

บทที่ 2

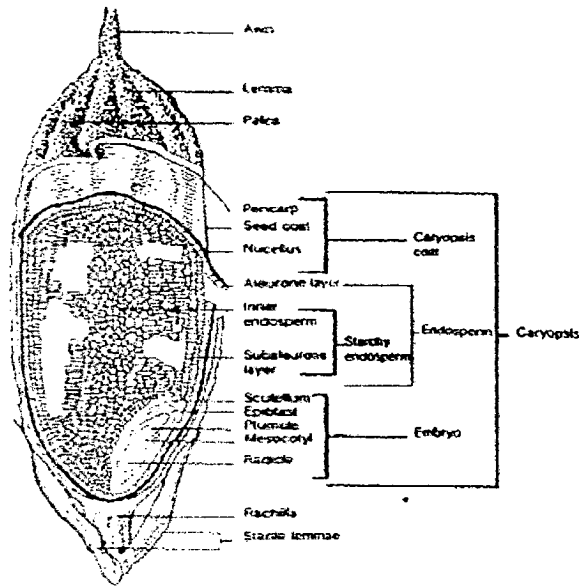
ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ข้าวเก่าและรำข้าวเก่า

2.1.1 ข้าว

ข้าว (rice) เป็นธัญพืชที่อยู่ในตระกูล Gramineae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L. เป็นแหล่งอาหารหลักที่ให้คาร์โบไฮเดรตที่สำคัญในการดำรงชีวิตของประชากรโลก และยังเป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการหมักแอลกอฮอล์ ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศไทย เป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ข้าวที่คนไทยบริโภคนั้นมีทั้งข้าวขาวและข้าวสี (ข้าวเก่าและข้าวกล้อง) ในอดีตคนไทยนิยมบริโภคข้าวที่ผ่านการสีด้วยวิธีโบราณ โดยการใช้ครกไม้หรือครกกระเดื่อง ทำให้ได้ข้าวสารที่มีสีธรรมชาติ และยังคงรักษาแร่ธาตุอาหารไว้ได้ สามารถช่วยป้องกันรักษาโรคบางชนิด ปัจจุบันข้าวสารที่รับประทานได้จากการสีของโรงสีข้าวซึ่งใช้เครื่องจักรกลขนาดใหญ่ ซึ่งสีข้าวได้รวดเร็วและได้ปริมาณมาก ข้าวสารที่ผ่านการขัดสีจากเครื่องจักรจะเป็นสีขาว แต่แร่ธาตุที่อยู่ในข้าวได้หายไปกับเปลือกข้าว รำข้าว ในระหว่างกระบวนการแปรรูป โดยสิ่งที่สูญเสียไปเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อร่างกาย ปัจจุบันจึงมีผู้บริโภคจำนวนมากที่ให้ความสำคัญต่อสุขภาพหันไปบริโภคข้าวสีเป็นหลัก เนื่องจากมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภคมากกว่าข้าวขาว (กรมการข้าว, 2556)

ข้าว เป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียก เมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain หรือ rice seed) ซึ่งทางพฤกษศาสตร์จะหมายถึง ผล (fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิดลอย (superior ovary) ของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อย ที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้จะติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่ หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้ง (dry fruit) ที่ไม่แตก (indehiscent fruit) เรียกว่า เมล็ด (caryopsis grain) ที่มีเยื่อหุ้มผล และเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat หรือ testa) เชื่อมรวมกันอย่างแนบแน่นโดยตลอดผลหรือเมล็ดข้าว จะมีลักษณะแตกต่างตามพันธุ์ ในด้านขนาด รูปร่าง สี การมีหาง (awn) หรือไม่มีหาง และขน (pubescence) หรือไม่มีขนบนเปลือกแข็ง (hull หรือ husk) (อรอนงค์, 2547) เมล็ดข้าว (รูปที่ 2.1) ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ (1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว (หรือผล) เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) และ (2) ส่วนเนื้อผล หรือ ผลแท้ (true fruit หรือ caryopsis grain) หรือ ข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) (Zhou et al., 2002)



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว (Zhou et al., 2002)

2.1.2 ข้าวเก่า

ข้าวเก่าหรือข้าวเหนียวดำ (purple rice) เป็นข้าวพื้นบ้านของไทย ลักษณะเด่นคือ มีสีม่วงดำทั้งลำต้นและเมล็ดส่วนใหญ่มักนำมาบริโภคในรูปแบบหรือของหวาน โดยมีความเชื่อว่ามีคุณสมบัติทางยา จากภูมิปัญญาของชาวล้านนา มีการใช้ประโยชน์จากข้าวเก่าในหลายๆ ด้าน เช่น การทำนาข้าวสมัยก่อนจะปลูกข้าวเก่าไว้ที่หัวไร่ (ตรงช่องปลายน้ำเข้านา) เพราะเชื่อว่าจะช่วยป้องกันโรคและแมลงที่จะมารบกวนต้นข้าวในนาได้ ส่วนคุณสมบัติทางยามีการใช้เพื่อป้องกันการตกเลือดในสตรีหลังคลอด รักษาอาการท้องร่วงและโรคผิวหนัง เป็นต้น ในปี พ.ศ. 2539 หน่วยวิจัยข้าวเก่า คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้รวบรวมและอนุรักษ์พันธุ์กรรมข้าวเก่าพื้นเมืองของไทย จากแหล่งปลูกข้าวต่างๆ ทั่วประเทศ จำนวน 42 พันธุ์ จากการดำเนินงานปรับปรุงพันธุ์ข้าวเก่าในอดีตจนถึงปัจจุบัน กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้ให้การยอมรับและขึ้นทะเบียนข้าวเก่าตามพระราชบัญญัติพันธุ์พืช พ.ศ. 2518 คือ ข้าวเก่าพันธุ์เก่าดอยสะเก็ดและพันธุ์เก่าอมก๋อย ซึ่งผลการวิจัยพบว่าข้าวเก่าสายพันธุ์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย แกมมา-โอโรซานอล สูงกว่าในข้าวขาวถึง 2-3 เท่า และยังพบสารแอนโทไซยานินในปริมาณที่สูงกว่าข้าวเก่าสายพันธุ์ปกติถึง 8-16 เท่า ในแง่ของคุณค่าทางโภชนาการ ข้าวเก่ายังประกอบไปด้วยไขมันร้อยละ 4.6 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 25.5 เส้นใยอาหารร้อยละ 16.6 วิตามินเอ วิตามินบีหนึ่ง วิตามินบีสอง แคลเซียมและธาตุเหล็ก อยู่ในปริมาณ 0.38, 36.67, 17.1, 3.25 และ 15.33 มิลลิกรัมต่อข้าวเก่า 100 กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีโปรตีนและวิตามินที่มีประโยชน์ต่อร่างกายในระดับสูงกว่าข้าวทั่วไป ผลงานวิจัยยังพบอีกว่า

เมื่อ แกรมม่า-โอโรซานอลได้ทำงานร่วมกับแอนโทไซยานินจะมีสมบัติที่โดดเด่น ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารชะลอความแก่ เพิ่มภูมิคุ้มกัน ลดระดับโคเลสเตอรอล ป้องกันการเกิดมะเร็ง โรคอ้วน ความดัน โรคหัวใจและความจำเสื่อม จึงเหมาะแก่ผู้บริโภคทุกเพศ ทุกวัย โดยเฉพาะในผู้สูงอายุ รวมทั้งผู้ที่มักได้รับสารปนเปื้อนจากอาหารทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งและคนที่ต้องเผชิญกับปัญหาความเครียดเป็นประจำ (อรอนงค์, 2547)

2.1.3 รำข้าว

รำข้าว (rice bran) คือ เยื่อสีน้ำตาลอ่อนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวกล้องซึ่งเป็นส่วนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงอุดมไปด้วยวิตามินอีและโอโรซานอล ซึ่งเป็นสารธรรมชาติที่ช่วยลดโคเลสเตอรอลและช่วยต้านอนุมูลอิสระ รำข้าวที่ได้จากการขัดสีข้าวกล้องนั้นประกอบด้วยเปลือกหุ้มผล (pericarp) เปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat) ชั้นเยื่อโปร่งใส (nucellus) ชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) คัพภะ (germ) และส่วนที่อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน (subaleurone layer) ของเนื้อเมล็ดและยังมีส่วนของแกลบและปลายข้าวปะปน ซึ่งปริมาณของส่วนประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวิธีการและระดับของการขัดสีข้าว (จันทร์สม, 2546) โดยทั่วไปจากข้าวกล้องจะสีได้รำข้าวประมาณร้อยละ 10 หรือถ้าเป็นข้าวเปลือก จะได้รำข้าวประมาณร้อยละ 5-8 โดยน้ำหนัก (Juliano, 1985)

รำข้าวเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว สามารถแบ่งได้หลายชนิด เช่น รำหยาบ รำละเอียด นอกจากนี้ยังมีการนำรำละเอียดไปทำการสกัดน้ำมันรำข้าว กากที่เหลือเรียกว่า กากรำหรือรำสกัดน้ำมัน (พิเชษฐ์และอนุรักษ์, 2549) โดย รำหยาบ มีส่วนของเปลือกนอกติดกับเมล็ดข้าว (bran) ส่วนของจมูกข้าว (germ) ส่วนของปลายข้าว (broken rice) ส่วนของเมล็ดข้าว (endosperm) และอาจมีส่วนของแกลบปนมาบ้าง รำหยาบมีเส้นใยและซิลิกาค่อนข้างสูง มีเยื่อใยหยาบย่อยได้ประมาณร้อยละ 72 มีโปรตีนรวมประมาณร้อยละ 7-8 เส้นใยประมาณร้อยละ 13 และมีไขมันประมาณร้อยละ 10 ส่วนรำละเอียดประกอบด้วยเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว ปลายข้าว และมีแกลบปนเล็กน้อย มีเยื่อใยหยาบย่อยได้ประมาณร้อยละ 86 มีโปรตีนรวมประมาณร้อยละ 12 มีไขมันค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 12-13 ส่วนรำสกัดน้ำมัน ได้จากการนำรำละเอียดหรือรำสดไปสกัดน้ำมันด้วยสารเคมี กากรำที่ได้มีโปรตีนสูงประมาณร้อยละ 14-15 เส้นใยร้อยละ 13-15 เยื่อใยหยาบย่อยได้ประมาณร้อยละ 6

2.1.4 วิธีการสกัดน้ำมันรำข้าว

รำข้าวสดที่ได้จากการสีข้าว โดยทั่วไปจะมีระดับของกรดไขมันอิสระเริ่มต้นที่ร้อยละ 1.5-2.0 และรำข้าวที่ผ่านการนึ่งจะมีกรดไขมันอิสระ เท่ากับร้อยละ 2-5 ระดับของกรดไขมันอิสระในรำข้าวสำหรับการสกัดน้ำมันนั้นควรจะต่ำ เพื่อง่ายต่อการสกัดและเพื่อให้

ประสิทธิภาพของการผลิตน้ำมันรำข้าวผ่านกรรมวิธี หรือที่เรียกว่าขบวนการรีไฟน์ (refine process) เป็นไปตามที่ต้องการ โดยวิธีการสกัดสามารถแบ่งได้ 3 วิธี ดังนี้

(1) การสกัดน้ำมันจากรำข้าว ทำได้โดยใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (hydraulic press) ซึ่งจะบีบคั้นน้ำมันออกมา จะได้น้ำมันปริมาณจำกัดประมาณร้อยละ 50 ซึ่งน้ำมันรำข้าวที่ผ่านการบีบคั้นโดยทั่วไปจะต้องผ่านขั้นตอนการกรองก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการรีไฟน์ ต่อไป (Nicolosi *et al.*, 1994)

(2) การสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งใช้สกัดน้ำมันออกจากเมล็ดพืชที่มีปริมาณน้ำมันต่ำหรือสกัดน้ำมันออกจากกากที่เหลือจากการบีบด้วยเครื่องอัด ตัวทำละลายที่ใช้จะต้องไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ได้แก่ เฮกเซน คาร์บอนไดออกไซด์ และไดเอทิลอีเทอร์ เป็นต้น ตัวทำละลายที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เฮกเซน (นิธิยา, 2548) โดยทั้งสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้นสามารถใช้ร่วมกันได้

(3) การสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต (supercritical fluid extraction, SFE) เป็นการสกัดโดยอาศัยหลักการทำให้ตัวทำละลายที่เป็นแก๊สเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอยู่ในสถานะเหนือจุดวิกฤต (supercritical fluid, SCF) โดยสารที่อยู่ในสถานะเหนือจุดวิกฤต หมายถึง สารใดๆ ที่มีอุณหภูมิอยู่เหนืออุณหภูมิวิกฤต (critical temperature, T_c) และมีความดันอยู่เหนือความดันวิกฤต (critical pressure, P_c) ที่สถานะนี้สารดังกล่าวจะไม่ควบแน่นกลายเป็นของเหลวหรือระเหยกลายเป็นไอ แต่จะเรียกสารที่อยู่ในสถานะนี้ว่า ของไหล (fluid) ตัวทำละลายที่อยู่ในสถานะเหนือจุดวิกฤตนี้จะถูกนำไปใช้ในการสกัดโดยตัวทำละลายนี้จะมีความสามารถในการแทรกเข้าไปตามอนุภาคของตัวอย่างได้ดี ทำให้มีประสิทธิภาพในการสกัดได้ดีกว่าการสกัดด้วยวิธีอื่นๆ มีรายงานการวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการประยุกต์ใช้ คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือวิกฤต (supercritical CO_2) เป็นตัวทำละลาย Wang และคณะ (2008) ศึกษาการสกัดแกมมา-โอโรซานอลจากรำข้าว พบว่าสามารถสกัดแกมมา-โอโรซานอลได้ในปริมาณร้อยละ 18.1 โดยมีประสิทธิภาพในการสกัดร้อยละ 88.5 และยังพบอีกว่าในการสกัด ความดันมีผลต่อปริมาณแกมมา-โอโรซานอลมากกว่าอุณหภูมิ โดยความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 เมกะปาสคาล และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ งานวิจัยของ Imsanguan และคณะ (2008) พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการสกัด α -tocopherol คือความดันที่ 48 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และสถานะที่เหมาะสมในการสกัดแกมมา-โอโรซานอลให้ได้ปริมาณที่สูงที่สุดคือที่ความดันที่ 48 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส Balachandran และคณะ (2008) พบว่าการสกัดน้ำมันรำข้าวโดย คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต จะสามารถรักษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้ดีที่สุดในขณะที่ Ge และคณะ (2002) พบว่าความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ เวลาการสกัดและรูปแบบการเตรียมตัวอย่างมีผลต่อ

ปริมาณวิตามินอีที่สกัดจากคัพภะของข้าวสาลี (wheat embryo) และสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคือ ที่ความดัน 26 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 40–45 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 2.0 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการสกัด 90 นาที และบดให้คัพภะข้าวสาลีให้มีขนาดอนุภาค 0.505 มิลลิเมตร

2.2 องค์ประกอบ สารสำคัญและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของข้าวเก่าและน้ำมันรำข้าว

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเก่า และน้ำมันรำข้าว

ผลการวิจัยพบว่าในข้าวเก่ามีสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายในด้านการเป็นสารต้านออกซิเดชันหลายชนิด ได้แก่ สารแกมมา-โอโรซานอล โทโคเฟอรอล โทโคไตรอีนอลและวิตามินอี ดังกล่าวมาข้างต้น ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมาก อยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งสารเหล่านี้มีในข้าวเก่าสูงกว่าในข้าวทั่วไป สารเหล่านี้นอกจากมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระแล้ว ยังมีคุณสมบัติเป็นสารชะลอความแก่ สารเพิ่มภูมิคุ้มกัน สารลดระดับโคเลสเตอรอล สารป้องกันการเกิดโรคหลายชนิด เช่น โรคมะเร็ง โรคอ้วน โรคความดัน โรคหัวใจและโรคความจำเสื่อม ดังนั้นข้าวเก่าจึงเหมาะแก่การบริโภคเป็นอาหารเสริมสุขภาพแก่ผู้บริโภคทุกเพศ ทุกวัย โดยเฉพาะในผู้สูงอายุ รวมทั้งผู้ที่มักได้รับสารปนเปื้อนจากอาหารทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งและคนทำงานที่ต้องเผชิญกับปัญหาความเครียด (ดำเนินและคณะ, 2543)

