนไขมันที่ผลิตจากโปรตีน 1 กรัม ผสมน้ำ 2 กรัม สามารถทดแทนไขมันได้ 3 กรัม ลดพลังงานจาก 27 กิโลแคลอรี เป็น 4 กิโลแคลอรี (Anonymous, 1990)

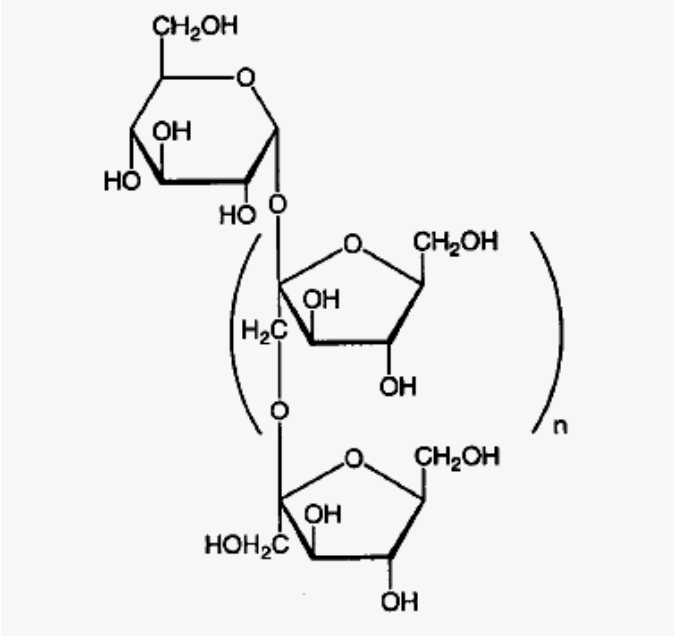
3) สารทดแทนไขมันที่ผลิตจากคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate – based fat replacer)

เป็นสารทดแทนไขมันกลุ่มใหญ่ที่สุด ได้แก่ กัม สารจำพวกเซลลูโลส อินูลิน เป็นต้น สารกลุ่มนี้สามารถเลียนแบบพฤติกรรมบางอย่างของไขมัน เช่น ให้ความหนืดแก่ไอศกรีมเหลวทำให้โฟมคงตัว ควบคุมการเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็งและควบคุมการแยกตัวของน้ำ สารทดแทนไขมันที่ผลิตจากคาร์โบไฮเดรต 1 กรัม ผสมน้ำ 3 กรัม สามารถทดแทนไขมันได้ 4 กรัม ลดพลังงานจาก 36 กิโลแคลอรีเป็น 4 กิโลแคลอรี (Marshall and Arbuckle,1996)

4. อินูลิน (Inulin)

4.1 โครงสร้างของอินูลิน

อินูลินเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตชนิดสะสม (storage polysaccharide) และเป็นโพลิเมอร์ของฟรุกแตน (polydispersed fructan) ที่มี DP (degree of polymerization) อยู่ระหว่าง 2 – 60 ส่วนมากจะเป็นเส้นตรงโดยโมเลกุลของฟรุกโตสจับกันด้วยพันธะ ß – D (2⟶1) fructofuranosyl และอาจมีโมเลกุลของกลูโคสจับอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุล (ภาพที่ 8) สูตรโครงสร้างทั่วไปคือ GFn โดยที่ G หมายถึงโมเลกุลของกลูโคส F หมายถึงโมเลกุลของฟรุกโตส และ n หมายถึงจำนวนโมเลกุลของฟรุกโตส ส่วนโพลิเมอร์ที่มี DP ต่ำ คือระหว่าง 2 – 20 มักเรียกว่าฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo – oligosaccharide) หรือฟรุกโตชูการ์ (fructo sugar) หรือโอลิโกฟรุกโตส (oligofructose) (Roberfriod ,1993)



ภาพที่ 8 โครงสร้างโมเลกุลของอินูลิน

ที่มา: Phillips and Williams (2000)

