

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลสูตรทนอุณหภูมิสูง



นางสาวภคมณ ปภาศิริวาทย์

ศูนย์วิทยพัทยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A HIGH-TEMPERATURE RESISTANT SUGARLESS HARD CANDY



Miss Pakamon Pabhasiriwart

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลสูตรทน
อุณหภูมิสูง

โดย

นางสาวกมลณ ปภาศิริวาทย์

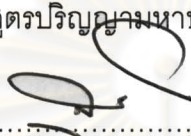
สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา สุภิमारส)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวัฒน์ ทัดติยกุล)

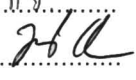

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ)

ปกคณ ปภาศิริวาทย์ : การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลสูตรทนอุณหภูมิสูง. (DEVELOPMENT OF A HIGH-TEMPERATURE RESISTANT SUGARLESS HARD CANDY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.ชินชฎา ธนานุวงศ์, 68 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลที่สามารถคงสถานะแก้วที่เสถียรที่อุณหภูมิห้องในประเทศเขตร้อน งานวิจัยส่วนแรกได้แก่การวัดอุณหภูมิการเกิด glass transition และหา adsorption isotherm ของลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรปกติ (ใช้น้ำตาลและกลูโคสซีรัป) และสูตรไร้น้ำตาลที่มีจำหน่ายในท้องตลาด พบว่า ตัวอย่างสูตรปกติมีความชื้น 1 - 3.5% และมีค่า T_g 44 - 60°C ส่วนตัวอย่างสูตรไร้น้ำตาลมีความชื้นใกล้เคียงกับสูตรปกติ (1 - 2.5%) แต่มีค่า T_g ต่ำกว่า (33-45°C) และที่ค่า a_w สูงกว่า 0.56 ตัวอย่างสูตรปกติมีความสามารถในการดูดความชื้นสูงกว่าตัวอย่างสูตรไร้น้ำตาล งานวิจัยส่วนที่สอง ได้แก่การศึกษาผลของ doctoring agent กลุ่ม hydrogenated starch hydrolysates (HSH) ต่อค่า T_g และพฤติกรรมดูดความชื้นของระบบออสฐานที่มีไอโซมอลท์เป็นองค์ประกอบหลัก แปรอัตราส่วนของ HSH ในช่วง 0-20% พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำตาลแอลกอฮอล์กลุ่ม HSH ทำให้ค่า T_g ของระบบลดลงที่ความชื้นเท่ากัน และทำให้ระบบดูดความชื้นได้ดีขึ้นที่ค่า a_w สูงกว่า 0.75 แต่ระบบที่ประกอบด้วย HSH 10% โดยน้ำหนักแห้ง มีค่า T_g และ adsorption isotherm ใกล้เคียงกับระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์ ดังนั้นจึงนำระบบที่ผสม HSH 10% ไปศึกษาต่อในงานวิจัยส่วนที่ 3 ได้แก่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลผสมสารสกัดจากพืช โดยแปรสารสกัดจากพืช 2 ชนิด พบว่าลูกกวาดเนื้อแข็งทั้ง 2 สูตร ได้รับคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จึงเลือกสูตรที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากต้นทุนวัตถุดิบเป็นหลัก และนำไปศึกษาต่อในงานวิจัยส่วนที่ 4 ได้แก่การศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^\circ\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84 \pm 0.2\%$) โดยเก็บตัวอย่างในรูปเม็ดเปลือย และบรรจุในฟิล์มพลาสติก 2 ชนิดคือ Oriented Polypropylene/ Metalized Cast Polypropylene (OPP/MCPP) และ Polyethylene terephthalate/ Cast Polypropylene (PET/ CPP) ติดตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และความหนาของชั้นผลึกบนผิวตัวอย่างเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติม HSH (สูตรควบคุม) พบว่าผลิตภัณฑ์เม็ดเปลือยสูตรผสม HSH 10% มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากกว่า และเกิดผลึกบนผิวตัวอย่างได้เร็วกว่าและมากกว่าสูตรควบคุม ส่วนผลิตภัณฑ์สูตรผสม HSH 10% ที่เก็บในฟิล์ม PET/ CPP มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและเกิดผลึกน้อยกว่าตัวอย่างเม็ดเปลือย และใกล้เคียงสูตรควบคุม แต่ยังคงเกิดคราบผลึกสีขาวชัดเจนหลังจากการเก็บ 30 วัน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ทั้งสองสูตรที่บรรจุในฟิล์มชนิด OPP/MCPP มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไม่เกิน 0.3% และไม่พบการเกิดผลึกตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ผสม HSH 10% ที่พัฒนาได้ หากเก็บรักษาในฟิล์มชนิด OPP/MCPP จะมีเสถียรภาพที่ดีเทียบเท่าสูตรควบคุม และมีอายุการเก็บรักษาอย่างน้อย 3 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูง (84%) เมื่อพิจารณาจากค่า T_g คาดว่าผลิตภัณฑ์สูตรที่พัฒนาได้ (ความชื้น 2% เก็บในฟิล์ม OPP/MCPP) จะยังคงสถานะแก้วเมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 46°C

ภาควิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร....
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางอาหาร.....
ปีการศึกษา.....2553.....

ลายมือชื่อ.....อ.ภ.พ.น.....ป.ภ.ศิริว.ท.ง.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

5172398123 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS : hard candy/ sugar alcohol / glass transition / sorption isotherm

PAKAMON PABHASIRIWART : DEVELOPMENT OF A HIGH-TEMPERATURE
RESISTANT SUGARLESS HARD CANDY. THESIS ADVISOR : KANITHA

TANANUWONG, Ph.D., 68 pp.