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเก่ามีผลมาจากพันธุ์ สภาพะการปลูก การเก็บเกี่ยว และกระบวนการแปรรูปจากข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้อง (อรอนงค์, 2547) และปัจจัยที่มีผลต่อชนิดและปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว ได้แก่ (ก) ปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับเมล็ดข้าวคือ พันธุ์ข้าว ความหนาแน่นของชั้นด้านนอก (anatomical outer layers) รูปร่างของเมล็ดข้าว ความทนทานต่อการแตกหักของเมล็ดข้าว และ (ข) ปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขัดสีคือ วิธีการ เครื่องมือ และสภาวะในการขัดสี (ยุวดี, 2546) ซึ่งปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเก่าและรำข้าว (อรอนงค์, 2547 และ Luh และ Benedito, 1991) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเก่าและรำข้าว

องค์ประกอบทางเคมี (ความชื้นร้อยละ14)	ข้าวเก่า	รำหยาบ	รำละเอียด
โปรตีน (ร้อยละ)	7.1-8.3	12.0-15.6	11.8-13.0
ไขมัน (ร้อยละ)	1.6-2.8	15.0-19.7	10.1-12.4
เส้นใย (ร้อยละ)	0.6-1.0	7.0-11.4	2.3-3.2
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	73-87	34.1-52.3	51.1-55.0
เถ้า (ร้อยละ)	1.0-1.5	6.6-9.9	5.2-7.3
วิตามิน			
โทอะมิน (บี1) (ไมโครกรัม/กรัม)	29.0-61.0	12.0-24.0	3.0-19.0
โรโบเฟลวิน(บี2) (ไมโครกรัม/กรัม)	0.4-1.4	1.8-4.3	1.7-2.4
ไนอะซิน (ไมโครกรัม/กรัม)	35.0-53.0	267.0-499.0	224.0-389.0
แอลฟา-โทโคเฟอรอล (ไมโครกรัม/กรัม)	9.0-20.0	26.0-133.0	-

ที่มา : อรอนงค์ (2547); Luh & Benedito (1991)

รำหยาบจะมีโปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า แร่ธาตุบางชนิดและวิตามินบางชนิดมากกว่าข้าวเก่า และรำละเอียด ยกเว้นคาร์โบไฮเดรต (ตารางที่ 2.1) ดังนั้นจึงมีการนำรำข้าวไปสกัดน้ำมัน สกัดโปรตีนและสารอาหารอื่นที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นได้จากเดิมที่ใช้เป็นอาหารสัตว์เท่านั้น (Luh และ Benedito, 1991) รำข้าวนอกจากจะประกอบด้วยสารอาหาร เช่น โปรตีน ไขมัน เส้นใย แร่ธาตุที่จำเป็นและวิตามินหลายชนิดแล้วยังประกอบด้วยเอนไซม์ จุลินทรีย์ แอมलगและสิ่งเจือปนที่ไม่พึงประสงค์อีกมากมายหลายชนิด ยิ่งถ้ากระบวนการแปรรูปขาดการควบคุมที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอนที่ได้รำข้าวออกมา และเมื่อนำไปรวมกับส่วนอื่นๆ แล้วก็ยิ่งทำให้ได้รำข้าวที่มีสิ่งเจือปนมากขึ้นไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามรำข้าวก็ยังมีคุณค่าทางโภชนาการอย่างมากสำหรับการใช้เป็นอาหารสัตว์ (Luh และ Benedito, 1991)

ในรำข้าวมีน้ำมัน (ไขมัน) อยู่ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันที่มีประโยชน์ต่อร่างกายประเภทกรดไขมันไม่อิ่มตัวและกรดไขมันที่จำเป็นในปริมาณมาก เช่น กรดโอเลอิก (oleic acid) ร้อยละ 42.5 กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) ร้อยละ 39.1 และกรดปาล์มิติก (palmitic acid) ร้อยละ 15 ส่วนกรดไขมันที่มีน้อย เช่น กรดสเตียริก (stearic acid) ร้อยละ 1.9 กรดลิโนเลนิก (linolenic acid) ร้อยละ 1.1กรดไมริสติก (myristic acids) ร้อยละ 0.2 และ

กรดบีเฮนิก (behenic acid) ร้อยละ 0.2 (อรอนงค์, 2547) นอกจากประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) เป็นส่วนใหญ่แล้ว รำข้าวยังมีสารประกอบอื่นๆ ปนอยู่ด้วย ได้แก่ ฟอสโฟลิพิด (phospholipid) ไกลโคลิพิด (glycolipid) สเตอรอล (sterol) แวกซ์ (wax) โคเฟอรอล (copherol) และไตรโคอินอล (tricoenol) โดยฟอสโฟลิพิด จะพบในรูปของ ฟอสฟาทีลโคลีน (phosphatidylcholine) (Nicolosi *et al.*, 1994)

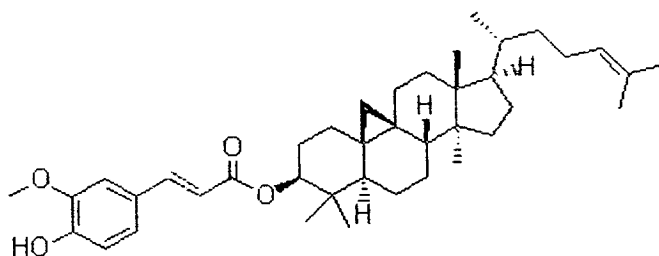
นอกจากนี้ในน้ำมันรำข้าว ยังพบโอโรซานอลในปริมาณร้อยละ 0.96–2.9 โดยโอโรซานอล คือ เอสเทอร์ของกรดเฟอร์ูลิก (ferulic) และไตรเทอร์พีนอยด์ แอลกอฮอล์ (triterpenoids alcohol) และพบในส่วนของสเตอรอล (sterol) ที่ถูกกำจัดออกก่อนในช่วงการทำรีไฟน์ของน้ำมัน ซึ่งโอโรซานอลจะมีคุณสมบัติของการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งน้ำมันรำข้าวที่ผ่านกระบวนการ รีไฟน์แล้วสามารถพบสเตอรอล โอโรซานอล และโทโคไตรอินอลมากกว่าน้ำมันพืชที่ผ่านการรีไฟน์แล้วชนิดอื่น (Ausman *et al.*, 2005) ปัจจุบันประเทศญี่ปุ่นได้มีการสกัดเอาสารสำคัญในน้ำมันรำข้าวคือ แกมมา-โอโรซานอล ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระและนำมาผลิตเป็นอาหารเสริมสุขภาพ เครื่องสำอางในการรักษาสุขภาพชะลอความแก่แล้วนำกลับมาจำหน่ายในราคาที่สูงให้กับคนไทย (ดำเนินและคณะ, 2543)

2.2.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในรำข้าวเก่า

สารออกฤทธิ์ชีวภาพที่สำคัญหลายชนิด ที่มีรายงานว่าพบในข้าวเก่า ได้แก่

(1) แกมมา-โอโรซานอลเป็นกลุ่มของสารประกอบเอสเทอร์ระหว่างกรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) และสเตอรอล (sterols) หรือไตรเทอร์พีนแอลกอฮอล์ (triterpene alcohol) ชนิดต่างๆ (รูปที่ 2.2) ละลายได้ดีในคลอโรฟอร์ม รองลงมาเป็นอีเทอร์ ละลายได้เล็กน้อยในเฮกเซน และไม่ละลายในน้ำ มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 161.2 องศาเซลเซียส พบมากในรำข้าวขาว และรำข้าวเหนียวดำ ผลจากการศึกษาพบว่าข้าวสายพันธุ์ต่างๆ มีปริมาณสารแกมมา-โอโรซานอลที่แตกต่างกัน โดยสารแกมมา-โอโรซานอลเป็นสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติเช่นเดียวกับโทโคเฟอรอลและโทโคไตรอินอล จากการศึกษาพบว่าในรำข้าวมีสารแกมมา-โอโรซานอลในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 2–4 ซึ่งสูงกว่าปริมาณของโทโคเฟอรอลถึง 30–40 เท่า (Chen and Bergman., 2005; Aguilar-Garcia *et al.*, 2007) นอกจากนี้ประสิทธิภาพการต้านออกซิเดชันของแกมมา-โอโรซานอลยังสูงกว่าโทโคเฟอรอลอีกด้วย (Xu *et al.*, 2001) สารแกมมา-โอโรซานอลยังมีคุณสมบัติในการลดระดับโคเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในกระแสเลือด กระตุ้นการทำงานของต่อมไธสมอง ยับยั้งการหลังกรดในกระเพาะอาหาร ยับยั้งการรวมตัวของเกล็ดเลือด ลดน้ำตาลในเลือด และเพิ่มระดับของฮอโมนอินซูลิน

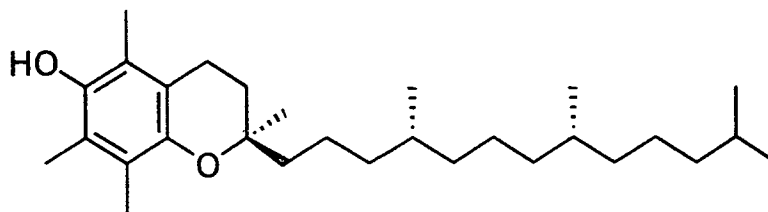
ในเลือดของคนเป็นโรคเบาหวาน นอกจากนั้นแล้วยังทำหน้าที่ในการต้านการหืนของไขมันในร่า
ข้าวได้อีกด้วย (พันทิพาและคณะ, 2551)



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของแกมมา-โอโรซานอล (Siebenmorgen & Beers (2000))

Huang (2003) ได้ทำการศึกษาการวัดประสิทธิภาพของสารแกมมา-โอโรซานอลใน
ด้านการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเปรียบเทียบกับวิตามินอี โดยการนำสารดังกล่าวมาบ่มกับ
เซลล์ในหลอดทดลอง จากนั้นทำการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่าจำนวนเซลล์ที่
อยู่รอดเมื่อบ่มกับสารแกมมา-โอโรซานอลมีจำนวนสูงถึงร้อยละ 81.8 แสดงให้เห็นว่า สาร
แกมมา-โอโรซานอลมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าวิตามินอีถึง 10 เท่า

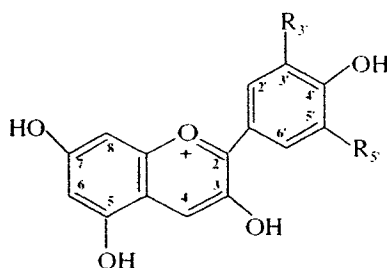
(2) วิตามินอี (Vitamin E) สารโทโคเฟอรอลมีด้วยกันหลายชนิด โดยกลุ่มของโทโค-
เฟอรอลมี 4 ชนิด ได้แก่ แอลฟา (α) เบต้า (β) แกมมา (γ) และเดลต้า (δ) และกลุ่มของโท
โคไตรอีนอลมีอีก 4 ชนิด ได้แก่ α , β , γ , และ δ โดยพบว่าแอลฟา-โทโคเฟอรอลมี
ปริมาณมากที่สุดในกลุ่มวิตามินอีที่อยู่ในกระแสเลือดและเนื้อเยื่อ (รูปที่ 2.3) โทโคเฟอรอล
เหล่านี้เป็นสารต้านออกซิเดชันตามธรรมชาติที่สำคัญและพบมากในร่าข้าว อาจมีปริมาณสูง
ถึง 100-150 ไมโครกรัมต่อกรัม (Hargrove, 1994) แต่อย่างไรก็ตามโทโคเฟอรอลที่ได้จาก
ธรรมชาติจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย และไวต่อการถูกทำลายด้วยความร้อน จึงมีการสูญเสีย
วิตามินอีในกระบวนการแปรรูปอาหารได้ โทโคเฟอรอลที่ได้จากธรรมชาติทั้งหมดเป็น D-
form แต่โทโคเฟอรอลสังเคราะห์จะเป็นส่วนผสมของ D และ L-isomer ในสัดส่วน 50 ต่อ 50
และวิตามินอีที่จำหน่ายในท้องตลาดจะอยู่ในรูปของอะซิเตตเอสเทอร์ (acetate ester) ซึ่งจะทำ
ให้มีความคงตัวเพิ่มขึ้นเมื่อสัมผัสกับแสงและอากาศ สารโทโคเฟอรอลยังช่วยป้องกันไขมันชนิด
low density lipoproteins (LDLs) จากขบวนการออกซิเดชัน ซึ่ง LDLs ที่ถูกออกซิไดซ์จากอนุมูล
อิสระเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนทำให้เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดได้ มีหลายงานวิจัย รายงานว่า
การรับประทานวิตามินอีเพิ่มมากขึ้น สามารถลดความเสี่ยงของการเกิดหัวใจวายและลดการ
เสียชีวิตเนื่องจากโรคหัวใจได้ (นิธิยา, 2553)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแอลฟา-โทโคเฟอรอล (Bruscatto *et al.*, 2009)

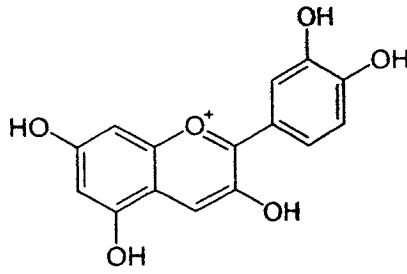
(3) แอนโทไซยานิน (anthocyanins) จัดเป็นรงควัตถุธรรมชาติที่ให้สี ชมพู แดง ม่วง และน้ำเงิน ซึ่งจัดเป็นสารประกอบในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) มีโครงสร้างหลักเป็น $C_6C_3C_6$ เป็นรงควัตถุที่ละลายอยู่ใน vacuolar sap ของพืช สามารถละลายน้ำได้ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายประเภทชนิดไม่มีหมู่ไฮดรอกซิล (non-hydroxyl solvent) เช่น อะซิโตน (acetone) เบนซีน (benzene) คลอโรฟอร์ม (chloroform) และอีเทอร์ (ether) เป็นต้น (Jadwiga & Sikorski, 2002) แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่มีคุณสมบัติสำคัญในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ซึ่งช่วยในการป้องกันโรคมะเร็ง โรคไขข้ออักเสบและโรคหลอดเลือดหัวใจ (Hallie *et al.*, 2006)

แอนโทไซยานินเป็นอนุพันธ์ polyhydroxyl และ polymethoxyl ของสารฟลาโวลีเลียม (flavylium) หรือ 2-phenylbenzopyrylium โมเลกุลประกอบด้วยแอนโทไซยานิดิน หรือที่เรียกว่า aglycone ซึ่งจับตัวกับน้ำตาลด้วยพันธะ β - glycosidic ดังรูปที่ 2.4 และมักจับที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของโครงสร้างแอนโทไซยานิดิน



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างหลักของแอนโทไซยานิน (Jadwiga & Sikorski, 2002)

น้ำตาลที่จับกับแอนโทไซยานิดินอาจเป็นโมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) ได้แก่ กลูโคส (glucose) แรมโนส (ranose) กาแล็คโตส (galactose) ไซโลส (cylose) อะราบิโนส (arabinose) หรือพวกโตแซคคาไรด์ (disaccharide) หรือ คาร์โบไฮเดรต (trisaccharide) โมเลกุลน้ำตาลมักถูก esterified ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สามด้วยกรดอินทรีย์บางชนิดเช่น *p*-coumaric, caffeic และ ferulic ซึ่งจะช่วยให้แอนโทไซยานินในพืชมีเสถียรภาพดีขึ้น แอนโทไซยานินที่พบข้าวง่ำหรือรำข้าวง่ำ คือ cyanidin ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ cyanidin (Gray & Lan, 2002)

2.2.3 กลไกการทำงานของสารต้านออกซิเดชัน

สารต้านอนุมูลอิสระสามารถแบ่งได้ตามกลไกการทำงานได้ 5 ประเภท (พรทวี, 2548) ดังนี้

2.2.3.1 สารป้องกันการหืนปฐมภูมิ (primary antioxidant) สารป้องกันการหืนกลุ่มนี้ทำหน้าที่เป็นตัวให้ไฮโดรเจนอะตอม หรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ ซึ่งจะยับยั้งหรือชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันในขั้นตอนเริ่มต้น