4.2 แหล่งที่พบ

อินูลินพบในพืชสายพันธุ์ *Liliales* เช่น Leek, Onion, Garlic และ Asparagus หรือสายพันธุ์ *Compositae* เช่น Jerusalem Artichoke และ Chicory อินูลินทำหน้าที่เหมือนคาร์โบไฮเดรตสำรองที่เก็บไว้เพื่อให้พืชมีชีวิตอยู่ได้ในช่วงฤดูหนาว (Roberfriod, 1993) ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงปริมาณอินูลิน และโอลิโกฟรุกโตสในพืชผักต่าง ๆ Jerusalem Artichoke และ Chicory จัดเป็นพืชที่มีปริมาณอินูลินสูงมากกว่าร้อยละ 15 จึงเป็นวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะ Chicory มีชื่อทางวิทยาศาตร์ว่า *Cichorium intybus* จัดเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตในปัจจุบัน Chicory มีรูปร่างหน้าตาเหมือน sugar beets (ภาพที่ 9) มีปริมาณอินูลินค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้ง) และมีปริมาณอินูลินค่อนข้างคงที่ในแต่ละปี (Orafti, 1998)

ภาพที่ 9 ลักษณะทั่วไปของ Chicory (*Cichorium intybus*)

ที่มา: Institute of Agriculture and Natural Resources (2004)

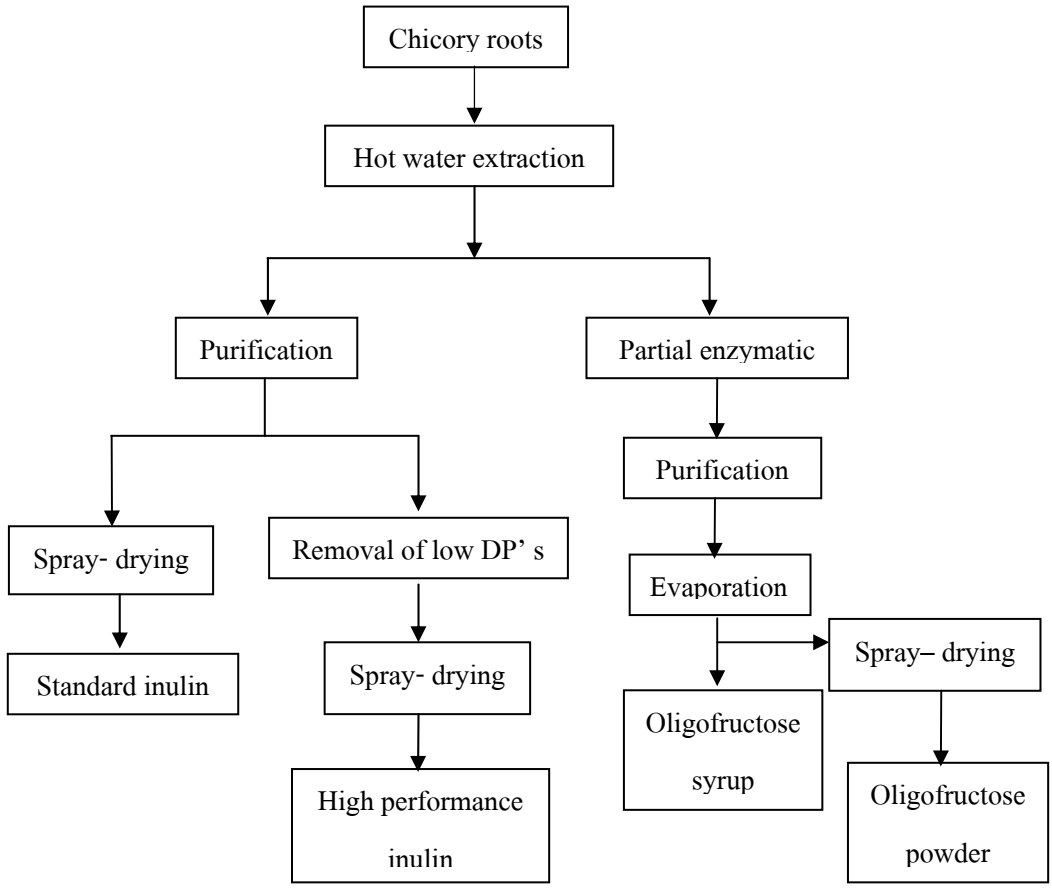
ตารางที่ 2 ปริมาณของอินูลินและโอลิโกฟรุกโตสในพืชผักต่าง ๆ