This study aimed to develop sugarless hard candy that could be in a glassy state at room temperature in tropical countries. The first part of the study was to measure glass transition temperature (T_g) and to determine adsorption isotherm of commercial regular (using sucrose and glucose syrup) and sugarless hard candies. Results showed that regular samples had 1-3.5% moisture and had T_g around 44-60°C. Sugarless samples had similar moisture content (1-2.5%) to that of the regular samples but had lower T_g (33-45°C). At a_w higher than 0.56, regular samples absorbed higher amount of water than the sugarless samples. The second part of the study was to determine the effects of doctoring agent, hydrogenate starch hydrolysates (HSH), on T_g and adsorption isotherm of the amorphous systems containing isomalt. HSH was added at 0-20%. At the same moisture content, increasing HSH content caused a decrease in T_g . At a_w greater than 0.75, the amorphous system with increased HSH content had greater ability to absorb water. However, T_g and adsorption isotherm of the system containing 10% HSH were similar to those of the pure isomalt system. Therefore, the system containing 10% HSH was selected for the study in the third part, formulation of the sugarless hard candy containing plant extract. Two types of the plant extracts were used, yielding two formulas of the samples. Acceptance test showed that both formulas received similar hedonic scores of color, odor, taste and overall preference ($p > 0.05$). Therefore, the better formula was selected based on raw material cost. The fourth part of the study was to determine stability of the product under accelerated condition ($30 \pm 2^\circ\text{C}$, $84 \pm 0.2\%$ RH). The products were kept without packaging or packed in the pouches made from Oriented Polypropylene/ Metalized Cast Polypropylene (OPP/MCPP) and Polyethylene terephthalate/ Cast Polypropylene (PET/ CPP) films. Weight change and crystallization of sugar alcohols on the surface of the product were monitored, comparing to those of the controls (isomalt formula without HSH). For the samples kept without packaging, weight changes and crystallization occurred faster in the samples with 10% HSH. For the 10% HSH samples packed in PET/ CPP pouches, these changes were slower and occurred with the same extent as found in the controls. However, surface whitening due to crystallization existed at 30 days of the storage. All samples stored in OPP/MCPP pouches had little change in weight (not exceed 3%) and no crystallization occurred during 3 months of storage. Therefore, stability of the developed formula containing 10% HSH and packed in OPP/MCPP pouches was equivalent to that of the control. The product can be kept at least 3 months at room temperature (30°C) under humid environment (84% RH). According to its T_g , the developed product (2% moisture, packed in OPP/MCPP pouches) could stay in a glassy state when stored at 46°C or lower.

Department : Food Technology.....

Student's Signature Pakamon Pabhasiriwart.

Field of Study : Food Technology.....

Advisor's Signature Kanitha

Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

การปฏิบัติงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้ น้ำตาลสูตรทนอุณหภูมิสูง (Development of a high-temperature resistant sugarless hard candy) ครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชนิษฐา ธนานุวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณา ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ รวมทั้งตรวจทาน แก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา สุภิมารส ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราวัฒน์ ทัดติยกุล อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวันิช และ รองศาสตราจารย์ ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ ที่ร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งกรุณา ชี้แนะแนวทาง ตรวจทาน และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.- อุตสาหกรรม ปี 2551 จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ อนึ่ง ความเห็นในรายงานผลการวิจัย เป็นของผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ขอขอบพระคุณ คุณรัตนา กาญจนไพฑูริ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้วัสดุดิบและ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการปฏิบัติงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการ และขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการปฏิบัติงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	2
2.1 ลูกกวาดเนื้อแข็ง	2
2.2 สถานะอสัณฐานและปรากฏการณ์ glass transition	5
2.3 วิธีทำนายเสถียรภาพทางกายภาพของสถานะอสัณฐานโดยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)	6
2.4 น้ำตาลแอลกอฮอล์	8
2.5 Moisture sorption isotherm	10
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลขององค์ประกอบต่อเสถียรภาพของ ผลิตภัณฑ์อสัณฐานของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์	14
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	17
3.1 ขอบเขตงานวิจัย	17
3.2 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์	18
3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	20
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	25
4.1 เสถียรภาพของลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า	25
4.2 ผลขององค์ประกอบต่อค่า T_g และ moisture sorption isotherm ของตัวอย่าง ระบบอสัณฐานผสม	28
4.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล	32
4.4 การศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะเร่ง	33
4.5 สมบัติเด่นของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลที่พัฒนาได้	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	44

	หน้า
รายการอ้างอิง	46
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์	51
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง	57
ภาคผนวก ค แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส	65
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	66
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	68



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตินี้

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณลักษณะที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็ง	4
2.2	ปริมาณแคลอรีของน้ำตาลชนิดต่างๆ	9
2.3	ค่า T_g ของน้ำตาลซูโครสเปรียบเทียบกับน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ	10
3.1	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของฟิล์มพลาสติก	19
3.2	ชนิด ส่วนผสมและประเทศผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายใน ท้องตลาด	20
4.1	ความชื้นและค่า T_g ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายใน ท้องตลาด	25
4.2	พารามิเตอร์จากสมการ GAB ที่เกี่ยวข้องกับ adsorption isotherm ของ ผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด	27
4.3	ค่า T_g และค่า k ตามสมการ Gordon-Taylor ของระบบออสซิลลูฐานของไอโซ- มอลท์บริสุทธี HSH บริสุทธี และระบบออสซิลลูฐานผสม	30
4.4	ค่าพารามิเตอร์จาก sorption isotherm ของระบบออสซิลลูฐานที่ประกอบด้วย ไอโซมอลท์บริสุทธี HSH บริสุทธี และระบบออสซิลลูฐานผสม	31
4.5	คะแนนความชอบของผู้บริโภคต่อตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็งปรุงแต่งกลิ่นรส	32
4.6	ความหนาของชั้นผลิตภัณฑ์บนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยสูตรไม่ผสม HSH และ สูตรผสม HSH 10% เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง.....	34
4.7	ความหนาของชั้นผลิตภัณฑ์บนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/PP สูตรไม่ผสม HSH และสูตรผสม HSH 10% เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง	39
ก.1	อัตราส่วนเกลือต่อน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว	55
ข.1.1	ค่า T_g ของระบบออสซิลลูฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์บริสุทธีเมื่อมีอัตราส่วน โดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบต่างกัน	57
ข.1.2	ค่า T_g ของระบบออสซิลลูฐานไอโซมอลท์ผสม HSH ที่ประกอบด้วย HSH 10% เมื่อ มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบต่างกัน	58
ข.1.3	ค่า T_g ของระบบออสซิลลูฐานไอโซมอลท์ผสม HSH ที่ประกอบด้วย HSH 20% เมื่อ มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบต่างกัน	59
ข.1.4	ค่า T_g ของระบบออสซิลลูฐานที่ประกอบด้วย HSH บริสุทธี เมื่อมีอัตราส่วนโดย น้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบต่างกัน	60