2.2.3.2 สารจับออกซิเจน (oxygen scavenger) เป็นสารที่ทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ โดยเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงทำให้เกิดอนุมูลอิสระลดลง สารจับออกซิเจนนี้ทำหน้าที่เป็นสารเสริมฤทธิ์ คือ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสารป้องกันการหืน แต่อย่างไรก็ตาม สารจับออกซิเจนไม่มีความสามารถในการเป็นการกันหืน หรือมีน้อยมาก เช่น กรดแอสคอร์บิก กรดอิริทอร์เบทและไซเตียมอิริทอร์เบท เป็นต้น

2.2.3.3 สารป้องกันการหืนทุติยภูมิ (secondary antioxidant) เป็นสารที่ทำหน้าที่ในการชะลออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน สารเหล่านี้จะทำหน้าที่จับไอออนโลหะ ออกซิเจน และดูดซับสารรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีกทั้งยังทำหน้าที่สลายสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นอนุมูลที่เสถียรและคงตัว

2.2.3.4 ตัวจับโลหะไอออน (chelating agents) โลหะไอออนของเหล็ก ทองแดง แมงกานีส โคโรเมียม นิกเกิล และอะลูมิเนียม เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ตัวจับโลหะไอออนใช้เติมลงไปเพื่อเป็นสารเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก เป็นต้น

2.2.3.5 เอนไซม์ที่ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการหืน (enzymatic antioxidant) ได้แก่ กลูตาไธโอนออกซิเดส ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส คะตะเลส และกลูตาไทโอนเปอร์ออกซิเดส โดยทำหน้าที่เป็นตัวกำจัดออกซิเจน ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้ยากขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม นอกจากกลไกในการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละประเภทข้างต้นแล้ว สภาวะแวดล้อมขณะที่สารเกิดกลไกต้านออกซิเดชันถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่

สำคัญเช่นกัน จากการรายงานของ Huang และคณะ (1996) พบว่า ในอาหารที่เป็นน้ำมันข้าวโพดปกติ Trolox จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดลิปิดเปอร์ออกซิเดชันได้ดีกว่า แอลฟา-โทโคเฟอรอล แต่เมื่อนำน้ำมันข้าวโพดไปทำเป็นอิมัลชันแล้วทำการทดสอบอีกครั้งพบว่า แอลฟา-โทโคเฟอรอลจะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า Trolox เนื่องจากความมีขี้ของสารต้านอนุมูลอิสระส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน

2.2.4 วิธีทดสอบคุณสมบัติด้านออกซิเดชัน

การทดสอบคุณสมบัติด้านออกซิเดชันของสารมีหลายวิธี ซึ่งแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติที่ต้องการทดสอบ เช่น คุณสมบัติในการจับกับอนุมูลอิสระ การตกตะกอนโลหะซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน เป็นต้น วิธีที่นิยมทดสอบ มีดังนี้

2.2.4.1 DPPH radical scavenging

เป็นวิธีการตรวจวัดคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากพืชหรือสารสังเคราะห์ โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl หรือ DPPH ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่ค่อนข้างเสถียรกับสารที่ต้องการทดสอบ อิเลคตรอนคู่โดดเดี่ยว (unpaired electron) ในโมเลกุลของอนุมูล DPPH สามารถดูดกลืนพลังงานแสงได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 517 นาโนเมตร ทำให้มองเห็นเป็นสีม่วง และเมื่ออนุมูลดังกล่าวถูกรีดิวซ์โดยสารต้านอนุมูลอิสระที่มีคุณสมบัติเป็น hydrogen donor อนุมูล DPPH จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป DPPH-H ซึ่งการสูญเสียอิเล็กตรอนดังกล่าว ทำให้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงลดลง (พรทวิ, 2548)

2.2.4.2 Metal chelating

การวัดความสามารถในการแย่งจับกับโลหะเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาความสามารถในการต้านออกซิเดชันของสารที่ต้องการทดสอบ เพราะโลหะไอออนเป็นตัวการสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระต่างๆ มากมายหลายชนิด โดยเฉพาะธาตุเหล็กที่อยู่ในรูปเฟอร์รัส หรือ Fe^{2+} จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารอนุมูล superoxide anion radical ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระตัวเริ่มต้นที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระตัวอื่นๆ ต่อไป ดังนั้นวิธีการวัดความสามารถในการแย่งจับโลหะ Fe^{2+} ของสารที่ต้องการทดสอบนั้น อาศัยจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ 562 nm ที่มีค่าลดลง โดยเมื่อเติมสาร Ferrozine ลงไป สารนี้จะไปจับกับ Fe^{2+} แล้วอยู่ในรูป Ferrozine - Fe^{2+} complex ซึ่งจะให้สีแดง และถ้าสารที่ต้องการทดสอบมีความสามารถในการแย่งจับกับ Fe^{2+} จะอยู่ในรูป Antioxidant - Fe^{2+} complex แล้วจะทำให้สีแดงของ Ferrozine - Fe^{2+} complex จางลงได้ (Dinis *et al.*, 1994)

2.2.4.3 วิธี Reducing power

ความสามารถของการเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของสารที่ต้องการทดสอบ สามารถใช้ในการหาความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้วิธีนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการรีดิวซ์หรือให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบแก่สารอนุมูลอิสระที่สังเคราะห์ขึ้นภายในระบบ โดยสารที่ต้องการทดสอบจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระแล้วทำให้เปลี่ยนเป็นสารที่คงตัว อีกทั้งยังสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระอีกด้วย โดยอาศัยจากการวัดปฏิกิริยา reduction ของ $Fe^{3+}(CN^-)_6$ ไปเป็น $Fe^{2+}(CN^-)_6$ ซึ่งจะทำให้มีสีน้ำเงินที่เข้มขึ้น สามารถตรวจสอบความสามารถในการรีดิวซ์ได้ จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 700 nm ค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นแสดงถึง ความสามารถในการรีดิวซ์ที่มากขึ้น (Oyaizu, 1986)

2.3 ประเภทและโครงสร้างของไอศกรีม

2.3.1 ประเภทของไอศกรีม

ไอศกรีม (ice cream) หมายถึง ผลิตภัณฑ์นมแช่เยือกแข็งที่ผลิตจากการแช่เยือกแข็งส่วนผสมที่นำไปปั่นเพื่อรวมตัวกับอากาศและได้ลักษณะที่คงตัว โดยส่วนผสมไอศกรีมประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์นม (ไขมันนม) น้ำตาล น้ำเชื่อม น้ำ สารให้ความคงตัว อิมัลซิไฟเออร์ รวมถึงไข่ ผลิตภัณฑ์จากไข่ สี กลิ่นรสที่ปลอดภัย (Arbuckle, 1986; นันทินา, 2544) ในประเทศไทย อัตราการบริโภคไอศกรีมมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยมีอัตราการบริโภคเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยร้อยละ 5.0 ต่อปี โดยในช่วงฤดูร้อนจะมีการบริโภคที่มากกว่าช่วงฤดูอื่นๆ อย่างไรก็ตามอัตราการบริโภคไอศกรีมต่อประชากรของไทยยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำเมื่อเทียบกับอัตราการบริโภคของประเทศเพื่อนบ้านอย่างมาเลเซียที่มีอัตราการบริโภค 3 ลิตรต่อคนต่อปี ญี่ปุ่น 7 ลิตรต่อคนต่อปี และยังมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับอัตราการบริโภคในประเทศต่างๆ ทางซีกโลกตะวันตก แม้ว่าในประเทศไทยจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปีที่สูงกว่าก็ตาม ประชากรในประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย มีอัตราการบริโภคไอศกรีมมากเป็นอันดับหนึ่งและอันดับสองของโลกตามลำดับ โดยประเทศสหรัฐอเมริกา มีการบริโภค 24 ลิตรต่อคนต่อปี และในประเทศออสเตรเลียมีการบริโภค 18 ลิตรต่อคนต่อปี

เมื่อพิจารณาจากส่วนผสมและลักษณะทางกายภาพของไอศกรีม โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทของไอศกรีมเป็น ไอศกรีมพรีเมียมและไอศกรีมสูตรมาตรฐาน ซึ่งไอศกรีมพรีเมียมจะผลิตจากวัตถุดิบที่มีคุณภาพสูง และมีปริมาณไขมันอยู่สูงคือ ประมาณร้อยละ 15-20 มีปริมาณอากาศน้อย ในขณะที่ไอศกรีมสูตรมาตรฐานจะผลิตจากวัตถุดิบที่มีราคาถูกลงเช่น ไขมันจากพืชมีปริมาณไขมันอยู่ประมาณ ร้อยละ 8-10 และมีปริมาณอากาศที่มากกว่า (Clarke,

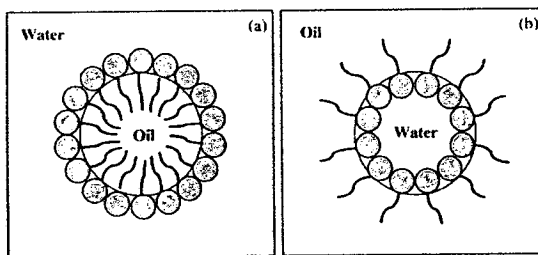
2004) ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 222) พ.ศ.2544 เรื่องไอศกรีม แบ่งไอศกรีม ออกเป็น 5 ชนิด คือ

- (1) ไอศกรีมนม ได้แก่ ไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้นมหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากนม
- (2) ไอศกรีมดัดแปลง คือ ไอศกรีมที่ทำขึ้นโดยใช้ไขมันชนิดอื่นแทนมันเนยทั้งหมด หรือ แต่บางส่วนหรืออาจทำจากวัตถุดิบอื่นที่ตามธรรมชาติมีไขมันอยู่แต่ไม่ใช่ นม เช่นไอศกรีมที่ผสมน้ำมันปาล์ม หรือน้ำมันมะพร้าว ไอศกรีมกะทิ เป็นต้น
- (3) ไอศกรีมผสม คือไอศกรีมนมหรือไอศกรีมดัดแปลงที่มีการผสมน้ำผลไม้ เนื้อผลไม้ ถั่ว ช็อกโกแลต และส่วนผสมอื่นๆ
- (4) ไอศกรีมชนิดผงหรือเกลวนั้น เป็นส่วนผสมของสิ่งที่ต้องใช้ในการทำไอศกรีมชนิดต่างๆ ที่กล่าวมาโดยจำหน่ายในรูปของผง ซึ่งต้องนำไปเติมน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วนำไปปั่นทำให้แข็งหรือแช่เย็นให้แข็งก่อนนำไปบริโภค หรืออาจจำหน่ายในรูปของเหลว ซึ่งนำไปปั่นหรือแช่แข็งได้เลยไอศกรีมชนิดนี้อาจเรียกว่า กึ่งสำเร็จรูป
- (5) ไอศกรีมหวานเย็น เป็นไอศกรีมที่ไม่มีส่วนผสมของนมซึ่งทำจากน้ำตาล แล้วเติมสี กลิ่น รส หรือน้ำผลไม้

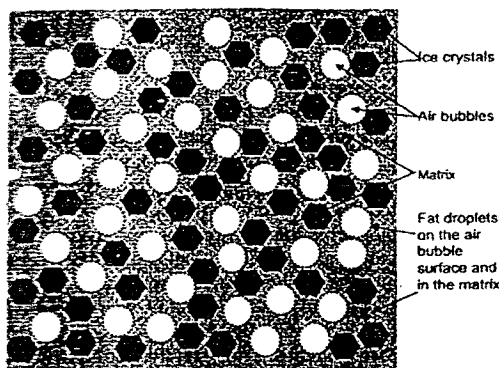
2.3.2 โครงสร้างของไอศกรีม

โครงสร้างของไอศกรีมเป็นระบบเคมีกายภาพ (physicochemical system) ที่ซับซ้อน ไอศกรีมมีลักษณะเป็นอิมัลชัน (emulsion) แบบไขมันกระจายตัวอยู่ในน้ำ (oil in water emulsion) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนผสมทั้งหมดจะทำให้เกิดโครงสร้างของไอศกรีมในระหว่างกระบวนการแช่แข็ง จะเกิดโครงสร้างที่เรียกว่าโฟม (foam) เกิดขึ้นซึ่งโฟมเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยฟองอากาศ ที่ถูกแบ่งออกโดยฟิล์ม (film) บางๆ ของวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) โดยบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับวัฏภาคต่อเนื่อง (surface) จะมีชั้นของไขมัน บางๆ เกาะติดอยู่โดยรอบซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของไอศกรีม โครงสร้างภายในของไอศกรีมจึงประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ ของแข็ง ของเหลวและอากาศอยู่รวมกันทั้ง 3 วัฏภาค (three-phase system) โดยที่ฟองอากาศกระจายตัวอยู่ในส่วนของวัฏภาคของเหลวชั้นหนืดที่ล้อมรอบผลึกน้ำแข็งอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยโครงสร้างประกอบด้วย ผลึกน้ำแข็ง ฟองอากาศ และเม็ดไขมัน ที่มีขนาดตั้งแต่ 1 μm ถึง 0.1 mm และยังประกอบด้วยสารละลายที่มีความหนืดสูงของสารให้ความหวาน โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) และโปรตีนนม ซึ่งเรียกรวมกันว่าเป็น matrix (Clarke, 2004) โครงสร้างของไอศกรีมดังกล่าวส่งผลให้ไอศกรีมมีลักษณะปรากฏที่ดี มีความแห้ง ให้ความรู้สึกทางปาก

(mouth-feel) ที่ดี และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระหว่างการเก็บรักษาซึ่งเรียกลักษณะการคงตัวนี้ว่า การคงตัวของรูปร่าง (shape retention)

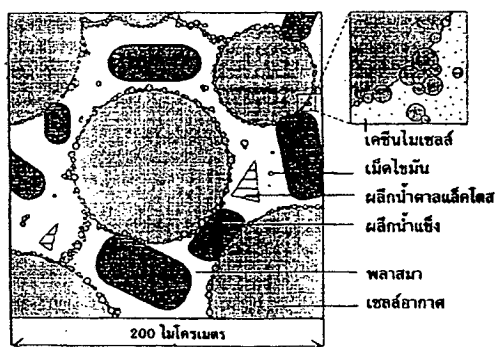


รูปที่ 2.6 ภาพจำลองอิมัลชันในอาหาร: (a) oil-in-water emulsion และ (b) water-in-oil emulsion (Shane *et al.*, 2006)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างภายในของไอศกรีม (Clarke, 2004)

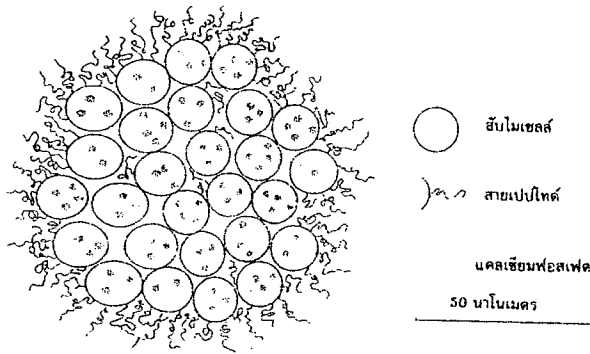
สำหรับโครงสร้างของส่วนผสมไอศกรีมประกอบด้วยอนุภาคเม็ดไขมันที่เป็นผลึกบางส่วน (partially crystalline fat globules) เคซีนไมเซลล์ (casein micelles) ที่กระจายตัวอยู่ในส่วนของของเหลวหรือสารละลายของน้ำตาล เกลือ โปรตีน และสารให้ความคงตัว และบนผิวของเม็ดไขมันจะมีบางส่วนของเคซีนไมเซลล์ โปรตีนและอิมัลซิไฟเออร์ถูกดูดซับอยู่ เซลล์อากาศที่มีขนาดเล็กจะถูกครอบด้วยชั้นของผลึกไขมัน เซลล์อากาศที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสคล้ายเกล็ดน้ำแข็ง ขณะที่เซลล์อากาศขนาดเล็กจะให้เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน ไอศกรีมโดยทั่วไปจะมีอากาศอยู่ประมาณร้อยละ 50 ของปริมาตรไอศกรีมทั้งหมด ส่วนปริมาตรน้ำที่กลายเป็นน้ำแข็งในไอศกรีมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยเฉลี่ยผลึกน้ำแข็งจะมีขนาดประมาณ 40-50 ไมครอน ขนาดผลึกน้ำแข็งมีผลต่อคุณภาพของไอศกรีมด้วย กล่าวคือ ไอศกรีมที่ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอน จะทำให้ได้เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน แต่ถ้ามีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมครอนจะได้ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสหยาบ ไม่น่ารับประทาน รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นลักษณะของเม็ดไขมันบางส่วนที่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (clump) ซึ่งการรวมตัวกันนี้ส่งผลต่อความคงตัวของรูปร่าง และความแห้งที่เกิดขึ้นในไอศกรีม