แหล่ง	อินูลิน (%)	โอลิโกฟรุกโตส (%)
Wheat	1 – 6	1 – 4
Onion	2 – 10	2 – 6
Leek	3 – 16	2 – 15
Garlic	9 – 11	3 – 6
Banana	0.3 – 0.7	0.3 – 0.7
Asparagus shoot	1 – 4	2 – 3
Jerusalem artichoke	16 – 20	16 – 20
Chicory	15 – 20	5 – 10

ที่มา: Coussement (1999)

4.3 การผลิตอินูลิน

อินูลินและโอลิโกฟรุกโตสเป็นส่วนหนึ่งของอาหารที่มนุษย์บริโภคอยู่ตามปกติ จากหลักฐานข้อมูลการบริโภคอาหารจากพืชหลายชนิด พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วคนยุโรปบริโภค 2 – 10 กรัม/ คน/ วัน และคนอเมริกันบริโภค 1– 4 กรัม/ คน/ วัน ระหว่างต้น ค.ศ. 1990 มีความพยายามสกัดและทำให้อินูลินและโอลิโกฟรุกโตสบริสุทธิ์เพื่อใช้เป็นแหล่งใยอาหารเสริม ปัจจุบันนี้สามารถนำอินูลินและโอลิโกฟรุกโตสที่อยู่ในรูปบริสุทธิ์มาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด และมีการอธิบายการผลิตอินูลินครั้งแรกในปี ค.ศ. 1920 โดย Schone ซึ่งเป็นผู้รายงานการทดสอบในระดับนำร่องไว้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1927 Belval ได้กล่าวถึงการผลิตในระดับอุตสาหกรรม จากนั้นในปี ค.ศ. 1931 บริษัท Affinerie Tirlemontoise (เมือง Tienen, ประเทศเบลเยียม) ได้จดสิทธิบัตรเรื่องการปรับปรุงกระบวนการสกัดอินูลิน ปัจจุบันได้มีการผลิตอินูลินเพื่อเป็นส่วนผสมอาหารในอุตสาหกรรมมามากกว่าหนึ่งทศวรรษ (ภาพที่ 10) (Orafti, 1998)



ภาพที่ 10 กระบวนการผลิตอินูลินในระดับอุตสาหกรรม
ที่มา: Orafti (1998)

การผลิตอินูลินในระดับอุตสาหกรรมสกัดจากรากของต้นชิโครี (ดังภาพที่ 10) กระบวนการคล้ายคลึงกับการสกัดน้ำตาลจากหัว sugar beets (วิธีการแพร่กระจายในน้ำร้อน) การทำให้บริสุทธิ์ใช้เทคโนโลยีในอุตสาหกรรมน้ำตาลและแป้ง (เช่น ion– exchange) แล้วตามด้วยการระเหยและการทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray– drying) อินูลินและโอลิโกฟรุกโตสที่สกัดได้จากต้นชิโครีมีลักษณะเป็นผงสีขาวมีความบริสุทธิ์สูง ปราศจากกลิ่นไม่พึงประสงค์ (off– flavour หรือ aftertase)

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะเจลของอินูลิน

คุณสมบัติด้านกายภาพของเจลจากอินูลินสามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก Degree of Polymerization ของอินูลิน (DP) ความเข้มข้นของอินูลิน วิธีการเตรียม อุณหภูมิ และการเติมไฮโดรคอลลอยด์พวกกัม เป็นต้น (Baal,1993)