ตารางที่	หน้า
ข.2.1	ความขึ้นที่สมดุลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรปกติที่มีจำหน่ายใน ท้องตลาด 61
ข.2.2	ความขึ้นที่สมดุลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลที่มี จำหน่ายในท้องตลาด 61
ข.2.3	ความขึ้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบบอัสฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์ 62
ข.2.4	ความขึ้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบบอัสฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์ผสม HSH 10% 62
ข.2.5	ความขึ้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบบอัสฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์ผสม HSH 20% 63
ข.2.6	ความขึ้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบบอัสฐานที่ประกอบด้วย HSH 63
ข.3.1	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือกสูตรไม่ผสม HSH และสูตรผสม HSH 10% 64
ข.3.2	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/PP สูตรไม่ผสม HSH และสูตรผสม HSH 10% 64
ง.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านสี..... 66
ง.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านกลิ่น 66
ง.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านรสชาติโดยรวม 67
ง.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านความชอบรวม 67

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	3
2.2	5
2.3	7
2.4	8
2.5	11
2.6	12
4.1	27
4.2	29
4.3	31
4.4	34
4.5	35
4.6	36
4.7	38
4.8	39
4.9	40

รูปที่		หน้า
4.10	ชั้นผลิตภัณฑ์ชีวพลาสติกชนิดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/PP สูตรไม่ผสม HSH และสูตรผสม HSH 10% เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่งที่ 30 วัน ..	41
4.11	ชั้นผลิตภัณฑ์ชีวพลาสติกชนิดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/PP สูตรไม่ผสม HSH และสูตรผสม HSH 10% เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่งที่ 90 วัน ..	42



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ลูกกวาดเนื้อแข็งที่วางจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดมีส่วนผสมหลักได้แก่ น้ำตาลซูโครสและกลูโคสซีรัป (สุวรรณา สุภิมารต, 2543) ซึ่งหากปริมาณมากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ การผลิตลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลจึงเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยปัจจุบันการผลิตลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลนิยมใช้สารให้ความหวานกลุ่มน้ำตาลแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสมหลัก (Mitchell, 2006) ลูกกวาดเนื้อแข็งจัดเป็นผลิตภัณฑ์อสังฐาน เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในสภาพอากาศที่ร้อนชื้น อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพเนื่องจากปรากฏการณ์ glass transition เช่น ลูกกวาดเหลวตัวลง หรือเกิดการแตกผลึกของส่วนผสมทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นการปรับปรุงสูตรลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลให้มีค่าอุณหภูมิการเกิด glass transition (T_g) ที่สูงขึ้น จึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ ซึ่งค่า T_g ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ส่วนประกอบของมวลน้ำตาลแอลกอฮอล์และความชื้นของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าการเลือกใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์ที่มีค่า T_g สูง เช่น ไอโซมอลท์และแลคทิทอล จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้ผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาก็ยังพบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในลูกกวาดเนื้อแข็งที่ผลิตจากน้ำตาลแอลกอฮอล์กลุ่มดังกล่าว โดยมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือ การเกิดผลึกของน้ำตาลแอลกอฮอล์ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ และ/หรือความชื้นสัมพัทธ์สูง (Raudonus และคณะ, 2000; McFetridge, Rades และ Lim, 2004) โดยทฤษฎีแล้วสามารถยับยั้งการเกิดผลึกได้โดยเพิ่มความหนืดของระบบเพื่อลดความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Gabarra และ Hartel, 1998) จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเติม Hydrogenated starch hydrolysates (HSH) ซึ่งเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ทำหน้าที่เป็น doctoring agent กล่าวคือ สามารถเพิ่มความหนืดให้แก่ระบบและช่วยป้องกันหรือชะลอการเกิดผลึกได้ (Raudonus และคณะ, 2000; McFetridge และคณะ, 2004) แต่ยังไม่สามารถสรุปผลของ doctoring agent เหล่านี้ได้อย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังกล่าว นอกจากนี้การใช้ HSH ในลูกกวาดเนื้อแข็งยังมีข้อดีคือช่วยลดต้นทุนการผลิตได้เนื่องจากมีราคาถูกกว่าไอโซมอลท์และแลคทิทอล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลที่สามารถคงสถานะแก้วที่เสถียรที่อุณหภูมิห้องในประเทศเขตร้อน โดยมุ่งศึกษาผลของ doctoring agent กลุ่ม HSH ในการเพิ่มเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์