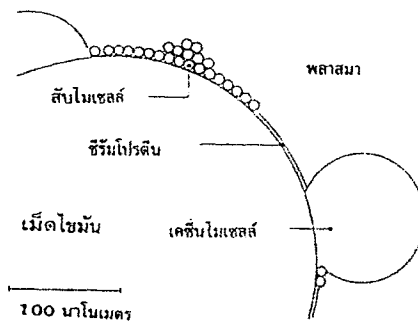
รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างของไอศกรีมที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส (Walstra & Jonkman, 1998; นันทินา, 2544)

2.3.3 การเกิดโครงสร้างของไขมัน

การโฮโมจิไนส์ (homogenization) เป็นกระบวนการที่มีผลต่อโครงสร้างของไขมันในไอศกรีมเหลว หลังจากผ่านกระบวนการนี้เม็ดไขมันมีขนาดเล็กลง ทำให้พื้นผิวของเม็ดไขมันเพิ่มขึ้นและจับกันเป็นกลุ่ม (cluster) ซึ่งส่งผลต่อความเรียบเนียนและความแข็งของเนื้อไอศกรีมที่ได้ พื้นผิวของเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นใหม่ในครั้งนี้อาจจะยึดเกาะกับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (surfactant) จากไอศกรีมเหลวซึ่งได้แก่ เคซีน เวย์โปรตีน ฟอสโฟไลปิด ไลโปโปรตีน และอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่างๆ ที่มีส่วนผสม (รูปที่ 2.10) พื้นผิวของเม็ดไขมันนี้จะพัฒนาโครงสร้างต่อในขั้นตอนการบ่ม และการจัดเรียงตัวอีกครั้งจนกระทั่งระดับพลังงาน (energy stage) ที่ได้รับลดลง โปรตีนของนมซึ่งอยู่ในรูปของเคซีนไมเซลล์ (รูปที่ 2.9) มีประมาณร้อยละ 80 ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตและน้ำปริมาณมาก สามารถคงรูปอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอนด้วยลักษณะ hairy layer หลังการโฮโมจิไนส์ส่วนผสม เคซีนจะไปยึดเกาะบนผิวเม็ดไขมัน แต่เนื่องจากเคซีนไมเซลล์มีคุณสมบัติทนความร้อนและไม่ละลายที่ไอโซอิเล็กทริกพอยท์ และโปรตีนนมประกอบด้วยซีรัมโปรตีน (serum protein) ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งเป็นส่วนที่ละลายน้ำได้และถูกทำลายได้ด้วยความร้อน ส่วนที่ละลายได้ในสารละลายไอศกรีม (aqueous phase) ที่มีปริมาณน้ำน้อยกว่าปริมาณน้ำในนม จึงเกิดการสร้างเคซีนไมเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อุณหภูมิต่ำทำให้แคลเซียมฟอสเฟตและเคซีนไมเซลล์ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ของเคซีนไมเซลล์ในไอศกรีมจึงไม่ดีเท่ากับโปรตีนชนิดอื่นในนม



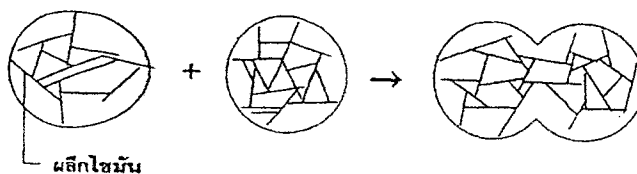
รูปที่ 2.9 ภาพจำลองของเคซีนไมเซลล์ (Walstra & Jonkman, 1998); นันทินา, 2544)



รูปที่ 2.10 พื้นผิวของเม็ดไขมันที่ยึดเกาะด้วยโปรตีนหลังจากผ่านการไฮโมจีไนส์ (Walstra & Jonkman, 1998; นันทินา, 2544)

2.3.4 การเกิดผลึกไขมันในเม็ดไขมัน

การเกิดผลึกไขมันในเม็ดไขมันแสดงดังรูปที่ 2.11 ผลึกไขมันในเม็ดไขมันซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการบ่มเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนของผลึกรูปเข็ม (needle-like crystals) ภายในเม็ดไขมันซึ่งประกอบด้วยไขมันเหลวที่มีจุดหลอมเหลวต่ำล้อมรอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่มีจุดหลอมเหลวสูง เม็ดไขมันที่เกาะตัวเป็นกลุ่ม (clump) และเชื่อมโยงกันเป็นสายนั้นเกิดจากกระบวนการที่เรียกว่า partial coalescence ผลึกไขมันที่เกิดขึ้นจะแทงผนังเม็ดไขมันทำให้ไขมันเหลวไหลออกมาเกิดเป็นฟิล์มเชื่อมระหว่างเม็ดไขมันที่อยู่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2.11



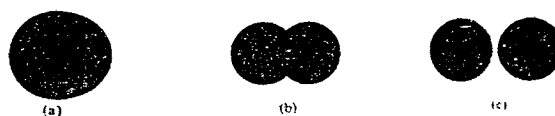
รูปที่ 2.11 ภาพจำลองการเกิด partial coalescence ของเม็ดไขมัน (Walstra & Jonkman, 1998; นันทินา, 2544)

จำนวนผลึกไขมันภายในเม็ดไขมันมีความจำเป็นต่อการเกิด destabilized fat ถ้าจำนวนผลึกที่เกิดขึ้นมีน้อยความสามารถในการเก็บเซลล์อากาศจะลดลง การบ่มไอศกรีมเหลวเป็นเวลานานขึ้นสามารถเพิ่มจำนวนผลึกไขมันภายในเม็ดไขมันได้ หลังจากบ่มไอศกรีมเหลวและนำไปผ่านกระบวนการตีอากาศเข้าไป เซลล์อากาศที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนที่เชื่อมกันเกิดเป็นเซลล์อากาศที่มีขนาดใหญ่ในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง

2.3.5 บทบาทการรวมกลุ่มของเม็ดไขมันและโครงข่ายของเม็ดไขมัน

การรวมกลุ่มของเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นระหว่าง partial coalescence ทำให้เกิด destabilized fat บางส่วนในระบบอิมัลชันของไอศกรีม ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ไอศกรีมแห้งมีเนื้อสัมผัสและโครงสร้างของไอศกรีมที่ดี (Goff, 1997) โครงข่ายของเม็ดไขมันส่งผลต่อการละลายของไอศกรีมทำให้โครงสร้างของไอศกรีมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การแข็งตัวของไอศกรีมมีอิทธิพลมาจากโครงสร้างของผลึกน้ำแข็งภายใต้อุณหภูมิที่เก็บรักษา แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลึกน้ำแข็งไม่สามารถเชื่อมติดกันได้ ดังนั้นโครงข่ายของเม็ดไขมันจึงมีความสำคัญต่อการคงรูปของโครงสร้างไอศกรีมหลังจากผลึกน้ำแข็งละลาย ลักษณะเม็ดไขมันในรูปคอลลอยด์ หรือเม็ดไขมันที่อยู่ในระบบอิมัลชันเป็นตัวกำหนดขอบเขต และอัตราการเกิดโครงข่ายของเม็ดไขมันเป็นผลมาจากแรงผลัก (repulsion force) และแรงดูด (attractive force) ในกระบวนการเกิดการเกาะกลุ่มของเม็ดไขมันถ้าเกาะกันหลวม ๆ หรือเม็ดไขมันที่กลับมาเกาะกลุ่มกันอีกครั้งจะอยู่ในรูป flocculation สามารถกระจายตัวได้เมื่อกวน (Anderson et al., 1994) เป็นผลมาจากสมดุลของแรงผลักและแรงดูดทำให้เม็ดไขมันคงตัวอยู่

หลังจากไอศกรีมเหลวผ่านการโฮโมจีไนส์แล้วเม็ดไขมันจะอยู่ในรูปของ clustering ซึ่งเป็นการเชื่อมกันของพื้นผิวของเม็ดไขมันที่ล้อมรอบด้วยโปรตีน เช่น เคซีนไมเซลล์ ที่อยู่ใกล้เคียงกัน อาจจับกันอยู่ได้มากกว่า 2 โมเลกุลขึ้นไป ลักษณะการเกาะกลุ่มที่เด่นชัดในไอศกรีมอยู่ในรูปของ partial coalescence หรือ clumping ในขั้นตอนนี้ ฟิสิ่มที่อยู่ระหว่างเม็ดไขมันที่เชื่อมติดกันจะแตกออก ยกเว้นเม็ดไขมันที่ประสานกันอย่างเต็มที่ (full coalescence) ซึ่งเกิดจากผลึกไขมันที่อยู่รวมกันจำนวนมากในเม็ดไขมันนั่นเอง ส่วนเม็ดไขมันที่อยู่ในรูป partial coalescence นั้นเกิดจากเม็ดไขมัน 2 โมเลกุลซึ่งเชื่อมกันอยู่ในรูปของคอลลอยด์บริเวณที่ได้รับแรงเฉือน หรือเชื่อมอยู่บริเวณพื้นผิวของเซลล์อากาศ (พัชรินทร์, 2544)



รูปที่ 2.12 การเกิด coalescence ของเม็ดไขมัน (a) เม็ดไขมันเกิด coalescence อย่างสมบูรณ์

(b) เม็ดไขมันเกิด coalescence บางส่วน (c) เม็ดไขมันไม่เกิด coalescence (Clarke, 2004)

2.4 องค์ประกอบของไอศกรีม

ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ วัตถุดิบหลัก เช่น โปรตีนนม น้ำตาล ไขมัน และน้ำ วัตถุดิบรอง เช่น สารให้ความคงตัว (stabilizer) อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) สี (colors) สารให้กลิ่นรส และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น เวเฟอร์ (Wafer) ช็อกโกแลต ชิ้นผลไม้และถั่วต่างๆ เป็นต้น ไอศกรีมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากนม และผลิตภัณฑ์นม ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ จะมีคุณค่าทางอาหารสูง ดังนั้นจึงจัดว่าเป็นอาหารที่ให้พลังงานต่อร่างกาย ตารางที่ 2.2 แสดงถึงปริมาณสารอาหารต่างๆ พลังงานของไอศกรีมชนิดต่างๆ

แต่ละส่วนประกอบในไอศกรีมนั้นมีบทบาทสำคัญต่อเนื้อสัมผัส กลิ่นรส และความคงตัวของไอศกรีม ซึ่งองค์ประกอบหลัก ๆ คือ ไขมัน ร้อยละ 8-20 ของแข็งไม่รวมไขมัน (milk solid not fat: MSNF) ร้อยละ 8-15 น้ำตาลร้อยละ 13-20 สารให้ความคงตัว-อิมัลซิไฟเออร์ ร้อยละ 0.0-0.7 และปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid: TS) ร้อยละ 36-43 (Arbuckle, 1986)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของไอศกรีมชนิดต่าง ๆ (ต่อ 100 กรัมที่บริโภคได้)

ส่วนประกอบ (ร้อยละ)	ไอศกรีม มาตรฐาน	ไอศกรีมที่มีปริมาณ ไขมัน (ร้อยละ)			ไอศกรีมนม	ไอศกรีมโคน	หวานเย็น
		10	12	16			
น้ำ	61.7	63.2	62.1	62.8	66.7	8.9	66.9
พลังงาน (แคลอรี)	196.7	193.0	207.0	222.0	152.0	372.0	78.0
โปรตีน	4.1	4.5	4.0	2.6	4.8	10.0	0.4
ไขมัน	12.0	10.6	12.5	16.1	5.1	2.4	Trace
คาร์โบไฮเดรต	20.7	20.8	20.6	18.0	22.4	77.9	32.6
น้ำหนัก(กรัม)	50.8	51.7	48.3	45.0	65.6	26.5	128.4

ที่มา : Arbuckle (1986)

2.4.1 อากาศ

อากาศ (air) ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของไอศกรีมซึ่งจะมีผลทั้งต่อลักษณะทางกายภาพและความคงตัวของ การเก็บรักษาซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็ง (hardness) ของไอศกรีม โดยถ้าไอศกรีมไม่มีฟองอากาศจะได้ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสที่แข็ง ซึ่งการเพิ่มค่าโอเวอร์รัน (overrun) ให้สูงขึ้นจะทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่าไอศกรีมที่มีค่าโอเวอร์รันต่ำกว่า (Clarke, 2004) โอเวอร์รันจะแสดงออกเป็นร้อยละของปริมาตรอากาศที่เพิ่มขึ้นของส่วนผสม การที่ปริมาตรเพิ่มขึ้นเนื่องจากขณะปั่นไอศกรีมมีการผสมอากาศเข้าไปในเนื้อไอศกรีม การผสมอากาศจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนผสม หากอากาศมากเกินไป ไอศกรีมจะเบา โปร่งไม่น่ารับประทาน แต่ถ้ามีอากาศน้อยเกินไปเนื้อจะแน่นหรือหนัก โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดโอเวอร์รันเช่น ปริมาณของแข็งทั้งหมดในส่วนผสม ราคาจำหน่ายของไอศกรีม และชนิดของไอศกรีม เป็นต้น การผลิตไอศกรีมมีโอเวอร์รันต่างกันประมาณร้อยละ 10 ย่อมทำให้เกิดความเสียหายโดยเฉพาะเรื่องต้นทุนการผลิต และยังส่งผลต่อการยอมรับและความนิยมของผู้บริโภคด้วย (บุญช่วย, 2547) ซึ่งโอเวอร์รันของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่าโอเวอร์รันของผลิตภัณฑ์นมแช่แข็งชนิดต่าง ๆ

ผลิตภัณฑ์	โอเวอร์รัน (ร้อยละ)
ไอศกรีม (บรรจุกล่อง)	70-80
ไอศกรีม (ทั่วไป)	90-100
เชอร์เบท	30-40
ไอซ์	25-30
ไอศกรีมชนิดเหลว	30-50
ไอซ์มิลค์	50-80
มิลค์เชค	10-15

ที่มา: บุญช่วย (2547)

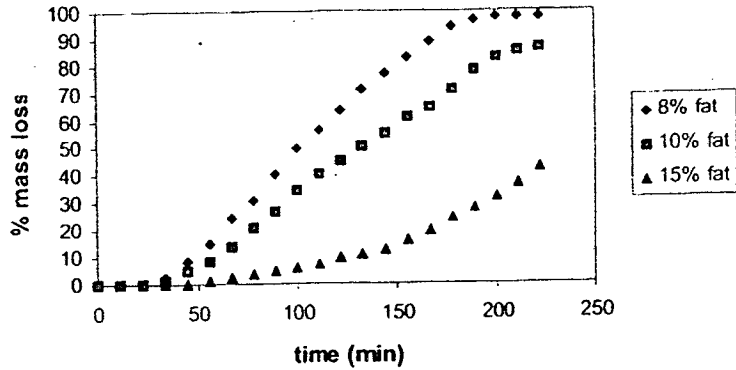
การมีผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดเล็ก และ serum phase ที่หนืดจะช่วยให้เซลล์อากาศมีความคงตัวเพิ่มมากขึ้น ช่วยลดอัตราการละลายของไอศกรีม ซึ่งในการผลิตไอศกรีมที่มีคุณภาพสูงจะต้องมีการควบคุมการตีอากาศทำให้ได้ระดับของโอเวอร์รันที่แตกต่างกัน ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญและส่งผลต่อคุณลักษณะของไอศกรีม ดังนั้นควรปรับให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม และต้องควบคุมการกระจายตัวของขนาดของเซลล์อากาศให้มีความสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ไอศกรีมที่มีคุณภาพที่ดี (Sofjana & Hartel, 2004) ฟองอากาศมีผลต่อสีและลักษณะปรากฏของไอศกรีมเนื่องจากฟองอากาศจะสะท้อนแสงได้ ดังนั้นไอศกรีมที่มีฟองอากาศมากจะมีสีสว่างกว่า ไอศกรีมที่มีฟองอากาศน้อยกว่า นอกจากนี้ขนาดของฟองอากาศมีผลต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม ตัวอย่างเช่น ไอศกรีมที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่า (Clarke, 2004) และในไอศกรีมที่มีปริมาณไขมันต่ำ การลดไขมันลงมีผลทำให้มีไขมันไม่เพียงพอที่จะคลุมผิวของฟองอากาศ ทำให้บางส่วนของฟองอากาศจึงถูกปกคลุมด้วยอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งจะทำให้ฟองอากาศมีความคงตัว และเพิ่มความหนืดของ matrix ดังนั้นการเกิด partial coalescence ในไอศกรีมจะช่วยลดการแตกของฟองอากาศหรือช่วยให้โครงร่างขยายออกไปมากขึ้น ความดันมีผลต่อความคงตัวของฟองอากาศเช่นเดียวกับอุณหภูมิมีผลกับผลึกน้ำแข็ง (Clarke, 2004)