Van Duynhoven *et al.* (1999) ศึกษากลไกในการเกิดเจลของสารละลายอินูลิน 3 สภาวะ คือ ความเข้มข้นร้อยละ 30 เตรียมเจลที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นร้อยละ 3 เตรียมเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นร้อยละ 35 เตรียมเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 2 นาทีเท่ากันพบว่าการเตรียมเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนั้นการละลายของอินูลินไม่สมบรูณ์เนื่องจากพบนิวคลีไอ (nuclei) ในสารละลาย นิวคลีไอนี้มีส่วนช่วยในการเกิดผลึกในระหว่างเกิดเจลทำให้เกิดเจลได้ง่ายกว่าการเตรียมที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส การละลายของอินูลินเกิดขึ้นอย่างสมบรูณ์เกิดลักษณะ liquid – like component เมื่อตั้งไว้ 60 นาทีในระหว่างการรอให้เกิดเจลและเกิด crosslinked network ของโพลิเมอร์และบริเวณ crystalline region ทำให้โครงสร้างของเจลแข็งแรงขึ้น และพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำเกิดโครงสร้างโพลิเมอร์ของเจลได้น้อยทำให้ความแน่นแข็งของเจล (gel firmness) น้อยกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายสูง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในการเตรียมเจลของอินูลิน ปริมาณของสภาพของแข็ง (solid – like component) นั้นมีผลต่อความเร็วในการเกิดเจล โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเตรียมเจล ถ้าอุณหภูมิสูงอินูลินละลายได้สมบูรณ์จะใช้เวลาในการเกิด (set) เจลนานกว่าการเตรียมเจลโดยใช้อุณหภูมิต่ำ

นอกจากนั้นคุณสมบัติของเจลอินูลินสามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดโมโน– และได– วาเลนต์แคทไอออน (mono – and di – valent cations) เช่น การใช้เจลาติน เจลแลนกัม (gellan gum) อัลจิเนต คาราจีแนน มอลโตเดกซ์ตริน อย่างใดอย่างหนึ่งร่วมกับอินูลินทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้นและมีลักษณะแตกต่างไปจากการใช้ไฮโดรคอลลอยด์หรืออินูลินเพียงอย่างเดียว (Morris and Brownsey, 1995) ไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดมีหน้าที่เฉพาะในผลิตภัณฑ์อาหารไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดอาจทำหน้าที่เพียงอย่างเดียว เช่น เป็นสารเพิ่มความหนืด แต่บางชนิดสามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่าง เช่น เป็นทั้งสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว และเป็น gelling agent ด้วย (นิธิยา, 2545) ในกระบวนการผลิตไอศกรีมมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ซึ่งเรียกว่าสารให้ความคงตัว หากใช้ร่วมกับอินูลินอาจมีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเจลของอินูลินและมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมด้วย สารให้ความ

คงตัวแต่ละชนิดมีลักษณะเด่นและด้อยแตกต่างกัน ในทางการค้ามักผสมสารให้ความคงตัวและอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ร่วมกันในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะตามต้องการ (Marshall *et al.*,2003)

4.5 คุณประโยชน์ทางด้านโภชนาการ

เนื่องจากโมเลกุลของอินูลินประกอบด้วยพันธะ ß – D (2⟶1) fructofuranosyl ซึ่งร่างกายมนุษย์ไม่มีเอนไซม์สำหรับย่อยพันธะนี้เมื่ออินูลินผ่านทางเดินอาหาร ได้แก่ปาก กระเพาะอาหาร และลำไส้เล็ก อินูลินจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ดังนั้นอินูลินมีคุณสมบัติเป็นเส้นใยอาหารช่วยบรรเทาอาการท้องผูกและเพิ่มน้ำหนักของอุจจาระทำให้สามารถถ่ายได้ง่าย จาก metabolic pathway อินูลินให้ค่าแคลอรีต่ำ แคลอรีที่ได้ขึ้นอยู่กับกรดไขมัน เช่น กรดบิวทิริค ซึ่งร่างกายดูดซึมไปใช้บางส่วนให้พลังงานประมาณ 1.50 kcal/g (หรือ 6.30 kJ /g) การที่อินูลินไม่ถูกย่อยในทางเดินอาหาร คนที่เป็นโรคเบาหวานจึงสามารถรับประทานอินูลินได้เพราะไม่มีผลกระทบต่อการหลั่ง Glycemia, Glucagon, และInsulin (Roberfriod and Delzenne, 1998) อินูลินผ่านทางเดินอาหารเข้าสู่ลำไส้ใหญ่ซึ่งเป็นบริเวณที่มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่เป็นจำนวนมากและเกิดกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์กลุ่ม Bifidobacteria ซึ่งจัดเป็นจุลินทรีย์กลุ่มโพรไบโอติก (probiotic) ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายทำให้เกิดกรดแลกติก กรดไขมันสายสั้น (Short Chain Fatty Acids, SCFA) เช่น อะซิเตต โพรไพโอเนต บิวทิเรต และก๊าซบางชนิด เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน (Roberfroid, 1993) โดยทั่วไปคุณสมบัติของเส้นใยอาหารสามารถจับกับไอออนของโลหะและพบว่าเส้นใยอาหารจะลดการดูดซึมแร่ธาตุของลำไส้เล็ก แต่กรดที่เกิดขึ้นทำให้ความเป็นกรด – ด่างของลำไส้ลดลง 1– 2 หน่วย มีผลให้การละลายของเกลือของแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น แคลเซียมฟอสเฟตเพิ่มขึ้น และบิวทิเรตที่เกิดขึ้นช่วยกระตุ้นให้เซลล์เยื่อบุลำไส้แผ่กระจายทั่ว จึงทำให้ความสามารถในการดูดซึมของเซลล์เยื่อบุลำไส้เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นระหว่างกระบวนการหมักสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอินูลินและแร่ธาตุสลายลงทำให้แร่ธาตุถูกปล่อยออกมาจึงสามารถดูดซึมได้ดี (Roberfroid, 1993)

5. การใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันในไอศกรีม

อินูลินจัดเป็นสารทดแทนไขมันในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต(carbohydrate– based fat substitutes) เช่นเดียวกับพวกแซนแทนกัม กัวกัม คาราจีแนน เป็นต้น อินูลินสามารถละลายน้ำได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยเฉพาะตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียส ขึ้นไปการละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่อินูลินสามารถละลายได้สมบูรณ์ที่ 85 องศาเซลเซียส เนื่องจากการให้ความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปโดยโครงสร้างจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (disordered conformation) มากขึ้น (Doublier and Cuvelier, 1996) อินูลินสามารถกระจายตัวในน้ำได้ (dispersible) สามารถรวมตัวได้ดีกับน้ำ แต่บางครั้งอาจจับตัวเป็นก้อน (clump) ได้เนื่องจากอินูลินมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดี (hygroscopic characteristic) ดังนั้นเมื่อใช้อินูลินควรผสมอินูลินกับน้ำตาลทรายหรือหางนมผงให้เข้ากันก่อนนำไปใช้เพื่อช่วยในการกระจายตัวของสารให้เข้ากันดี (Silva,1996)

อินูลินสามารถจับกับโมเลกุลน้ำและเกิดโครงสร้างเจล (gel – like network) จึงช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการไหล (rheology) ของไอศกรีมเหลวและปรับปรุงเนื้อสัมผัส (texture) ของ ไอศกรีม Gel–Nagar *et al.* (2002) ผลิตไอศกรีมโยเกิร์ตลดไขมันจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก) พบว่าไอศกรีมเหลวมีความหนืด (consistency index) ต่ำลง ไอศกรีมมีความเหนียว (stickiness) ลดลงและมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง (hardness) กว่าไอศกรีมที่มีไขมันสูง แต่การเติมอินูลินร้อยละ 5, 7 และ 9 (โดยน้ำหนัก) ในไอศกรีมลดไขมันทำให้ไอศกรีมเหลวมีความหนืดเพิ่มขึ้น และทำให้ไอศกรีมมีความเหนียวขึ้น ช่วยเพิ่มความรู้สึกเวลาเคี้ยวเมื่อเทียบกับไอศกรีมโยเกิร์ตลดไขมันที่ไม่เติมอินูลิน การเติมอินูลินร้อยละ 7 และ 9 (โดยน้ำหนัก) ช่วยลดอัตราการละลายของไอศกรีมลงเมื่อเทียบกับไอศกรีมโยเกิร์ตลดไขมันที่ไม่ได้เติมอินูลิน นอกจากนี้การเติมอินูลินช่วยลดความหยาบ (coarse/ icy) ทำให้ไอศกรีมลดไขมันมีเนื้อสัมผัสที่เนียนขึ้น ความแข็ง (hardness) และความรู้สึกสากเหมือนเม็ดทราย (sandy) ลดลงและให้ความรู้สึกลื่นมันในปาก (greasy) ใกล้เคียงกับไอศกรีมไขมันสูง