บทที่ 2

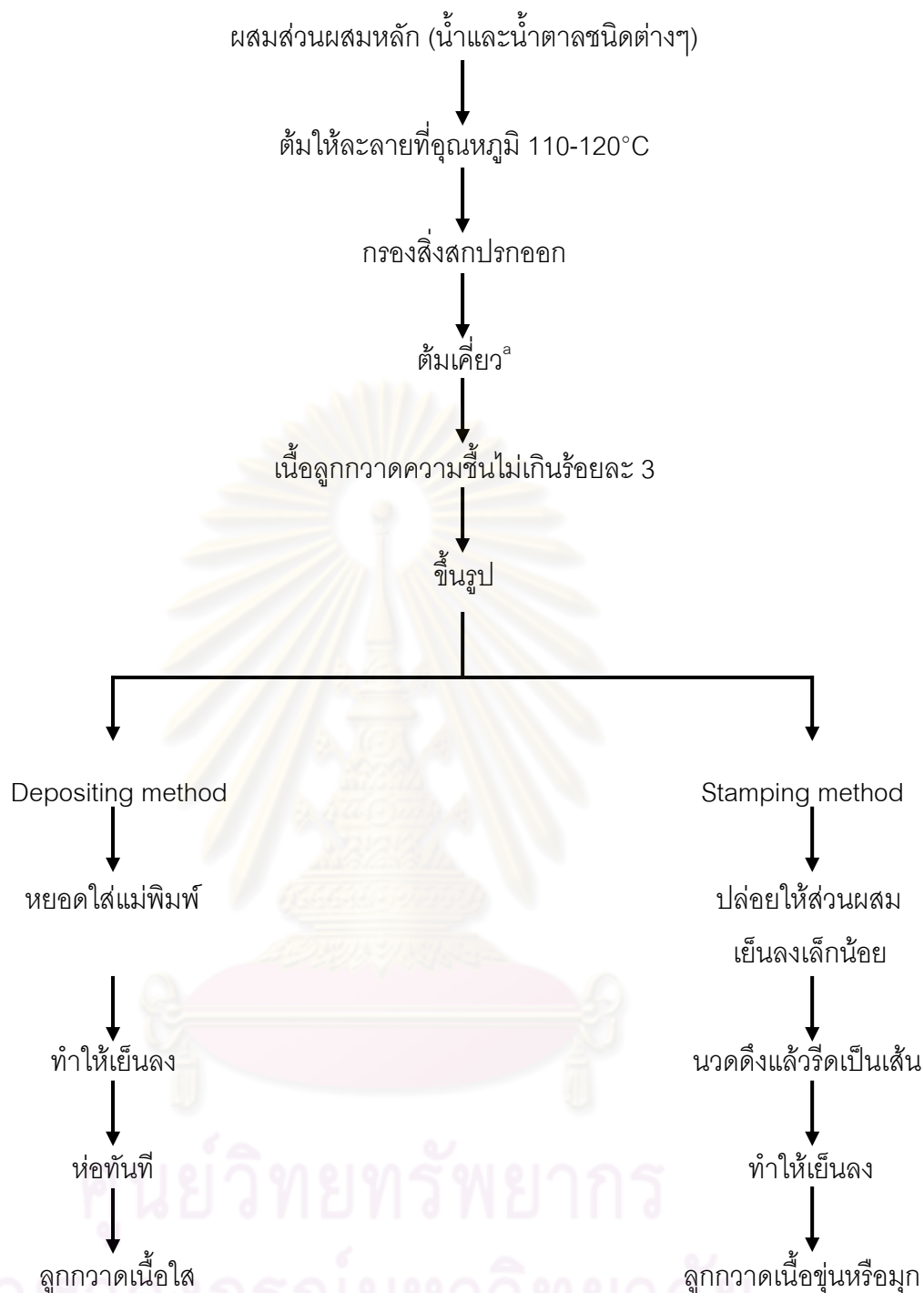
วารสารปริทัศน์

2.1 ลูกกวาดเนื้อแข็ง

ลูกกวาดเนื้อแข็ง (hard candy) เป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานที่ผลิตโดยการต้มเคี่ยวส่วนผสมที่อุณหภูมิสูง จึงจัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์จำพวก high boiled sweets ส่วนผสมหลักที่ใช้ในการผลิตลูกกวาดเนื้อแข็งได้แก่ น้ำตาลซูโครสและกลูโคสซีรัป มีลักษณะเฉพาะตัวคือ เนื้อแข็งมาก เม็ดใสหรือขุ่น กัดเคี้ยวไม่ได้ ในการรับประทานจึงต้องอมให้ละลายช้าๆ ซึ่งหากบริโภคมากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ ทำให้ผู้บริโภคบางกลุ่มไม่ยอมรับ จึงมีแนวคิดในการผลิตลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลโดยแทนที่น้ำตาลซูโครสและกลูโคสซีรัปด้วยน้ำตาลแอลกอฮอล์เช่น ไอโซมอลท์ (isomalt) แลคทิทอล (lactitol) และมอลทิทอล (maltitol) (Mitchell, 2006)

ในลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรผสมน้ำตาลซูโครสและกลูโคสซีรัป จะมีส่วนผสมที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส กลูโคสซีรัปและน้ำ น้ำตาลซูโครสทำหน้าที่ให้ความหวาน ถือเป็นลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์ในกลุ่มที่มีน้ำตาลเป็นส่วนผสมหลัก ส่วนกลูโคสซีรัปมีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด มีรสหวานเล็กน้อย ทำหน้าที่เป็น doctoring agent กล่าวคือ ทำให้น้ำตาลในลูกกวาดที่อยู่ในสภาวะเป็นสารละลายอิ่มตัววดยิ่ง (supersaturated sugar solution) ไม่ตกผลึกออกมา หรือเกิดผลึกช้าหรือน้อยลง (สุวรรณา สุภิมารส, 2543) ส่วนในลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลอาจใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์เพียงชนิดเดียวหรือหลายชนิดผสมกัน และอาจมีหรือไม่มี doctoring agent ในสูตรก็ได้ โดยน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่สามารถใช้เป็น doctoring agent คือ hydrogenated starch hydrolysate (HSH) (Raudonus และคณะ, 2000; McFetridge และคณะ, 2004)

ขั้นตอนการผลิตลูกกวาดเนื้อแข็งแสดงดังรูปที่ 2.1 การต้มเคี่ยวมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ส่วนผสมระเหยออกไปจนสารละลายน้ำตาลมีความหนืดเพิ่มขึ้น และอยู่ในสถานะอิ่มตัววดยิ่ง เมื่อมวลน้ำตาลเย็นตัวลงยังมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลน้ำตาลไม่สามารถมารวมตัวกันเพื่อตกผลึกได้ เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลถูกจำกัด (Hartel, 1987; Liu, Bhandari และ Zhou, 2006) น้ำตาลชนิดต่างๆ ในลูกกวาดเนื้อแข็งจึงจัดเรียงตัวอยู่ในสถานะอสัณฐาน (amorphous state) ดังนั้นการต้มเคี่ยวเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้นต่ำ (ไม่เกินร้อยละ 3) จึงช่วยป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลได้ (สุวรรณา สุภิมารส, 2543)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตลูกกวาดเนื้อแข็ง

a หมายถึง การต้มเคี่ยวภายใต้สภาวะสุญญากาศ สำหรับน้ำตาลใช้อุณหภูมิ 130-140°C และสำหรับน้ำตาลแอลกอฮอล์ใช้อุณหภูมิ 150-160°C

ที่มา: ดัดแปลงจากสุวรรณ สุภิมารส (2543)

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของลูกกวาด (มอก.696-2530) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2530) ลูกกวาดเนื้อแข็งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ลูกกวาดธรรมดา หมายถึง ลูกกวาดที่มีส่วนผสมต่างๆ ผสมเป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่ก็ได้ และลูกกวาดสอดไส้ หมายถึง ลูกกวาดธรรมดาที่มีส่วนผสมอื่นที่เหมาะสมบรรจุเป็นไส้ นอกจากนี้ยังสามารถผสมส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่ ช็อกโกแลต กาแฟหรือชา กลีโอบริโภค ผลไม้หรือผลิตภัณฑ์จากผลไม้ น้ำผึ้ง นมและผลิตภัณฑ์นม เครื่องเทศ และวิตามิน ในลูกกวาดทั้ง 2 ชนิด โดยคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.1