Sofjana & Hartel (2004) ทำการศึกษาถึงผลของค่าโอเวอร์รันต่อโครงสร้างทางกายภาพของไอศกรีม พบว่าขนาดเฉลี่ยของเซลล์อากาศจะเพิ่มขึ้นในระหว่างการแช่แข็ง จากนั้นก็จะลดลงในช่วงแรกๆ ของการเก็บรักษาและจะเพิ่มขนาดขึ้นอย่างมากเมื่อเก็บรักษาไว้นาน 3 เดือน และไอศกรีมที่มีค่าโอเวอร์รันต่ำกว่าจะมีค่าความแข็งมากกว่าไอศกรีมที่มีโอเวอร์รันสูงกว่าแต่มีอัตราการละลายที่สูงกว่า ซึ่งการเพิ่มโอเวอร์รันให้สูงขึ้นจะเป็นการลดค่าความแข็งของไอศกรีมและในตัวอย่างที่มีโอเวอร์รันสูงพบว่าในตอนเริ่มต้น เซลล์อากาศที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากในขณะตีอากาศเข้าไปต้องใช้แรงมาก ซึ่งถ้าฟองอากาศได้รับแรงมากขึ้น ฟองอากาศก็จะแตกตัวซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ความหนืดปรากฏ (appearance viscosity) ของไอศกรีมที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อฟองอากาศเพิ่มมากขึ้นและยังส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กลงซึ่งจะเป็นผลสัมพันธ์กับการส่งผ่านความร้อนเนื่องจากขณะที่เราใส่อากาศมาก เครื่องก็ต้องทำงานมากทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งโครงสร้างของไอศกรีมที่มีโอเวอร์รันเพิ่มขึ้นจะทำให้เนื้อสัมผัสของไอศกรีมมีความนุ่มขึ้นและมีอัตราการละลายได้ช้าลง เนื่องจากการเกิด fat destabilization มากกว่าและการมีอากาศมากจะเป็นฉนวนการส่งผ่านความร้อนเกิดได้ช้าลง ซึ่งเซลล์อากาศที่เกิดขึ้นระหว่างการปั่นแข็งไอศกรีมสามารถคงรูปอยู่ได้ด้วยการรวมกลุ่มของเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นระหว่าง partial coalescence ทำให้เกิด destabilized fat บางส่วนในระบบอิมัลชันของไอศกรีมลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสและโครงสร้างของไอศกรีมที่ดี แต่ก็พบว่ามีกลไก

ที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของเซลล์อากาศ คือ disproportionation คือกลไกที่ทำให้ ฟองอากาศเกิดการแตกตัว กลไกนี้เกิดจากการรวมตัวกันของ ฟองอากาศ อันเป็นผลมาจาก Laplace pressure ซึ่งฟองอากาศ 2 อันที่มีขนาดแตกต่างกันจึงมีความดันที่ภายในแตกต่างกัน ทำให้เกิดการแพร่ของอากาศผ่านฟิล์มซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความดันมากกว่า ดังนั้นอากาศจะพยายามแพร่จากที่ที่มีความดันสูงไปที่ที่มีความดันต่ำกว่า ทำให้ฟองอากาศเกิดการรวมตัวกัน โดยทั่วไปสามารถควบคุมการเกิด disproportionation ได้โดยการเพิ่มความหนืดของ serum phase การทำให้ฟิล์มที่กั้นระหว่าง เซลล์อากาศหนาขึ้น และการลดอุณหภูมิก็มีส่วนที่จะช่วยลดการเกิด disproportionation ได้ แต่จะส่งผลให้ความดันเปลี่ยนแปลง และทำให้ขนาดในช่วงแรกของการเกิด disproportionation ขนาดเฉลี่ยของเซลล์อากาศจะมีขนาดเล็กลง แต่ก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความหนืดของ serum phase การเพิ่มความหนาของฟิล์มที่อยู่ระหว่างเซลล์อากาศ และการลดอุณหภูมิในการเก็บรักษาให้อยู่ในระดับต่ำ จะช่วยลดการเกิด disproportionation ได้ ซึ่งจะหาไอศกรีมมีคุณลักษณะที่ดี ลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์ได้ และสามารถเก็บรักษาไอศกรีมได้ยาวนานยิ่งขึ้น โดยยังคงคุณภาพที่ดีไว้ได้ ไอศกรีมที่มีค่าโอเวอร์รัน ร้อยละ 80 มีอัตราการละลาย เร็วกว่าไอศกรีมที่มีค่าโอเวอร์รันร้อยละ 100 และ 120 ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเกิด fat destabilization หรือการมีขนาดของผลึกน้ำแข็งและเซลล์อากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งในไอศกรีมที่มีค่าโอเวอร์รันสูง จะเกิดแรงมากในขณะที่ตีอากาศทำให้เกิด fat destabilization มากกว่า และอากาศเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ดังนั้นการมีอากาศมากจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดได้ช้าลง

2.4.2 ไขมัน

ไขมัน (fat) เป็นดัชนีสำคัญที่บอกถึงคุณภาพของไอศกรีม ไขมันมีบทบาทสำคัญที่จะช่วยทำให้ฟองอากาศมีความคงตัวดังกล่าวนมาข้างต้น และยังมีหน้าที่สำคัญอย่างอื่นอีก กล่าวคือ มีผลอย่างมากต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสเช่น เนื้อสัมผัส หรือการเคลือบเพดานปากให้ความรู้สึกเรียบเนียนของไอศกรีม เม็ดไขมันจะช่วยเพิ่มความหนืดให้กับส่วนผสม ช่วยให้โฟมมีความคงตัวซึ่งมีผลอย่างมากต่อ ลักษณะความเป็นครีมของไอศกรีม และทำให้อัตราการละลายลดลง รูปที่ 2.13 แสดงอัตราการละลายของไอศกรีมที่มีไขมันร้อยละ 8, 10 และ 15 จะเห็นว่า ไอศกรีมที่มีไขมันร้อยละ 8 มีอัตราการละลายเร็วที่สุด ในขณะที่ไอศกรีมที่มีไขมัน ร้อยละ 12 มีอัตราการละลายช้าที่สุด (Clarke, 2004)



รูปที่ 2.13 เส้นกราฟการละลายของไอศกรีมที่มีไขมันร้อยละ 8, 10 และ 15 (Clarke, 2004)

ดังนั้นการเกิดโครงข่ายของเม็ดไขมันในโครงสร้างของไอศกรีมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่ ขนาดของเม็ดไขมัน ระดับของไขมันในสูตร ขั้นตอนการผลิตไอศกรีมและองค์ประกอบบนพื้นผิวของเม็ดไขมัน รวมทั้งคุณสมบัติขององค์ประกอบดังกล่าวที่ล้อมรอบเม็ดไขมัน ในการผลิตไอศกรีมจึงจำเป็นต้องเลือกวัตถุดิบในการผลิตที่เหมาะสมเพื่อให้โครงข่ายของเม็ดไขมันที่เกิดขึ้นมีลักษณะดีส่งผลให้ได้ไอศกรีมที่มีลักษณะดีตามต้องการด้วย (Campbell & Pelan, 1998) นอกจากนี้ไขมันยังทำหน้าที่ให้กลิ่นรสแก่ผลิตภัณฑ์และเป็นตัวพาสารให้กลิ่นรสที่เติมลงไปไอศกรีมระหว่างไอศกรีมละลายในปาก ระดับของไขมันมีผลต่อช่วงเวลาการปลดปล่อยกลิ่นรสและระยะเวลาการรับรู้กลิ่นรสของไอศกรีม (พัชรินทร์, 2544)

Cheema & Aroma (1991) ศึกษาการผลิตไอศกรีมที่มีส่วนประกอบไขมันร้อยละ 10 (โดยใช้ไขมันไม่อิ่มตัวจากพืชคือ น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันข้าวโพด) น้ำตาลทรายร้อยละ 15 และของแข็งจากนมที่ไม่ใช่ไขมัน (milk solid non fat) ร้อยละ 12 ผันแปรปริมาณสารให้ความคงตัวโซเดียมอัลจิเนต (ร้อยละ 0.3 และ 0.4) และอิมัลซิไฟเออร์ ทวิน 80 (Tween 80) (ร้อยละ 0.08, 0.10, และ 0.12) ไอศกรีมสูตรควบคุมประกอบด้วยไขมันนมโซเดียมอัลจิเนต (ร้อยละ 0.3) และทวิน 80 (ร้อยละ 0.06) พบว่าการขึ้นฟูของไอศกรีมที่ใช้ไขมันพืชต่ำ แต่ปริมาณไขมันอิสระสูง มีค่าสูงกว่าของสูตรควบคุม ไอศกรีมที่ใช้ไขมันพืชโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 0.3 และทวิน 80 ร้อยละ 0.1 ได้รับการประเมินทางประสาทสัมผัสใกล้เคียงกับสูตรควบคุม

Sivaramakrishnan และคณะ (1994) ได้ทดลองใช้ไขมันพืชเพื่อทดแทนไขมันนมบางส่วนในการผลิตไอศกรีมซอฟต์เสิร์ฟ (soft serve ice cream) ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ ไขมันร้อยละ 10 milk solid non fat ร้อยละ 12 น้ำตาลร้อยละ 15 และสารให้ความคงตัว โซเดียมอัลจิเนต คาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลส เจลาติน แต่ละชนิดเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยใช้น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันถั่วเหลืองทดแทนไขมันดังต่อไปนี้ ใช้น้ำมันเมล็ดฝ้ายทดแทนร้อยละ 20 และ 15

น้ำมันเมล็ดฝ้ายร้อยละ 10 ผสมกับน้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 5 ส่วนสูตรควบคุมใช้ไขมันนม จากการประเมินสมบัติทางประสาทสัมผัสกายภาพ เคมี และการทดสอบปริมาณโคเลสเตอรอลในเลือดของหนู 30 ตัวที่มีอายุ 30-40 วัน พบว่า สารให้ความคงตัวที่เหมาะสมที่สุดคือ เจลาติน รองลงมาคือโซเดียมอัลจิเนต ผู้ทดสอบชิมยอมรับสูตรที่ใช้ไขมันพืช เมื่อใช้น้ำมันเมล็ดฝ้ายทดแทนไขมันนมในปริมาณที่มากขึ้นพบว่าระดับโคเลสเตอรอลในเลือดของหนูลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ต้นทุนการผลิตลดลงและยังให้อัตราการละลายช้าลงอย่างชัดเจน

Guinard และคณะ (1997) ศึกษาผลของน้ำตาลและไขมันที่มีต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมวานิลลาโดยผันแปรปริมาณน้ำตาลซูโครส (ร้อยละ 8, 13, และ 18) และปริมาณไขมัน (ร้อยละ 10, 14, และ 18) พบว่าปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นทำให้การรับรู้กลิ่นวานิลลา กลิ่นอัลมอนด์ กลิ่นเนย และรสหวานเพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะความมัน ลักษณะความเป็นครีม การเคลือบในปาก และการลดความเย็นในปากนั้นมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดลดลง อัตราการละลายช้าลง และความแข็งลดลงอีกด้วย การเพิ่มปริมาณไขมันมีผลในการเพิ่มกลิ่นเนย รสหวาน ความมัน ทำให้การละลายช้าลง การยอมรับของผู้บริโภคมีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกับสีที่ปรากฏ ขนาดผลึกน้ำแข็ง และความแข็ง จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) เพื่อหาระดับน้ำตาล และไขมันที่มีผลให้ผู้บริโภคยอมรับไอศกรีมวานิลลามากที่สุด พบว่า น้ำตาลร้อยละ 13.2 ไขมันร้อยละ 14 มีอิทธิพลต่อความชอบด้านเนื้อสัมผัส ความรู้สึกในปากมากที่สุด น้ำตาลร้อยละ 14.1 และไขมันนมร้อยละ 15.4 มีอิทธิพลต่อความชอบด้านกลิ่นรสมากที่สุด น้ำตาลร้อยละ 14.3 ไขมัน ร้อยละ 14.8 มีอิทธิพลต่อการยอมรับรวมมากที่สุด

Roland และคณะ (1999) ศึกษาสมบัติของไอศกรีมวานิลลาที่มีไขมันนม ร้อยละ 0.1, 3, 7 และ 10 ประเมินผลโดยใช้เครื่องวัดและผู้ทดสอบชิม พบว่าไอศกรีมที่มีไขมันนม ร้อยละ 0.1, 3 และ 7 ไม่มีความแตกต่างกันในลักษณะความแข็งและอัตราการละลาย แต่ต่างจากไอศกรีมที่มีไขมัน ร้อยละ 10 ($P \leq 0.05$) โดยไอศกรีมที่มีไขมันร้อยละ 10 มีอัตราการละลายช้ากว่าและมีความแข็งน้อยกว่าไอศกรีมที่มีไขมันร้อยละ 7 สำหรับการทดสอบด้านประสาทสัมผัสโดยใช้ผู้ทดสอบชิม พบว่าไอศกรีมไขมันต่ำจะมีลักษณะเป็นเกล็ดน้ำแข็งและร่วนมากกว่า ส่วนรสหวานไม่มีความแตกต่างสำหรับไอศกรีมที่มีปริมาณไขมันระหว่างร้อยละ 0.1 - 7.0 ความมันของไอศกรีมจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น ไอศกรีมที่มีไขมันลดลงกลิ่นของนมผงจะเพิ่มขึ้น ถึงแม้ไอศกรีมที่มีไขมันร้อยละ 0.1 จะมีปริมาณนมผงผสมอยู่น้อยกว่าก็ตาม นอกจากนี้ยังพบว่ากลิ่นคอร์นไซรัป (corn syrup) จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไขมันลดลง โดยกลิ่นของนมผงและคอร์นไซรัปถ้ามีมากเกินไปจะทำให้การยอมรับของผู้บริโภคน้อยลง

Aime และคณะ (2001) ได้ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมวานิลลา พบว่าไอศกรีมที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบร้อยละ 5 มีคุณภาพเทียบเท่ากับไอศกรีมที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบร้อยละ 10 แต่ไอศกรีมที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบร้อยละ 2.5 และไอศกรีมปราศจากไขมัน (fat free) จะมีคุณภาพที่ด้อยกว่าทั้งในด้านความหนืด ความเรียบเนียน และความรู้สึกในปาก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้แป้งถั่วตัดแปรรูป (modified pea starch) เป็นสารทดแทนไขมัน ทำให้ไอศกรีมมีเนื้อแน่น ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กลง ไม่มีผลต่อกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า modified starch สามารถช่วยป้องกันการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกน้ำแข็งในไอศกรีมที่ลดปริมาณไขมันลง และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแน่นเนื้อเท่ากับไอศกรีมปกติ