จากคุณสมบัติของอินูลินทั้งด้านกายภาพและคุณประโยชน์ด้านโภชนาการดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้ศึกษาสนใจที่จะนำอินูลินเป็นส่วนผสมในการพัฒนาสูตรไอศกรีมลดไขมันเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีความสมดุลทางด้านโภชนาการและประสาทสัมผัส และการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของไอศกรีมเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพของไอศกรีมลดไขมัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

น้ำตาลทราย
วิปปิ้งครีม (ไขมันร้อยละ 35.5)
หางนมผง (skim milk powder)
สารคงตัวทางการค้า (PALSGAARD® 5924; บริษัท มัลติแม็กซ์ จำกัด)
อินูลินสายสั้น (RAFTILINE® GR, DP<10; บริษัท ดีพีโอ (ไทยแลนด์) จำกัด)
อินูลินสายยาว (RAFTILINE® HP, DP >23; บริษัท ดีพีโอ (ไทยแลนด์) จำกัด)
กลูโคสไซรัป Low DE, 29.7; บริษัท ไทยกลูโคส จำกัด
กลูโคสไซรัป Medium DE, 38.1; บริษัท ไทยกลูโคส จำกัด
กลูโคสไซรัป High DE, 40.3; บริษัท ไทยกลูโคส จำกัด
กลิ่นวานิลลา (Vanilla PAF 01461; บริษัท มัลติแม็กซ์ จำกัด)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมวานิลลาและไอศกรีมวานิลลาลดไขมัน

เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Ohaus; Model TP 2KS)
เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Ohaus; Model TP 200)
เครื่องผสมอาหาร (blender; ยี่ห้อ National; Model MX – T31GN)
เครื่องปั่นไอศกรีม (ยี่ห้อ Moulinex; Model Gelati)
เทอร์โมมิเตอร์ ตู้เย็น ตู้แช่แข็ง เครื่องครัวต่าง ๆ

3. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมวานิลลาและไอศกรีมวานิลลาลดไขมัน

เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Digital Rheometer; Model RD DV–III)
เครื่องวัดพีเอช (pH meter; ยี่ห้อ ORION® Model 21OA)

เครื่องวัดเนื้อสัมผัสไอศกรีม (Texture Analyser; Model XT.Plus®)
เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Ohaus; Model TP 2KS)
ถ้วยพลาสติกพร้อมฝาสำหรับวัดค่าการขึ้นฟู
ตะแกรงลวดขนาด 272 ช่อง / ตารางนิ้ว
อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple; ยี่ห้อ Fluke 51 K/J thermometer)
อุปกรณ์สำหรับการชิม

วิธีการ

1. การศึกษาผลของปริมาณและขนาดอินูลินต่อคุณภาพของไอศกรีมวานิลลาลดไขมัน

1.1 การผลิตไอศกรีมสูตรควบคุม

สูตรไอศกรีมที่ใช้ทดลองแสดงดังตารางที่ 3 ไอศกรีมสูตรควบคุมประกอบด้วยไขมันร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก จากวิปปิ้งครีม (ไขมันร้อยละ 35.5) น้ำตาลทรายร้อยละ 12 หางนมผงร้อยละ 11 สารคงตัวทางการค้า (PALSGAARD® 5924) ร้อยละ 0.5 และน้ำสะอาด ขั้นตอนการผลิตดัดแปลงจากสมจิต (2544) โดยผสมวัตถุดิบที่เป็นของผงเข้าด้วยกัน สำหรับวัตถุดิบที่เป็นของเหลวอุ่นให้ได้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จึงค่อย ๆ เติมวัตถุดิบที่เป็นผงลงไป คนจนละลายเข้ากันดีและมีอุณหภูมิ 60 – 65 องศาเซลเซียส จึงนำส่วนผสมที่ได้ไปปั่นในเครื่องปั่นผสมอาหารที่ความเร็วระดับสูงสุดเป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว บ่มที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แต่งกลิ่นวานิลลาก่อนนำไปปั่นในเครื่องปั่นไอศกรีม บรรจุไอศกรีมที่ได้ลงภาชนะพลาสติกแล้วนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิประมาณ – 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไอศกรีมที่ได้ไปตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ

1.2 การศึกษาปริมาณและขนาดของสายอินูลินต่อคุณภาพของไอศกรีมวานิลลาลดไขมัน

ผลิตไอศกรีมวานิลลาลดไขมันโดยลดไขมันจากสูตรควบคุมเป็นร้อยละ 3 (โดยน้ำหนัก) แล้วใช้อินูลินสายสั้น (RAFTILINE® GR, มี DP โดยเฉลี่ยต่ำกว่า10) เป็นสารทดแทนไขมันในอัตรา 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 เท่าของร้อยละไขมันที่ลดลงจากสูตรควบคุม ดังนั้นถ้าลดไขมัน

ลงไปร้อยละ 6 (โดยน้ำหนัก) ใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันร้อยละ 0, 3, 6 และ 9 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ (ตารางที่ 3) และผลิตไอศกรีมวานิลลาลดไขมันโดยใช้อินูลินสายยาว (RAFTILINE® HP, มี DP มากกว่า 23) ร้อยละ 6 (โดยน้ำหนัก) และผสมกันระหว่างอินูลินสายสั้น (GR) กับอินูลินสายยาว (HP) อัตราส่วน 1: 1 (รวมเป็นร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) เป็นสารทดแทนไขมัน เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและประสาทสัมผัสตามข้อ 1.3 และข้อ 1.4 กับสูตรควบคุมเพื่อเลือกสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด เป็นการเลือกขนาดและปริมาณอินูลินที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพของไอศกรีมลดไขมัน

ตารางที่ 3 สูตรไอศกรีมที่ศึกษาผลของปริมาณและขนาดอินูลินต่อคุณภาพของไอศกรีมวานิลลาลดไขมัน

ส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	สูตรควบคุม	สูตรลดไขมัน					
		1	2	3	4	5	6
ไขมัน	9.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
อินูลินสายสั้น (GR)	-	-	3.0	6.0	9.0	3.0	-
อินูลินสายยาว (HP)	-	-	-	-	-	3.0	6.0
เนื้อนมไม่รวมมันเนย (Milk Solid Not Fat)	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
น้ำตาลทราย	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
สารให้ความคงตัว	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
เนื้อนมรวม (Total Milk Solid)	32.5	26.5	29.5	32.5	39.5	32.5	32.5

1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด CRD (Complete Randomized Design)

1.3.1 การวัดพีเอชโดยเครื่อง pH meter

วัดพีเอชหรือความเป็นกรด– ด่างของไอศกรีมเหลวหลังผ่านการบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง โดยเครื่อง pH meter อุณหภูมิของไอศกรีมเหลวขณะ

วัดอยู่ที่ 25 $\pm$ 0.5 องศาเซลเซียส ใช้แท่งวัดอุณหภูมิ (thermocouple) ตรวจสอบอุณหภูมิ วัดทรีทเมนต์ละ 2 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ตัวอย่าง

1.3.2 การวัดความหนืด

วัดความหนืดของไอศกรีมเหลวหลังผ่านการบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเครื่องวัดความหนืด ใช้หัวหมุนเบอร์ 27 อัตราการเฉือน 68/ วินาที ความเร็วรอบในการหมุน 200 รอบ/ นาที อ่านค่าที่ได้หลังมอเตอร์หมุน 30 วินาที ควบคุมอุณหภูมิของไอศกรีมเหลวขณะวัดที่ 4 $\pm$ 0.5 องศาเซลเซียส (โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ TC 500) วัดทรีทเมนต์ละ 2 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ตัวอย่าง (ดัดแปลงจากปฐมพร, 2548)

1.3.3 การวัดการขึ้นฟู (Overrun) ของไอศกรีม

ชั่งน้ำหนักของไอศกรีมเหลวที่บรรจุเต็มถ้วยพลาสติก และเมื่อปั่นไอศกรีมจนแข็งตัวแล้วบรรจุลงถ้วยพลาสติกใบเดิมจนเต็ม ชั่งน้ำหนักไอศกรีมที่ได้นำข้อมูลไปคำนวณค่าร้อยละการขึ้นฟูดังสมการต่อไปนี้ วัดทรีทเมนต์ละ 2 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ตัวอย่าง (Arbuckle, 1986)

$$\text{ร้อยละการขึ้นฟู} = \frac{(\text{น้ำหนักไอศกรีมเหลว} - \text{น้ำหนักไอศกรีม}) \times 100}{\text{น้ำหนักไอศกรีม}}$$