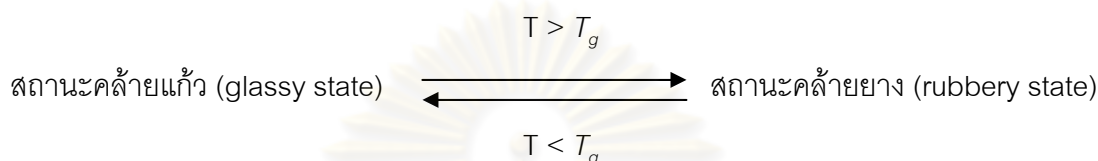
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะที่ต้องการในการผลิตลูกกวาดเนื้อแข็ง

คุณลักษณะ	ข้อกำหนด
ลักษณะทั่วไป	ต้องมีเนื้อละเอียด เนียน คงรูป ไม่เยิ้ม
สี	ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนผสมที่ใช้และสม่ำเสมอ
กลิ่นรส	ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของส่วนผสมที่ใช้ ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์
สิ่งแปลกปลอม	ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนผสมที่ใช้ เช่น เส้นผม ขนสัตว์ ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์
วัตถุเจือปนอาหาร	หากมีการใช้ส่วนผสมอาหารให้ใช้ได้ตามชนิดและปริมาณที่กฎหมายกำหนด
ความชื้น	ต้องไม่เกิน 3% โดยน้ำหนัก
อะฟลาทอกซิน	ต้องไม่เกิน 20 µg/kg
(กรณีมีถั่วลิสงเป็นส่วนประกอบ)	
จุลินทรีย์	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^{-3} cfu/g <i>E. coli</i> โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องน้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 g ยีสต์และรา ต้องน้อยกว่า 10 cfu/g

ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม (2530)

2.2 สถานะอสัณฐานและปรากฏการณ์ glass transition

สถานะอสัณฐานจัดเป็นสภาวะกึ่งเสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Yu, 2001) โมเลกุลจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ อาจเกิดปรากฏการณ์ glass transition ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของสถานะในระบบอสัณฐานจากสถานะคล้ายแก้ว ไปเป็นสถานะคล้ายยาง แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวคือ อุณหภูมิ



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ glass transition

ที่มา: ดัดแปลงจาก Roos และ Karel (1991)

จากรูปที่ 2.2 ถ้าอุณหภูมิของระบบอสัณฐานสูงกว่า glass transition temperature หรือ T_g ทำให้สมบัติทางกายภาพของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว กล่าวคือความหนืดของระบบอสัณฐานที่มีสถานะคล้ายแก้ว (ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g) ที่มีค่าสูงกว่า 10^{12} Pa.s (White และ Cakebread, 1966) จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า T_g (Roos, 1995a) ความหนืดที่ลดลงนั้นทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นด้วย

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่า T_g ได้แก่ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบที่มีมวลโมเลกุลสูงมักจะมีค่า T_g สูงด้วย ส่วน plasticizer เช่น น้ำและกลีเซอรอล เป็นสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ สามารถเพิ่มปริมาตรอิสระ (free volume) ซึ่งหมายถึงปริมาตรส่วนที่ว่างระหว่างโมเลกุลภายในระบบผสม ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอื่นๆ ในระบบอสัณฐานเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่า T_g ลดลง (Karel, 1985; Raudonus และคณะ, 2000; McFetridge และคณะ, 2004) ในการทำนายผลของน้ำในการลดค่า T_g ของอสัณฐานของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และอาหาร นิยมใช้สมการ Gordon-Taylor (Gordon และ Taylor, 1952) แสดงดังสมการที่ 2.1

$$T_g = \frac{w_1 T_{g1} + k w_2 T_{g2}}{w_1 + k w_2} \quad (2.1)$$

เมื่อ T_{g1} คือ T_g ของของแข็งบริสุทธิ์ที่ปราศจากน้ำ
 T_{g2} คือ T_g ของน้ำบริสุทธิ์ มีค่าเท่ากับ -134°C (Johari, Hallbrucker และ Mayer, 1987)
 w_1 และ w_2 คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของของแข็งและน้ำในระบบตามลำดับ
 k คือ ค่าคงที่ แสดงถึงความไวของการเปลี่ยนแปลงค่า T_g เมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลง

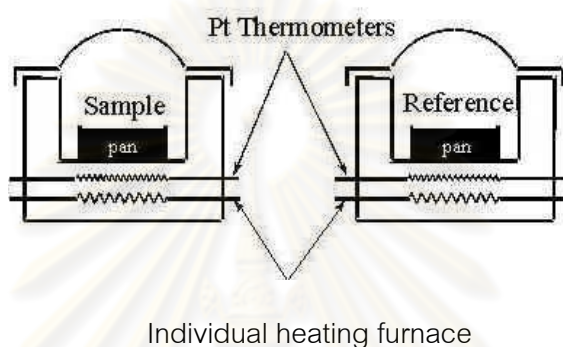
ปรากฏการณ์ glass transition จะส่งผลต่อคุณภาพของอาหารที่อยู่ในรูปออสซิลลูชันโดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพเมื่ออยู่ในสถานะคล้ายยาง เช่น แครกเกอร์ จะสูญเสียความกรอบ (Katz และ Labuza, 1981) นมผง จะเกาะรวมกันเป็นก้อนแข็ง (Levine และ Slade, 1988) และลูกกวาดเนื้อแข็ง จะเหนียวเกาะติดกัน เสียวรูปร่าง หรือเกิดผลึก (Roos, 1995b) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า คุณภาพของผลิตภัณฑ์ออสซิลลูชัน เช่น ลูกกวาดเนื้อแข็ง จะขึ้นอยู่กับที่การอยู่ในสถานะแก้วตลอดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

2.3 วิธีทำนายเสถียรภาพทางกายภาพของสถานะออสซิลลูชันโดยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการทำนายเสถียรภาพของวัสดุในสถานะออสซิลลูชัน คือการหาค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ออสซิลลูชัน (Slade และ Levine, 1991) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีโดยวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เช่น ค่า dielectric โดยวิธี Dielectric Thermal Analysis (DTA) ค่า modulus โดยวิธี Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMA) แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากคือการวัดค่าความจุความร้อน (heat capacity) โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) (Roos และ Karel, 1990)

DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุ power compensation DSC (รูปที่ 2.3) เป็นประเภทของ DSC ซึ่งนิยมใช้โดยทั่วไปในการศึกษา glass transition ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนใส่ pan ตัวอย่าง ส่วนใส่ pan อ้างอิง (reference) ส่วนให้ความร้อน (heating furnace) สำหรับตัวอย่างที่แยกจากส่วนให้ความร้อนของตัวอ้างอิง และเทอร์มิสเตอร์ power compensation DSC มีหลักการทำงานโดยย่อดังนี้ เครื่องมือจะมีระบบควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างและตัวอ้างอิงให้เป็นไปตามโปรแกรมควบคุมการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ ซึ่งกำหนดโดยผู้ใช้งาน เมื่อตัวอย่างมีการดูดหรือคายความร้อน หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อน เป็น

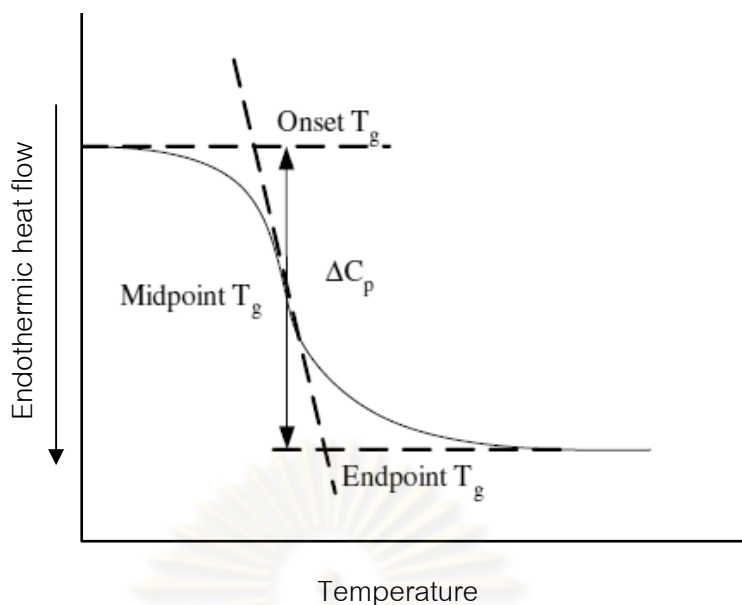
ผลให้อุณหภูมิของตัวอย่างและตัวอ้างอิงต่างกัน หรืออีกนัยหนึ่งคือ อุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดไว้ในโปรแกรม เครื่องจะปรับค่า heat flow ที่จะเข้าสู่ตัวอย่างเพื่อให้อุณหภูมิของตัวอย่างกลับมาเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ในโปรแกรม จึงเกิดความแตกต่างระหว่างค่า heat flow ที่เข้าสู่ตัวอย่างและตัวอ้างอิงที่สอดคล้องกับการดูดหรือคายความร้อนในตัวอย่างนั่นเอง และบันทึกผลความแตกต่างของค่า heat flow ดังกล่าว เป็นฟังก์ชันของเวลาหรืออุณหภูมิ (PerkinElmer, 2001)



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางแสดงส่วนที่ใช้วัดสมบัติทางความร้อนของ power compensation DSC
ที่มา: ดัดแปลงจาก Bhadeshia (2007)

การหาค่า T_g ด้วย DSC สามารถรายงานอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ glass transition ด้วยค่า onset T_g คือ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ หรือ ค่า midpoint T_g คือ อุณหภูมิกึ่งกลางของช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ (แสดงดังรูปที่ 2.4) ในงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมรายงานอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ glass transition ด้วยค่า midpoint T_g (Liu และคณะ, 2007)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 การหาค่า T_g โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC
ที่มา: Liu และคณะ (2007)

2.4 น้ำตาลแอลกอฮอล์

น้ำตาลแอลกอฮอล์ จัดเป็นอนุพันธ์ของแซคคาไรด์ ผลิตจากกระบวนการเติมไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำตาล ซึ่งหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์อิสระของน้ำตาลจะถูกแทนที่โดยหมู่ไฮดร็อกซิล น้ำตาลแอลกอฮอล์จัดเป็นวัตถุดิบอาหารที่นิยมใช้กันอย่างมาก เนื่องจากช่วยปรับปรุงคุณภาพอาหารได้หลายประการ เช่น เพิ่มความคงตัว เพิ่มความหนืด และช่วยรักษาความชื้น เป็นต้น นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีกว่าสารประกอบประเภทน้ำตาล เนื่องจากหมู่ไฮดร็อกซิลของน้ำตาลแอลกอฮอล์มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าหมู่อัลดีไฮด์หรือคีโตนอิสระของน้ำตาล จึงไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีบางประการ เช่น ไม่เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดทำให้เกิดสีน้ำตาลขณะให้ความร้อนสูง และน้ำตาลแอลกอฮอล์ยังสามารถหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิสูงโดยไม่สลายตัว (ศิวาพร ศิวเวช, 2529) นอกจากนี้น้ำตาลแอลกอฮอล์ยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น มีแคลอรีต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส (ตารางที่ 2.2) และไม่ทำให้ฟันผุ ดังนั้นจึงมีการใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์เช่น ไอโซมอลท์ มอลทิทอล แลคทิทอล ซิลิทอล และซอร์บิทอล เป็นส่วนผสมในกลุ่มลูกกวาดและขนมหวานสูตรไร้น้ำตาล และใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากไม่ส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดมากเท่าน้ำตาลทราย และผู้ป่วยโรคเบาหวานสามารถรับประทานได้อย่างไรก็ตาม น้ำตาลแอลกอฮอล์ส่วนมากมีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส จึงมักใช้ร่วมกับสารให้ความหวานกลุ่ม intense sweetener เพื่อช่วยเพิ่มความหวานและทำให้ไม่ต้องใช้น้ำตาล

แอลกอฮอล์ในปริมาณมากเกินไป ซึ่งอาจมีผลต่อปริมาณพลังงานโดยรวมในอาหารได้ (สุวรรณา สุภิมารส, 2543)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณแคลอรีของน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาลชนิดต่างๆ