Muhammet (2006) ได้ศึกษาผลของการใช้ hazelnut flour (ร้อยละ 1.5, 3 และ 4.5) และ hazelnut kernel skin (ร้อยละ 1, 2 และ 3) เป็นสารทดแทนไขมัน ที่มีต่อคุณลักษณะทางกายภาพ ทางเคมีและทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมวานิลลา พบว่า hazelnut flour และ hazelnut kernel skin มีความเหมาะสมที่จะใช้ในไอศกรีมวานิลลา ไอศกรีมที่เติม hazelnut flour จะมีค่า pH ไนโตรเจน (nitrogen) เถ้า ความหนืด กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และลักษณะปรากฏที่ดีกว่าไอศกรีมที่มีการเติม hazelnut kernel skin ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถเติม hazelnut flour ในส่วนผสมได้มากถึงร้อยละ 3 ส่วน hazelnut kernel skin สามารถเติมได้ร้อยละ 1 โดยใช้ร่วมกับ maltodextrin จะทำให้ได้ไอศกรีมที่มีคุณลักษณะที่ต้องการมากที่สุด

Tanteeratarom และคณะ (1993) รายงานว่า ไขมันช่วยเพิ่มรสชาติและให้เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียนของไอศกรีมถั่วเหลือง ไขมันได้มาจากนมถั่วเหลืองและไขมันพืช เช่นน้ำมันมะพร้าว ที่ผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจนซึ่งเป็นไขมันอิ่มตัวมีคุณสมบัติคล้ายไขมันนม ไขมันอิ่มตัวเช่น น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน น้ำมันข้าวโพด น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันดอกคำฝอย อาจเป็นทางเลือกของแหล่งไขมัน แต่จะลดการขึ้นฟูและเกิดกลิ่นไม่ดี เนื่องจากไขมันเหล่านี้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายแต่มีข้อดีก็คือ ไม่มีโคเลสเตอรอล

Li และคณะ (1997) ศึกษาผลของความเข้มข้นของไขมันนมต่อการรับรู้กลิ่นรสวานิลลาในไอศกรีม ที่ระดับไขมันนมตั้งแต่ร้อยละ 0.5-10 โดยการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสร่วมกับการวิเคราะห์ปริมาณวานิลลิน (vanillin) โดยใช้เครื่อง high performance liquid chromatography (HPLC) พบว่าปริมาณวานิลลินอิสระลดลงเมื่อปริมาณไขมันในไอศกรีมสูงขึ้น แต่ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยผู้ชิมที่ผ่านการฝึกฝนแล้วพบว่ากลิ่นวานิลลินแตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผู้ทดสอบชิมบอกได้เพียงว่า เมื่อปริมาณไขมันในสูตรไอศกรีมเพิ่มขึ้นคุณสมบัติต่างๆ

ทางประสาทสัมผัสดีขึ้น มีลักษณะการยอมรับรวมที่ดี และมีระยะเวลาการรับรู้กลิ่นรสยาวนานขึ้นตามปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้น โดยให้ผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในไอศกรีมแต่ละสูตร

Ohmes และคณะ (1998) รายงานว่า ไขมันเป็นตัวพาสารให้กลิ่นรสที่เติมลงในไอศกรีมที่สำคัญในระหว่างที่ไอศกรีมมีการละลายในปาก การยอมรับรวมจึงแตกต่างกันเมื่อมีปริมาณของไขมันแตกต่างกัน ซึ่งสารให้กลิ่นรสส่วนใหญ่เป็นสารที่ละลายในไขมัน (fat soluble) จะถูกนำเข้าไปในปากและระเหยสู่ sensory reception ใน olfactory system เมื่อไขมันมีไม่พอที่จะพาสารให้กลิ่นรสได้ กลิ่นรสก็จะระเหยไปอย่างรวดเร็วเป็นเหตุให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสลดลง

2.4.3 น้ำ

น้ำ (water) เป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุด ในไอศกรีม ไอศกรีมส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำอย่างน้อยร้อยละ 60-70 (โดยน้ำหนัก) โดยที่อยู่ในสภาพผลึกน้ำแข็งเกือบทั้งหมด ณ อุณหภูมิที่รับประทาน น้ำในรูปของผลึกน้ำแข็งมีส่วนสำคัญ ในการทำให้ไอศกรีมสร้างความ สดชื่น ซึ่งแตกต่างไปจากผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคชนิดไม่แช่แข็งชนิดอื่น ความสมดุลระหว่างผลึกน้ำแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวและขนาดของผลึกน้ำแข็ง มีบทบาทที่สำคัญต่อการรับประทานไอศกรีม แต่น้ำในไอศกรีมจะมาจากส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ น้ำนม น้ำเชื่อม เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมทั้งหลายเหล่านี้จะกระจายหรือแขวนลอยอยู่ในส่วนของน้ำของไอศกรีม (ภัทรา, 2540)

2.4.4 สารให้ความคงตัว

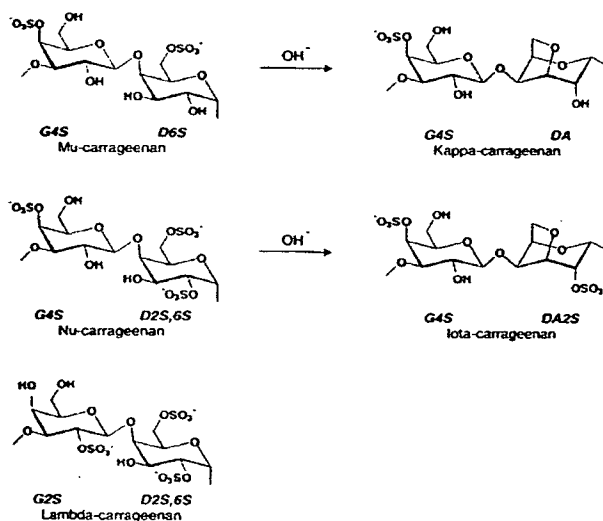
สารให้ความคงตัว (stabilizer) มีความสามารถในการเกิดพันธะกับน้ำได้ดี มีหน้าที่ปรับปรุงเนื้อสัมผัสไอศกรีมให้เรียบเนียนป้องกันไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ขณะแช่แข็ง และในระหว่างการเก็บรักษาภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิที่มีความผันแปร (heat shock) ไม่ทำให้เนื้อไอศกรีมหยาบ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวดีและยืดระยะเวลาในการละลายของไอศกรีม สารให้ความคงตัวจะไปเพิ่มความหนืดแต่ไม่มีผลต่อจุดเยือกแข็งของไอศกรีม ปริมาณการใช้โดยทั่วไปประมาณร้อยละ 0.2-0.3 บางครั้งมีการใช้สารให้ความคงตัวหลายชนิดมาผสมกัน เพื่อปรับปรุงคุณภาพไอศกรีมให้ดีขึ้น เนื่องจากใช้สารเหล่านี้ในปริมาณน้อย จึงไม่มีผลต่อคุณค่าทางอาหารและกลิ่นรส การใช้สารให้ความคงตัวมากเกินไป ทำให้ไอศกรีมละลายช้า มีผลทำให้เนื้อสัมผัสแข็ง ไอศกรีมแฉะหรือเหนียวมาก (Marshall & Arbuckle, 1996) หน้าที่ของสารให้ความคงตัวคือ เป็นตัวช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของของหวานแช่แข็งและป้องกันความเค้นเนื่องจากความร้อนในระหว่างการจำหน่าย สารให้ความคงตัวยังช่วยเพิ่มความหนืดของ

ส่วนผสมไฮดรอกซีเซลลูโลส ความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้อากาศเข้ามาแทรกตัวอยู่ด้วยได้มากขึ้น และช่วยเพิ่มลักษณะเนื้อ ซึ่งการจับกันของไฮดรอกซีเซลลูโลสจะช่วยให้ความหนืดของส่วนผสมมากขึ้นให้มีลักษณะเนื้อ (body) มากขึ้น และช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านการละลาย เนื่องจากสารให้ความคงตัวมีอันตรกิริยากับโปรตีนนมและส่วนประกอบอื่นๆ โดยจับยึดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ จึงทำให้ไฮดรอกซีเซลลูโลสละลายได้ช้าลงและมีความคงตัวขณะละลาย นอกจากนี้ สารให้ความคงตัวช่วยยับยั้งการยุบตัวและปรับปรุงความคงตัวโดยการทำให้ผลึกน้ำแข็งโตขึ้นอย่างช้าๆ ชะลอการเกิดผลึกและการเติบโตของผลึกน้ำแข็ง เป็นผลทางตรงที่เกิดจากการจับกันของไฮดรอกซีเซลลูโลสกับส่วนประกอบต่างๆ ในไฮดรอกซีเซลลูโลส

(1) แซนแทนกัม (xanthan gum) เป็นกัมที่ผลิตโดยแบคทีเรีย คือ *Xanthomonas campestris* สูตรโครงสร้างประกอบด้วย ดี-กลูโคส (D-glucose) ดี-แมนโนส (D-mannose) และกรดดี-กลูคูโรนิก (D-gluconic) ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่อะซิทิล (acetyl) ประมาณร้อยละ 4.7 และกรดไพรูวิก (pyruvic) ประมาณร้อยละ 3-3.5 โดยมีกลูโคสต่อกับ แมนโนส เป็นเส้นตรงยาวด้วยพันธะเบต้า (1-4) และสายแขนงต่อกับแมนโนสและกลูโคส (Klose & Glicksman, 1983) แซนแทนกัมนิยมใช้ในอาหาร เพราะสามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายมีความหนืดสูงถึงแม้จะมีความเข้มข้นต่ำ ความหนืดของสารละลายแซนแทนกัมจะมีความคงตัวไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น ที่อุณหภูมิ 5-70 องศาเซลเซียส หรือ pH ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้างก็ตาม เช่น ในน้ำสลัดมี pH 3.5 นอกจากนี้ในสารละลายแซนแทนกัมยังมีคุณสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (pseudoplastic) ซึ่งมีความสำคัญต่อกลิ่นรส ลักษณะปรากฏและความรู้สึกเมื่ออาหารอยู่ในปาก (mouth-feel) แซนแทนกัมเป็นสารให้ความคงตัวในไฮดรอกซีเซลลูโลส สารเพิ่มความข้นหนืดในอาหารพวกซूप ซอสชนิดต่างๆ และน้ำสลัด เป็นต้น แซนแทนกัม ใช้ในไฮดรอกซีเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 0.2 เพื่อป้องกันการเกิด heat shock ปรับปรุงเนื้อสัมผัสไฮดรอกซีเซลลูโลสให้ดีขึ้น และทำให้ mouth-feel ดีขึ้น

(2) คาราจีแนน (carrageenan) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง เช่น *Eucheuma cottonii*, *Chondrus crispus*, *Gigartina stellata* และ *iradaea* เป็นต้น มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไอร์ริชมอส (irish moss) แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ แคปปา (kappa) ไอโอตา (iota) และแลมบ์ดา (lambda) โครงสร้างหลักทางเคมีประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (galactose) ต่อสลับกันด้วยพันธะแอลฟา 1,3 และ บีต้า 1,4 เป็นโมเลกุลใหญ่ ส่วนที่แตกต่างกันระหว่างคาราจีแนนทั้ง 3 ชนิด คือ จำนวนและตำแหน่งของหมู่ซัลเฟต (รูปที่ 2.14) คาราจีแนนชนิดแคปปาและไอโอตาเท่านั้นจะทำให้เกิดเจลได้ แคปปา-คาราจีแนนละลายได้ดีในน้ำอุ่น อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนนมให้เจลที่หลอมได้เมื่อถูกความร้อน เจลที่ได้มีลักษณะเปราะและเกิดการแยกน้ำ (syneresis) ได้ง่ายดังนั้นจึงมักจะใช้ร่วมกับตัวอื่นเพื่อ

แก้ปัญหานี้ ส่วนชนิดไฮโดรเจลละลายได้ในน้ำอุ่น 55 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยากับโปรตีนในนม ให้เจลที่มีความยืดหยุ่น (elastic gel) โดยไม่มีการแยกน้ำ สำหรับชนิดแลมบ์ดานั้นสามารถละลายได้ในน้ำเย็นและใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดเท่านั้น หากทำปฏิกิริยากับโปรตีนนมจะให้เจลที่ละเอียด (สุวรรณา, 2543) คาราจีแนนจะให้ความหนืดต่ำในส่วนผสมที่ร้อนเพราะจะอยู่กันเป็นโมเลกุลเดี่ยวๆ แต่ถ้าส่วนผสมเย็นตัวลงความหนืดจะเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของเจล (gel strength) จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมโพแทสเซียมไอออน เมื่อใช้แคปปา-คาราจีแนนร่วมกับโลคัลปีนัม จะให้เจลที่มีความยืดหยุ่นและมีการยึดเกาะกัน (cohesive) โดยไม่เกิดการแยกน้ำในไอศกรีมจะให้อยู่ในช่วงร้อยละ 0.02-0.15 (Marshall & Arbuckle, 1996)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของคาราจีแนนทั้งสามชนิด (Steinbüchel & Rhee, 2005).

(3) เจลาติน (gelatin) เจลาตินเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งมาจากพอลิเพปไทด์ (polypeptide) ของสัตว์ ได้จากการไฮโดรไลซ์วัตถุดิบที่มีคอลลาเจน (collagen) จะมีกรดอะมิโนเช่นเดียวกับที่พบจากการไฮโดรไลซ์โปรตีนต่างๆ ไป ยกเว้นไม่มีทริปโตเฟน (tryptophan) และมีกรดอะมิโนบางตัวสูงเป็นพิเศษ ได้แก่ ไกลซีน (glycine) ร้อยละ 27 โพรลีน (proline) และไฮดรอกซีโพรลีน (hydroxyproline) รวมกันร้อยละ 25 เจลาตินที่จำหน่ายในท้องตลาดมี 2 ชนิดโดยพิจารณาตามกรรมวิธีการผลิต คือ เจลาตินแบบเอ ใช้กรดอินทรีย์เจือจางในการไฮโดรไลซ์และใช้หนังหมูเป็นวัตถุดิบ มีค่า pI ระหว่าง 7.5-9.5 หรือใช้กระดูกเป็นวัตถุดิบมีค่า pI ระหว่าง 6.5-8.5 แบบบีซึ่งใช้ต่างในการไฮโดรไลซ์ และใช้หนังวัวเป็นวัตถุดิบจะมีค่า pI ระหว่าง 4.8-5.2 ในกระบวนการไฮโดรไลซ์นั้นโมเลกุลของคอลลาเจนจะเกิดการแตกหักลงไปเรื่อยๆ ดังนั้นในแต่ละขั้นตอนการย่อยเจลาตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันไป ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของเจลาตินที่ได้ เช่น ความแข็งแรงของเจลและความหนืดแตกต่างกันไปด้วย หน่วยที่ใช้บอกความแข็งแรงของเจล เรียกว่า ค่าบลูม (bloom value) หมายถึงแรง (กรัม) ที่ต้องให้กับตัวกด (plunger) ที่มีขนาดและรูปร่างแน่นอน กดเนื้อเจลที่เตรียมจากเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ

6.67 (โดยน้ำหนัก) ให้น้ย่นลงเป็นระยะทาง 4 มิลลิเมตร โดยแบ่งเจลาตินออกเป็น 3 ประเภทตามค่าบวม (สุวรรณา, 2543) คือ พวกที่มีค่าบวมต่ำ (< 150) จะให้เจลที่เหนียวและมีความยืดหยุ่นสูง พวกที่มีค่าบวมปานกลาง (150-220) ซึ่งนิยมใช้มากที่สุด และพวกที่มีค่าสูง (> 220) จะให้เจลที่ไม่ค่อยมีความยืดหยุ่น เนื้อแข็งและแน่น เจลาตินจะป้องกันไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ในไอศกรีม ทำให้เนื้อสัมผัสเรียบเนียนและแน่น (firmness) ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับแหล่งของวัตถุดิบ ความแข็งแรงของเจล ค่าความหนืดและองค์ประกอบของส่วนผสม ในไอศกรีมจะใช้ประมาณร้อยละ 0.25-0.5 สำหรับเจลาตินที่มีค่าบวม 250 ส่วนผสมไอศกรีมที่มีการใช้เจลาตินเป็นสารเพิ่มความคงตัวต้องใช้เวลาในการบ่ม (aging period) ประมาณ 4 ชั่วโมง ในขณะที่สารเพิ่มความคงตัวอื่นๆ ไม่ต้องการบ่ม (Arbuckle, 1986)