1.3.4 การวัดอัตราการละลาย

นำเฉพาะเนื้อไอศกรีมซึ่งบรรจุเต็มถ้วยพลาสติกที่ผ่านการ hardening ที่อุณหภูมิประมาณ –25 องศาเซลเซียส ประมาณ 48 ชั่วโมง และทราบน้ำหนักที่แน่นอนไปวางบนตะแกรงลวดซึ่งรองรับไอศกรีมที่ละลายด้วยภาชนะพลาสติกเปล่า เริ่มจับเวลาการละลายเมื่ออุณหภูมิของไอศกรีมที่ระดับลึกจากผิวหน้า 1 เซนติเมตร เป็น –15$\pm$ 0.5 องศาเซลเซียส โดยควบคุมอุณหภูมิห้องให้อยู่ที่ 25$\pm$1 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักของไอศกรีมที่ละลายทุก ๆ 20, 25 และ 30 นาที นำข้อมูลที่ได้ไปหาร้อยละของไอศกรีมที่ละลายวัดทรีทเมนต์ละ 2 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ตัวอย่าง (ดัดแปลงจากพัชรินทร์, 2542)

$$\text{ร้อยละของไอศกรีมที่ละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักไอศกรีมที่ละลาย}}{\text{น้ำหนักไอศกรีมเริ่มต้น}} \times 100$$

1.3.5 วัดสมบัติการเสียรูปร่างของไอศกรีม

นำไอศกรีมที่บรรจุเต็มถ้วยพลาสติกซึ่งผ่านการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิประมาณ – 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปตรวจสอบสมบัติการเสียรูปร่างโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer ซึ่งอาศัยหลักการวัดค่าแรงกดที่กระทำต่อไอศกรีมด้วยระยะทางที่คงที่ สภาวะที่ใช้ในการวัดประกอบด้วย หัวกดรูปทรงกรวย (probe เบอร์ P/ 45C) วัดแรงในรูปแบบของการกดอัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกด ก่อนทดสอบ ขณะทดสอบ และหลังทดสอบอยู่ที่ 2.0, 1.0 และ 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ เริ่มอ่านค่าเมื่อหัววัดได้รับแรงที่มีขนาด 5 กรัม จนกระทั่งหัวกดลงไปลึก 15 มิลลิเมตร โดยเริ่มวัดการเสียรูปร่างของไอศกรีมเมื่ออุณหภูมิของไอศกรีมที่ระดับลึกจากผิวหน้า 1 เซนติเมตร เป็น – 13 $\pm$ 0.5 องศาเซลเซียส กำหนดค่าความแข็ง (hardness) คือ แรงกดสูงสุดที่ระดับความลึกของหัววัดเท่ากับ 15 มิลลิเมตร ทดลองทรีทเมนต์ละ 2 ซ้ำ ซ้ำละ 5 ตัวอย่าง (ดัดแปลงจากกนกพร, 2545)

1.4 การตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอดในบล็อกแบบสมบูรณ์ RCBD (Randomized Complete Block Design) ตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี Hedonic scale ให้คะแนนตั้งแต่ 1 – 9 (9 = ชอบมากที่สุด ถึง 1 = ไม่ชอบมากที่สุด) โดยผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 25 คน และทดสอบโดยวิธีเชิงพรรณนาแบบสากล (Descriptive Analysis) โดยขีดสเกลบอกระดับความเข้มของคุณภาพทางประสาทสัมผัส (scaling) ยาว 10 เซนติเมตร (0 ซม. = คุณลักษณะที่ทดสอบมีความเข้มน้อย ถึง 10 ซม. = คุณลักษณะที่ทดสอบมีความเข้มมาก) ทดสอบกับผู้ชิมที่ได้รับการฝึกฝนจำนวน 10 คน คุณภาพที่ตรวจสอบ ได้แก่ ความเรียบเนียน การละลายในปาก ความแน่นเนื้อ การรับกลิ่นรสในปาก ความเคลือบมันในปาก ความเหนียวหนืดในปาก (ดัดแปลงจาก Aime *et al.*, 2001)