ชนิดน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาล	ปริมาณแคลอรี (kcal/g)	ที่มา
ซูโครส	4.0	สุวรรณา สุภิมารส (2543)
ไซลิทอล	3.6	สุวรรณา สุภิมารส (2543)
ไอโซมอลท์	2.4	สุวรรณา สุภิมารส (2543)
แลคทิทอล	2.0	สุวรรณา สุภิมารส (2543)
มอลทิทอล	2.8	สุวรรณา สุภิมารส (2543)
ซอร์บิทอล	3.0	สุวรรณา สุภิมารส (2543)
Hydrogenated starch hydrolysate	≤ 3.0	Eberhardt (2001)

น้ำตาลแอลกอฮอล์แบ่งตามโครงสร้างทางเคมีได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกคือน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ได้จากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ แมนนิทอล ซอร์บิทอล และไซลิทอล พบในผักผลไม้ ให้ความหวานประมาณ 50-70% ของน้ำตาลซูโครส โดยเฉพาะไซลิทอลจะให้ความหวานและรสชาติใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครสมาก กลุ่มที่สองคือน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ได้จากน้ำตาลโมเลกุลคู่ ได้แก่ ไอโซมอลท์ มอลทิทอล ให้ความหวาน 75% ของน้ำตาลซูโครส และแลคทิทอลให้ความหวานประมาณ 30-40% ของน้ำตาลซูโครส (สุวรรณา สุภิมารส, 2543) และกลุ่มสุดท้ายคือน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ได้จากคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ได้แก่ HSH ซึ่งมีมอลทิทอลเป็นส่วนประกอบหลัก (Raudonus และคณะ, 2000)

ในการเลือกใช้น้ำตาลแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ออสถูฐาน นอกจากจะพิจารณาสมบัติด้านต่างๆ ของน้ำตาลแอลกอฮอล์เช่น ระดับความหวาน การให้ความรู้สึกเย็น (cooling effect) ความสามารถในการละลายและรสชาติตกค้างแล้ว ควรคำนึงถึงค่า T_g ของน้ำตาลแอลกอฮอล์ด้วย (ตารางที่ 2.3) เนื่องจากค่าดังกล่าวจะมีผลต่อคุณภาพและเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ ในกรณีของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็ง เมื่อพิจารณาค่า T_g ของน้ำตาลซูโครสและกลูโคสซีรัป เปรียบเทียบกับน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ พบว่า ไอโซมอลท์และแลคทิทอล มีค่า T_g สูงใกล้เคียงกับค่า T_g ของน้ำตาลซูโครสและกลูโคสซีรัป นอกจากนี้ทั้งไอโซมอลท์และแลคทิทอลยังดูความชื้นได้ไม่ดี น้ำตาลแอลกอฮอล์ทั้ง 2 ชนิดนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้ทดแทนน้ำตาลและกลูโคสซีรัปในลูกกวาดเนื้อแข็งได้ (Mitchell, 2006)

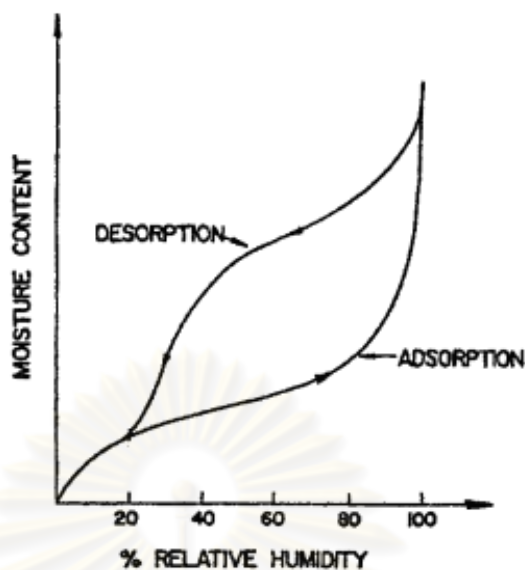
ตารางที่ 2.3 ค่า T_g ของน้ำตาลซูโครสเปรียบเทียบกับน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ในภาวะที่ปราศจากน้ำ (anhydrous)

น้ำตาล	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	ที่มา
ซูโครส	62	Roos (1993)
กลูโคสซีรัป	60	Tromp, Parker และ Ring (1997)
ไซลิทอล	-29	Roos (1993)
ไอโซมอลท์	63	McFetridge และคณะ (2004)
แลคทิทอล	65	McFetridge และคณะ (2004)
มอลทิทอล	39	Roos, 1993

2.5 Moisture sorption isotherm

Moisture sorption isotherm คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากิจกรรมของน้ำ (water activity, a_w) และปริมาณน้ำในอาหารที่ภาวะสมดุลและอุณหภูมิคงที่ วิธีที่ง่ายและนิยมใช้ในการสร้าง moisture sorption isotherm คือ static gravimetric technique ทำได้โดยนำตัวอย่างอาหารวางลงในภาชนะปิด (เช่น โถแก้ว) ที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว เพื่อสร้างบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์จำเพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายเกลืออิ่มตัว จนกระทั่งตัวอย่างเข้าสู่ภาวะสมดุล กล่าวคือค่า a_w ของอาหารมีค่าเท่ากับค่า a_w ของบรรยากาศ (เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์หารด้วย 100) จึงนำตัวอย่างมาหาความชื้นที่สมดุล โดยคำนวณเทียบกับน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (Al-Muhtaseb, McMinin และ Magee, 2002) การศึกษา moisture sorption isotherm ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการดูดหรือคายความชื้นของอาหารเพื่อประโยชน์ในการทำนายเสถียรภาพของอาหาร (Katz และ Labuza, 1981)

Moisture sorption isotherm อาจแบ่งกว้างๆ ได้เป็น 2 ประเภท (รูปที่ 2.5) คือ adsorption isotherm เกิดเมื่ออาหารเริ่มต้นมีค่า a_w ต่ำ อาหารจะดูดความชื้นจากบรรยากาศเนื่องจากอาหารมีค่า a_w ต่ำกว่าค่า a_w ของบรรยากาศ และ desorption isotherm เกิดเมื่ออาหารเริ่มต้นมีค่า a_w สูง อาหารจะคายความชื้นสู่บรรยากาศเนื่องจากอาหารมีค่า a_w สูงกว่าค่า a_w ของบรรยากาศ สำหรับตัวอย่างอาหารมักพบปรากฏการณ์ที่เรียกว่า moisture sorption hysteresis เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างเส้น adsorption isotherm และ desorption isotherm ของอาหารชนิดเดียวกัน กล่าวคือ เส้นกราฟทั้งสองไม่ซ้อนทับกันพอดี ทำให้เกิด hysteresis loop แสดงดังรูป 2.5 hysteresis loop มีความแตกต่างกันในด้านขนาดและรูปร่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิที่ใช้ในการหา sorption isotherm (Al-Muhtaseb และคณะ, 2002)