(4) แป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) เป็นแป้งที่ถูกดัดแปรโครงสร้างโมเลกุล โดยวิธีทางกายภาพและทางเคมีทำให้ได้แป้งมีคุณสมบัติแตกต่างไป นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างกว้างขวางยิ่งขึ้น ทำให้แป้งมีคุณสมบัติที่ดีในการละลายและพองตัวดีขึ้น อยู่ในรูปคอลลอยด์เพิ่มความหนืดใน continuous phase จึงขัดขวางการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่และช่วยลดขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (Moore & Shoemaker, 1981) ทำให้ได้ไอศกรีมที่มีความเรียบเนียนขึ้นและให้ความรู้สึกคล้ายครีม (นันทนา, 2544) เช่น แป้งที่ดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน (oxidation) ครอบสลิงคิง (crosslinking) และพรีเจลาติไนซ์เซชัน (pregelatinization) เช่น เอ็มที-01 ซึ่งเป็นแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีครอสลิงค์ (cross-linking) เป็นต้น

2.4.5 สารให้ความหวาน

สารให้ความหวาน (sweetener) ที่นำมาใช้ในไอศกรีมมีหลายชนิด เช่น ซูโครส (sucrose) กลูโคส (glucose) ฟรุคโตส (fructose) น้ำผึ้งและคอร์นไซรัป (corn syrup) สารให้ความหวานมีหน้าที่หลายประการในไอศกรีม ให้ความหวานให้ไอศกรีม เสริมกลิ่นรสและมีบทบาทในการป้องกันการเป็นน้ำแข็ง การเพิ่มปริมาณสารให้ความหวานในไอศกรีมมีผลทำให้จุดเยือกแข็งของไอศกรีมลดลง ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะมีความนุ่มเนียนกว่า และง่ายต่อการรับประทานที่อุณหภูมิเย็นจัด เพราะปริมาณน้ำที่เป็นน้ำแข็งมีน้อยและเป็นตัวช่วยให้ไอศกรีมมีรสอร่อย มีรูปร่างและลักษณะเนื้อที่ดี สารให้ความหวานยังเป็นตัวเพิ่มปริมาณของแข็งกับส่วนผสมอีกด้วย มีความสำคัญต่อไอศกรีมคือ ช่วยปรับปรุงด้านเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ด้านรสชาติ แต่ก็มีข้อจำกัด คือ หากใช้มากเกินไปไอศกรีมจะมีรสหวานจัดเกินไป ลดอัตราการขึ้นฟู นอกจากนี้ทำให้ใช้เวลาในการปั่นไอศกรีมนานและต้องใช้อุณหภูมิต่างๆ ในขั้นตอน hardening เนื่องจากเป็นตัวลดจุดเยือกแข็งของส่วนผสมให้ต่ำลง ทำให้ไอศกรีมแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำมาก ดังนั้นปริมาณและชนิดของน้ำตาลในไอศกรีมจึงมีผลต่อจุดเยือกแข็งของไอศกรีม น้ำตาลให้

รสหวานแก่ไอศกรีมให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดแก่ส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น น้ำตาลช่วยเพิ่มความข้นหนืดให้แก่ส่วนผสมไอศกรีม ปรับปรุงเนื้อสัมผัสของไอศกรีมให้ดีขึ้น ให้กลิ่นรสที่ดี ช่วยลดจุดเยือกแข็งของไอศกรีมเพิ่มการขึ้นฟูและยืดระยะเวลาในการปั่นไอศกรีม (Marshall & Arbuckle, 1996) น้ำตาลมีหน้าที่หลักสองอย่างในไอศกรีมคือ ให้ความหวานและความคงตัวของผลึกน้ำแข็งทำให้ไอศกรีมมีความนุ่มขึ้น (ถ้ามีปริมาณผลึกน้ำแข็งมากจะทำไอศกรีมมีความแข็งมากขึ้น) ซึ่งน้ำตาลที่มีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าจะลดจำนวนของผลึกน้ำแข็งได้ ยกตัวอย่าง เช่น ไอศกรีมสูตรมาตรฐานจะมีผลึกน้ำแข็งประมาณร้อยละ 55 (โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเปลี่ยนชนิดและปริมาณของน้ำตาลที่ใช้แล้วผลึกน้ำแข็งจะลดเหลือเพียงร้อยละ 45 ทำให้ได้ไอศกรีมที่มีเนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่า ซึ่งง่ายต่อการรับประทานมากขึ้น นอกจากนี้น้ำตาลยังมีอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัสของไอศกรีมในด้านอื่นๆ เนื่องจากน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงมีผลให้ความข้นหนืดของส่วนผสมไอศกรีมเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ไอศกรีมที่ได้มีลักษณะที่คล้ายครีม (Clarke, 2004)

2.4.6 สี

สี (colours) จะมีผลต่อผู้บริโภคในด้านของคุณภาพ โดยเติมสีในผลิตภัณฑ์เพื่อให้สีกับผลิตภัณฑ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความดึงดูดใจ และบ่งบอกถึงกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ได้

2.5 ขั้นตอนการผลิตไอศกรีม

กรรมวิธีการผลิตไอศกรีมชนิดแข็ง (hard icecream) แบ่งตามระบบการผลิตออกเป็น การผลิตเพื่อบริโภคในครัวเรือน (homemade icecream) และการผลิตเชิงพาณิชย์ (commercial icecream) โดยทั่วไปแล้ว ไอศกรีมมีวิธีการผลิตตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ การคำนวณส่วนผสม (mix calculations) การผสมส่วนผสมไอศกรีม (blending) การพาสเจอร์ไรซ์ (pasteurization) การโฮโมจิไนซ์ (homogenization) การทำให้ส่วนผสมไอศกรีมเย็นลง (cooling) การบ่มส่วนผสม (ageing) การปั่นไอศกรีม (aeration and freezing) การแช่แข็ง (hardening) และเก็บรักษาไอศกรีม (storage)

2.5.1 การคำนวณส่วนผสมไอศกรีม

ขั้นตอนการผลิตไอศกรีมเริ่มจากการคำนวณส่วนผสมต่างๆ ซึ่งนับว่ามีความสำคัญเนื่องจากได้สูตรไอศกรีมที่มีความสมดุล และสามารถควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอ ราคาของไอศกรีมไม่สูงเกินไป และได้ไอศกรีมที่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด (Arbuckle, 1986)

2.5.2 การผสมส่วนผสมไอศกรีม

นำส่วนผสมที่ของแข็งผสมให้เข้ากันก่อนเติมลงในส่วนผสมที่เป็นของเหลว เช่น นำนมเนย ให้ความร้อนแล้วกวนส่วนผสมไปเรื่อยๆ พออุณหภูมิสูงถึง 49 องศาเซลเซียส จึงเติม

ส่วนผสมที่เป็นของแข็งเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของส่วนผสมจับตัวกันเป็นก้อน ผสมให้เข้ากันโดยใช้ความร้อนช่วย วิธีป้องกันส่วนผสมที่เป็นของแข็งจับตัวเป็นก้อนทำได้โดยผสมส่วนผสมที่เป็นของแข็งเข้ากับน้ำตาลก่อนนำไปผสมกับของเหลวอย่างช้าๆ พร้อมกับกวนไปเรื่อยๆ หรือร่อนส่วนผสมของแข็ง เช่น ของแข็งไม่วัสดุเหนียว ด้วยตะแกรงลงไปอย่างช้าๆ ในของเหลวซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า 27 องศาเซลเซียสพร้อมกับกวนตลอดเวลา ถ้าใช้เจลาตินเป็นสารให้ความคงตัว ควรผสมเจลาตินเข้ากับน้ำตาลในปริมาณเท่ากัน แล้วจึงเติมลงในส่วนผสมของเหลวก่อนที่อุณหภูมิจะสูงถึง 49 องศาเซลเซียส หรือผสมเจลาตินกับน้ำอุ่นจนละลายได้หมดก่อนผสมลงในของเหลวที่อุณหภูมิ 38–49 องศาเซลเซียส เนยสด ครีมแช่แข็ง หรือผลิตภัณฑ์แช่แข็งที่จะใช้ในส่วนผสมไอศกรีมควรตัดเป็นชิ้นเล็กๆ การเติมสี และกลิ่นจะเติมในขั้นตอนการปั่นไอศกรีมให้แข็งตัว (Arbuckle, 1986)

2.5.3 การพาสเจอร์ไรซ์

การพาสเจอร์ไรซ์ส่วนผสมไอศกรีมเพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค กระบวนการให้ความร้อนต้องเพียงพอที่จะทำลายเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค และลดจำนวนแบคทีเรียลงได้มากที่สุด ทำให้ส่วนผสมที่เป็นของแข็งละลาย ช่วยให้ไขมันละลายและลดความหนืด ปรับปรุงเรื่องกลิ่นรสช่วยยืดอายุการเก็บรักษา วิธีการพาสเจอร์ไรซ์ที่เหมาะสมควรให้ความร้อนอย่างรวดเร็วเพื่อให้ถึงอุณหภูมิที่กำหนด และคงไว้ที่ ณ อุณหภูมิที่กำหนด ตามเวลาที่ต้องการแล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยวิธีการพาสเจอร์ไรซ์ควรเลือกใช้แบบอุณหภูมิสูง ระยะเวลาสั้น (higher-heat short-time) และแบบระบบต่อเนื่องในการผลิตไอศกรีม เพราะแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคจะถูกทำลาย และลดจำนวนการใช้สารให้ความคงตัวปรับปรุง body และได้เนื้อสัมผัสที่ดีกว่า เนื่องจากโปรตีนสามารถดูดน้ำได้มากขึ้นด้านการเกิด oxidation ประหยัดเวลา แรงงาน และสถานที่ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต (Marshall & Arbuckle, 1996)

2.5.4 การโฮโมจิไนซ์

ทำให้เม็ดไขมันมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร ซึ่งจะป้องกันการแยกชั้นของครีมแล้วยังช่วยให้ไอศกรีมมีคุณภาพสม่ำเสมอ มีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน ปรับปรุงความสามารถในการขึ้นฟูให้ดีขึ้น ใช้เวลาในการบ่มสั้นลงเพื่อให้ได้อิมัลชันที่คงที่ เป็นขบวนการที่ทำให้เม็ดไขมันแตกตัวเป็นเม็ดไขมันขนาดเล็ก และกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วส่วนผสม และยังช่วยให้ไอศกรีมมีเนื้อนุ่มและทำให้การปั่นส่วนผสมเป็นไปได้ง่ายและรวดเร็ว ใช้เวลาในการบ่มไม่นาน (Marshall & Arbuckle, 1996) ลดโอกาสการเกิด churning ขณะตีปั่นไอศกรีม และลดการใช้สารให้ความคงตัว ในการโฮโมจิ

ไนซ์มักจะทำที่อุณหภูมิ 63-77 องศาเซลเซียส เพราะที่อุณหภูมิต่ำ (49-54 องศาเซลเซียส) จะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของเม็ดไขมัน ทำให้เม็ดไขมันมีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนืดเพิ่มขึ้นและต้องใช้เวลาในการตีปั่นไอศกรีม (freezing time) ส่วนผสมที่พาสเจอร์ไรซ์แล้วจะถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 66 องศาเซลเซียส เพื่อไฮโมจิไนซ์ต่อไปซึ่งสามารถลดการเกิดกลิ่นคาวได้ (cooked flavour) (Arbuckle, 1986)

Schmidt & Smith (1998) พบว่า ส่วนผสมไอศกรีมที่ไม่ผ่านการไฮโมจิไนซ์มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า เนื่องจากการไฮโมจิไนซ์ทำให้เม็ดไขมันมีขนาดเล็กลงทำให้เนื้อสัมผัสไอศกรีมมีความเรียบเนียน การละลายช้าลง กลิ่นรสของไอศกรีมถูกปลดปล่อยออกมาช้ากว่า

2.5.5 การทำให้เย็น

หลังจากการพาสเจอร์ไรซ์และไฮโมจิไนซ์จะนำส่วนผสมไอศกรีมมาทำให้เย็นทันทีที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทำให้ความชื้นหนืดของส่วนผสมไอศกรีมเพิ่มขึ้น (Arbuckle, 1986)

2.5.6 การบ่ม (ageing) ส่วนผสมไอศกรีม

ทำการบ่มที่อุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้ เชื้อจุลินทรีย์จะไม่เพิ่มปริมาณซึ่งขณะบ่มส่วนผสมไอศกรีมจะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ เม็ดไขมันในส่วนผสมจะกลายเป็นไขมันแข็ง ถ้าใช้เจลาตินเป็นสารให้ความคงตัวจะพองตัวและรวมตัวกับน้ำ โปรตีนของส่วนผสมเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้น ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสเรียบเนียนละลายช้าและคุณสมบัติการขึ้นฟูดีขึ้น เวลาที่ใช้ในการบ่มโดยทั่วไปคือ 24 ชั่วโมง แต่ในทางการค้าจะใช้เวลา 3-4 ชั่วโมง การใช้เวลาบ่มนานก็จะมีให้ผลดีกับของผสมที่มีไขมันสูง (Arbuckle, 1986)

2.5.7 การปั่นไอศกรีม (aeration and freezing)

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญยิ่งในกระบวนการผลิตไอศกรีมเพราะมีผลต่อคุณภาพและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ การปั่นไอศกรีมมีขั้นตอนดังนี้ ส่วนผสมของไอศกรีมที่ผ่านการบ่ม เติมน้ำและกลิ่นรสตามต้องการแล้วจะถูกทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว พร้อมกับการกวนเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อทำให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็งขนาดเล็ก การตีปั่นไอศกรีมหากใช้เวลาเร็วเท่าไร จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียบเนียน เพราะผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กและเกิดขึ้นได้เร็ว เวลาการตีปั่น และอุณหภูมิขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องปั่นไอศกรีม เนื้อสัมผัสเรียบเนียน สามารถอุ้มอากาศ

ได้ดี เมื่อส่วนผสมถูกทำให้แข็งตัวบางส่วนที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส น้ำในส่วนผสมจะกลายเป็นผลึกน้ำแข็งคิดเป็น ร้อยละ 47 ของทั้งหมด (Arbuckle, 1986)

ถ้าอุณหภูมิของไอศกรีมขณะตีปั่นอยู่ในช่วง -3.9 ถึง -8.3 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่แข็งตัวในไอศกรีมจะอยู่ในช่วง ร้อยละ 33-67 ทำให้ได้ไอศกรีมที่มีปริมาณอากาศตามต้องการ แต่ปริมาณผลึกน้ำแข็งยังไม่มากพอต้องนำไปแช่แข็งต่อไป (Marshall & Arbuckle, 1996) ในช่วงการตีปั่นไอศกรีมนอกจากเพื่อให้เกิดผลึกน้ำแข็ง ยังเป็นขั้นตอนให้อากาศเข้าไปผสมในผลิตภัณฑ์ด้วยการตีปั่นจะสิ้นสุดลงเมื่อได้ไอศกรีมที่มีปริมาณอากาศและผลึกน้ำแข็งที่มากเพียงพอ

2.5.8 การทำให้ไอศกรีมแข็งตัว (hardening)

เมื่อไอศกรีมออกจากเครื่องตีปั่นไอศกรีมแล้วบรรจุลงภาชนะ ไอศกรีมจะมีลักษณะแข็งกึ่งเหลวไม่สามารถคงรูปร่างได้ ดังนั้นจึงต้องทำให้ไอศกรีมแข็งตัวอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ในไอศกรีม ในระหว่างการทำให้ไอศกรีมแข็งตัว ปริมาณน้ำในไอศกรีมจะกลายเป็นน้ำแข็งมากขึ้น โดยเพิ่มจากประมาณร้อยละ 47 ในช่วงไอศกรีมออกจากเครื่องปั่นไอศกรีมแล้วเพิ่มเป็นร้อยละ 75-80 ในระหว่างการทำให้ไอศกรีมแข็งตัว อุณหภูมิที่ทำให้แข็งตัว คือ ที่อุณหภูมิใจกลางของไอศกรีมในภาชนะบรรจุอยู่ที่ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ที่นิยมใช้คืออุณหภูมิใจกลางของไอศกรีมอยู่ที่ -25 องศาเซลเซียสถึง -30 องศาเซลเซียส ยิ่งเวลาของการทำให้ไอศกรีมแข็งตัวเร็วขึ้น ไอศกรีมที่ได้จะมีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน (Marshall & Arbuckle, 1996)

2.5.9 การเก็บรักษา (storage)

หลังจากไอศกรีมผ่านขั้นตอนการทำให้ไอศกรีมแข็งตัว ใช้เวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ไอศกรีมสามารถออกจำหน่ายได้ทันที หรือเก็บรักษาไว้ 1-2 อาทิตย์ โดยอุณหภูมิห้องเก็บรักษาอยู่ในช่วง -18 ถึง -23 องศาเซลเซียส (Arbuckle, 1986)

2.6 คุณสมบัติของไอศกรีม

2.6.1 มาตรฐานไอศกรีมประเทศไทย

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 222) พ.ศ.2544 ไอศกรีมต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐาน ดังต่อไปนี้

(1) ไอศกรีมนม ต้องมีมันเนยเป็นส่วนผสมไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของน้ำหนัก และมีน้ำตาลนมไม่รวมมันเนยไม่น้อยกว่าร้อยละ 7.5 ของน้ำหนัก

- (2) ไอศกรีมดัดแปลง ต้องมีไขมันทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของน้ำหนัก
- (3) ไอศกรีมผสม ต้องมีไขมันทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของน้ำหนัก ทั้งนี้โดยไม่นับรวมน้ำหนักของผลไม้หรือวัตถุที่เป็นอาหารอื่นผสมอยู่
- (4) ไอศกรีมหวานเย็นและไอศกรีมตามข้อ 3(1) (2) หรือ (3) ต้อง
- (4.1) ไม่มีกลิ่นหืน
 - (4.2) ใช้วัตถุที่ให้ความหวานแทนน้ำตาลหรือใช้ร่วมกับน้ำตาล นอกจากการใช้ น้ำตาลได้ โดยให้ใช้วัตถุที่ให้ความหวานแทนน้ำตาลได้ตามมาตรฐานอาหาร เอฟ เอ โอ/ดับบลิว เอช โอ, โคเด็กซ์ (Joint FAO/WHO Codex)
 - (4.3) ไม่มีวัตถุกันเสีย
 - (4.4) มีบัคเตเรียได้ไม่เกิน 600,000 ในอาหาร 1 กรัม
 - (4.5) ตรวจไม่พบบัคเตรีชนิด อี.โคไล (*Escherichia coli*) ในอาหาร 0.01 กรัม
 - (4.6) ไม่มีจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค
 - (4.7) ไม่มีสารเป็นพิษจากจุลินทรีย์ในปริมาณที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ
- (5) ไอศกรีมชนิดเหลวต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐานตาม (1) (2) หรือ (3) แล้วแต่กรณี และต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐานตาม (4) ด้วย

2.6.2 คุณลักษณะของไอศกรีมที่ดี

ไอศกรีมที่ดีต้องมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้ (Bodyfelt *et al.*, 1998)

(1) สี (color)

ไอศกรีมควรเป็นสีที่ดูแล้วน่ารับประทาน ไม่ซีด หรือเข้มจนเกินไป ควรมีสีใกล้เคียงธรรมชาติของชนิดไอศกรีมนั้นๆ สีของไอศกรีมมีผลต่อการยอมรับและความรู้สึกของผู้บริโภค ต่อกลิ่นและคุณภาพของไอศกรีมเป็นอย่างมาก เช่น ไอศกรีมกลิ่นรสวานิลลาควรมีสีเหลืองเล็กน้อย ไอศกรีมช็อคโกแลตควรมีสีน้ำตาล และไอศกรีมกลิ่นรสผลไม้ ควรมีสีตามกลิ่นรสผลไม้ชนิดนั้น เพื่อเพิ่มความรู้สึกและการยอมรับในการรับประทาน

(2) ภาชนะบรรจุ (package)

ต้องสะอาด ปลอดภัยสามารถใช้กับอาหารได้ ทนต่ออุณหภูมิท่าขณะเก็บรักษาได้ ไม่เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์ มีความคงทนสวยงามสามารถดึงดูดความสนใจ และสร้างความประทับใจให้กับผู้บริโภคได้

(3) คุณสมบัติการละลาย (melting characteristic)

ไอศกรีมที่มีคุณภาพที่ดีควรมีคุณสมบัติด้านทานการละลายได้เล็กน้อยเมื่อวางในจาน แก้ว (petri dishes) ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 20 องศาเซลเซียส นาน 10-15 นาที ลักษณะการละลายที่ดีไอศกรีมควรละลายและไหลออกจากจุดศูนย์กลางของก้อนไอศกรีม วัสดุที่เหมาะสม

และอนุญาตให้ใช้ในการรองไอศกรีมเพื่อศึกษาคุณสมบัติการละลาย คือ งานแก้ว กั้นภาชนะ ต้องแบน เพื่อให้ทิศทางการละลายของไอศกรีมเป็นอิสระ ปริมาตรและน้ำหนักต้องเท่ากันทุกครั้งเมื่อการศึกษาคุณสมบัติการละลายของไอศกรีมเริ่มต้นห้ามมีการรบกวนตัวอย่างเด็ดขาด

(4) เนื้อ และเนื้อสัมผัส (body and texture)

มีลักษณะที่ละเอียด ความเรียบเนียน (smooth) มีลักษณะที่นุ่ม ความรู้สึกสม่ำเสมอของเนื้อไอศกรีม มีขนาดเกล็ดน้ำแข็งขนาดเล็กไม่เกิดผลึกน้ำแข็งที่เป็นเกล็ด และง่ายต่อการตัดรับประทานเนื่องจากไม่มีเนื้อสัมผัสที่แน่นหรือหนักจนเกินไป

(5) กลิ่นรส (flavour) ไอศกรีมที่ดีต้องไม่มีกลิ่นรสดังต่อไปนี้

- กลิ่นสุก (cooked flavour) ซึ่งกลิ่นสุกมีสาเหตุมาจากผลิตภัณฑ์ผ่านอุณหภูมิที่สูงเกินไป เนื่องจากการใช้ความร้อนผลิตภัณฑ์

- กลิ่นรสไม่เป็นธรรมชาติ (unnatural flavour) มีสาเหตุจากการใช้กลิ่นรสซึ่งแตกต่างจากปกติ

- เป็นกรดสูง (high acid) สาเหตุจากการใช้ผลิตภัณฑ์นมที่มีความเป็นกรดสูง หรือเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานก่อนที่จะนำไปปั่นเป็นไอศกรีม

- ขาดกลิ่นรสที่ดี (off flavour) สาเหตุจากการใส่วานิลามากเกินไป

- กลิ่นอับ สาเหตุจากการเก็บไอศกรีมในห้องแช่แข็งนานเกินไป ทำให้ส่วนผสมมีกลิ่นอับ

- กลิ่นโลหะ สาเหตุจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือมีการปนเปื้อนสารคอปเปอร์ หรือเหล็ก หรือการใช้วานิลาที่มีคุณภาพต่ำ

(6) จุลินทรีย์ (microbiological)

ไอศกรีมมีจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคน้อย เนื่องจากส่วนประกอบที่ใช้ถูกจำกัดกระบวนการผลิต การทำให้แข็งตัว และเย็นจัดทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์แตก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึกน้ำแข็งของส่วนผสม การเก็บไอศกรีมในห้องเย็นจะทำให้จุลินทรีย์ลดลง แต่ถ้าเก็บไว้นานก็จะมีแบคทีเรียบางพวกสามารถเจริญได้ และจะมีมากขึ้นเมื่อไอศกรีมละลายหรือถูกทำให้แข็งอีกครั้งหนึ่ง ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านสุขลักษณะที่เกี่ยวข้องกับไอศกรีมนั้น จำเป็นต้องรู้และเข้าใจทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์และระบุจุดวิกฤตที่ต้องควบคุมของกระบวนการผลิตได้ (บุญช่วย, 2547) โดยปริมาณจุลินทรีย์ในไอศกรีมที่ผลิตจำหน่ายต้องเป็นไปตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 222) พ.ศ.2544 เรื่อง ไอศกรีม ดังกล่าวมาข้างต้น

2.6.3 ข้อบกพร่องของไอศกรีม

ข้อบกพร่องด้านต่างๆของไอศกรีมและสาเหตุของข้อบกพร่อง มีดังต่อไปนี้ (สุพัทธ์น์, 2546)

(1) ข้อบกพร่องทางด้านกลิ่นรส (flavour defects) เกิดจาก

- การใช้ผลิตภัณฑ์นมที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งมีกลิ่นรสผิดปกติ เช่น กลิ่นหืน กลิ่นบูด กลิ่นรสเปรี้ยว หรืออาจเกิดจากการใช้ถังผสมที่ล้างไม่สะอาด ซึ่งทำให้มีกลิ่นติดมา

- การใช้สารให้ความหวานในไอศกรีมมากหรือน้อยเกินไป ทำให้รสชาติไม่ดีหรือใช้ชนิดที่มีกลิ่นแตกต่างจากปกติ ไม่ตรงกับลักษณะไอศกรีมที่ผลิต ทำให้เกิดกลิ่นรสไม่เป็นธรรมชาติ

- กลิ่นต้ม (cooked flavour) ซึ่งกลิ่นต้มมีสาเหตุมาจากผลิตภัณฑ์ผ่านอุณหภูมิที่สูงเกินไปเนื่องจากการใช้ความร้อนของผลิตภัณฑ์

- กลิ่นไข่ (egg flavour) มีสาเหตุมากจากการใส่ไข่ในส่วนผสมมากเกินไป

- กลิ่นอับ สาเหตุจากการเก็บไอศกรีมนานเกินไป

(2) ข้อบกพร่องทางด้านเนื้อไอศกรีม (body) มีดังต่อไปนี้

- Crumbly เป็นลักษณะไอศกรีมที่ไม่จับหรือรวมตัวเป็นก้อน ร่วนไม่แข็ง อาจมีสาเหตุมาจากการที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ำเกินไป การใช้สารให้ความคงตัวน้อยเกินไปโอเวอร์รันมากเกินไป เซลล์อากาศมีขนาดใหญ่เกินไป หรือความสมบูรณ์ของการโอโมจิไนส์

- Soggy ไอศกรีมที่มีลักษณะเปียกแฉะ เนื่องจากมีโอเวอร์รันน้อยเกินไป หรือมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากเกินไป ปริมาณน้ำตาลมากเกินไป หรือการใช้สารให้ความคงตัวมากเกินไป

- Weak เป็นไอศกรีมที่มีลักษณะขาดความแน่น (firmness) เนื่องจากปริมาณส่วนที่เป็นของแข็งในไอศกรีมน้อยเกินไป

- Heavy เนื้อไอศกรีมมีลักษณะแน่นหนัก

- Shrinkage ไอศกรีมเกิดการหดตัวหรือยุบตัว เมื่อเซลล์อากาศแตกจะทำให้ไอศกรีมหดตัว ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุดังนี้ มีโอเวอร์รันมากเกินไป ปริมาณของแข็งทั้งหมดต่ำไปเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในห้องเก็บรักษา (fluctuation)

(3) ข้อบกพร่องทางด้านเนื้อสัมผัส (texture defect) มีดังต่อไปนี้

- Coarseness หรือ Iceness เป็นไอศกรีมที่มีผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่หรือขนาดไม่เท่ากัน หรือมีเซลล์อากาศขนาดใหญ่ เนื่องจากการใช้สารให้ความคงตัวน้อยเกินไป รวมทั้งมีน้ำแข็งละลายก่อนที่จะนำไปห้องแช่แข็ง (hardening room)

- Fluffy เป็นไอศกรีมที่มีลักษณะโครงสร้างที่เบาเนื่องจากมีอากาศในเนื้อไอศกรีมมากเกินไป

- Sandiness เป็นไอศกรีมที่มีเนื้อหยาบคล้ายเม็ดทราย เวลารับประทานจะรู้สึกสากลิ้น เนื่องจากการตกผลึกของน้ำตาลแลคโตส มีปริมาณของแข็งไม่รวมไขมันมากเกินไปหรือ อุณหภูมิในห้องเก็บแช่แข็งไม่คงที่สม่ำเสมอ (heat shock)

- ไอศกรีมมีความเหนียวหนืดผิดปกติ (gummy sticky) เนื่องจากการใช้สารให้ความคงตัวมากเกินไป

(4) ข้อบกพร่องด้านการละลาย

เกิดจากการที่ไอศกรีมละลายช้าหรือเร็วเกินไป เป็นโฟมหรือมีฟองอากาศขนาดใหญ่ (foamy) เป็นก้อนลิ่ม (curdy) เป็นน้ำ (watery) ลักษณะการละลายที่ดีของไอศกรีมควรละลาย และไหลออกจากศูนย์กลางของก้อนไอศกรีม ของเหลวของไอศกรีมที่ละลายแล้วควรยังคงมีความเนียนและยังคงความเป็นเนื้อเดียวกันอยู่

(5) ข้อบกพร่องทางด้านสี (colour defect)

เกิดจากการผสมสีไม่เข้ากันดี หรือไม่ได้มาตรฐาน ทำให้สีจางหรือเข้มเกินไป ซึ่งทำให้ขาดความสม่ำเสมอของสีในผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ดีควรจะมีสีเดียวกันสม่ำเสมอและมีสีใกล้เคียงกับธรรมชาติของไอศกรีมชนิดนั้นๆ

(6) ข้อบกพร่องทางด้านจุลินทรีย์

เกิดจากการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ที่ปะปนมากับส่วนผสม และภาชนะบรรจุไอศกรีม กระบวนการให้ความร้อนแก่ส่วนไอศกรีมไม่ถูกต้อง การควบคุมสุขลักษณะ และความสะอาดของอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ดี (Arbuckle, 1986)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ไขมันพืชในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม

Wan Rosnani & Nor Aini (nd) ศึกษาการนำน้ำมันปาล์ม (palm oil) และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil) มาประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ไอศกรีมแทนการใช้ไขมันนม พบว่าคุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ได้แก่ อัตราการขึ้นฟู และร้อยละการเสถียรภาพของไขมัน (fat destabilization percentage) ที่ได้จากการใช้น้ำมันปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์มใกล้เคียงกับไอศกรีมที่ได้จากการใช้ไขมันนม โดยที่น้ำมันปาล์มเหมาะสำหรับนำมาผลิตไอศกรีมเนื้อแข็ง (hard ice cream) เนื่องจากความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีค่ามาก ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มเหมาะสำหรับการผลิตไอศกรีมเนื้อนุ่ม (soft ice cream) เนื่องจากความหนืดของส่วนผสมพร้อมทำไอศกรีมมีค่าต่ำ และไอศกรีมที่ได้มีอัตราการหลอมละลายที่เร็ว

Granger และคณะ (2005) ศึกษาการนำไขมันมะพร้าวไฮโดรจิเนต (hydrogenations) น้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ และน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ร่วมกับอิมัลซิไฟเออร์ผสมระหว่างโมโนและ

ไดกลีเซอไรด์ (diglycerides) 2 ชนิด คือชนิดที่มีกรดไขมันอิ่มตัวและไขมันไม่อิ่มตัวในการผลิตไอศกรีมนม พบว่า ชนิดของไขมันมีผลต่อขนาดเม็ดไขมันในไอศกรีม น้ำมันพืชที่มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงและมีกรดไขมันที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ จะทำให้ขนาดของเม็ดไขมันมีขนาดใหญ่ และเสถียรความคงตัวได้ง่าย

อรพิน ชัยประสพ (2544) ได้ทำการศึกษาการใช้ไขมันปาล์มไฮโดรจิเนต (hydrogenations) ในการผลิตไอศกรีมกะทิเนื้อนุ่มแทนไขมันจากกะทิ พบว่าการใช้ไขมันปาล์มไฮโดรจิเนตทำให้ไอศกรีมที่ได้มีคุณลักษณะทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสดีขึ้น โดยไอศกรีมมีอัตราการเกิดโฟมเพิ่มขึ้นและมีอัตราการละลายลดลงตามปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไขมันไฮโดรจิเนต ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้นั้นไม่ควรเกินร้อยละ 10 เพราะจะทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมด้อยลง