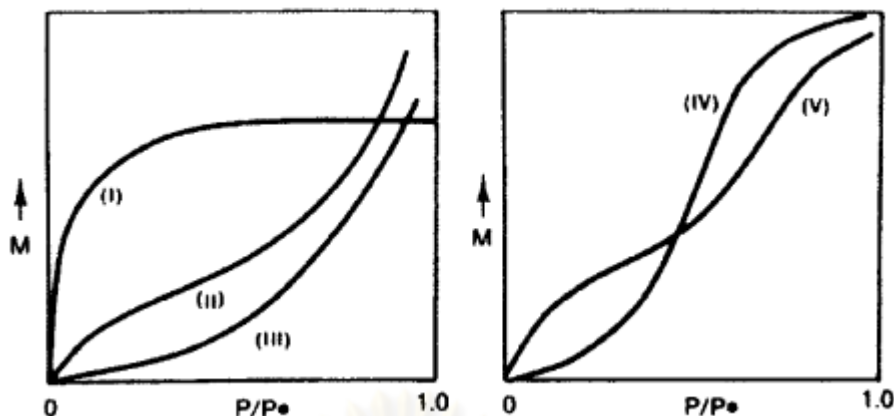


รูปที่ 2.5 รูปแบบ moisture sorption isotherm และลักษณะ hysteresis

ที่มา: ดัดแปลงจาก Al-Muhtaseb และคณะ (2002)

Brunauer และคณะ (1940) จำแนก adsorption isotherm ได้ 5 รูปแบบ ตามลักษณะการดูดซับของก๊าซบนพื้นผิวของแข็ง (รูปที่ 2.6)

- แบบที่ 1 Langmuir isotherm รูปแบบนี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับก๊าซ 1 โมเลกุล ในโพรงที่มีปริมาตรจำกัดภายในของแข็งที่มีรูพรุน
- แบบที่ 2 Sigmoid isotherm โดยทั่วไป adsorption isotherm ของอาหารมักมีรูปแบบนี้
- แบบที่ 3 Flory-Huggins เกิดจากการดูดซับตัวทำละลายหรือ plasticizer เช่น น้ำและกลีเซอรอล บนพื้นผิวอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าค่า T_g adsorption isotherm รูปแบบนี้มักพบในอาหารที่มีตัวถูกละลาย เช่น น้ำตาลเป็นส่วนผสมในปริมาณมาก
- แบบที่ 4 อธิบายการดูดซับน้ำบนผิวของแข็งที่ดูดความชื้นได้ดี และพองตัวเมื่อดูดซับน้ำ (swellable hydrophilic solid)
- แบบที่ 5 BET multilayer adsorption isotherm



รูปที่ 2.6 รูปแบบของ moisture sorption isotherm

เมื่อ P คือ ความดันไอของน้ำในอาหาร และ

P_0 คือ ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน

M คือ ปริมาณความชื้น (%)

ที่มา: Al-Muhtaseb และคณะ (2002)

ปัจจัยที่มีผลต่อ moisture sorption isotherm มีดังนี้ (Labuza, 1968)

- อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ moisture sorption isotherm เปลี่ยนแปลงไปกล่าวคือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์หนึ่งๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นของอาหารที่สมดุลจะลดลง ยกเว้นกรณีอาหารที่มีน้ำตาลหรือเกลือสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นที่สมดุลจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำตาลและเกลือจะละลายได้ดีมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อาหารดูดความชื้นได้ดีขึ้นด้วย ในการทดลองจึงต้องควบคุมและระบุอุณหภูมิที่ใช้ในการหา moisture sorption isotherm ด้วย

- องค์ประกอบทางเคมีและธรรมชาติของอาหาร

องค์ประกอบทางเคมีชนิดต่างๆ จะมีความสามารถในการจับยึดกับโมเลกุลของน้ำแตกต่างกันเช่น โมเลกุลขององค์ประกอบที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้มากกว่าจะมีการจับยึดกับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่า นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของอาหารยังมีผลต่อการดูดหรือคายความชื้นเช่น อาหารที่มีรูพรุนมากกว่าก็จะสามารถดูดหรือคายความชื้นได้ดีกว่า

ในงานวิจัยส่วนใหญ่มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาอธิบายหรือทำนาย moisture sorption isotherm ในอาหาร ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Brunauer, Emmett และ Teller, 1938) และ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) (Guggenheim, 1966; Anderson, 1946; de Boer, 1946) แสดงดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$M = \frac{M_0 C a_w}{(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)} \quad (2.2)$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง
 M_0 คือ ปริมาณ monolayer water
 C คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของ binding energy ระหว่างโมเลกุล ของน้ำ
 บริสุทธิ์ในสถานะของเหลวและโมเลกุลของน้ำใน monolayer
 a_w คือ ค่ากิจกรรมของน้ำ

$$M = \frac{M_0 C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2.3)$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง
 M_0 คือ ปริมาณ monolayer water
 C คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของ binding energy ระหว่างโมเลกุลของน้ำใน
 ชั้น monolayer และโมเลกุลของน้ำในชั้นที่เหนือขึ้นไป
 K คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของ binding energy ระหว่างโมเลกุลของน้ำ
 บริสุทธิ์ในสถานะของเหลวและโมเลกุลของน้ำในชั้นที่ถัดจาก monolayer ($K \leq 1$)
 a_w คือ ค่ากิจกรรมของน้ำ

ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ได้จากสมการของ BET คือค่า BET monolayer หมายถึงชั้นของ
 น้ำที่มีความหนาเพียง 1 โมเลกุล และถูกดูดซับบนผิวหน้าตัวอย่าง ค่านี้สามารถใช้ประมาณค่า
 ความชื้นที่ทำให้อาหารยังคงความเสถียร ไม่เสื่อมคุณภาพโดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและ
 เคมี อย่างไรก็ดี สมการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากใช้ทำนายข้อมูล moisture sorption isotherm ได้ดี
 เฉพาะในช่วง a_w ที่แคบ (0.05-0.35) ส่วนสมการของ GAB เป็นสมการที่ปรับปรุงมาจากสมการ
 ของ BET โดยการเพิ่มพารามิเตอร์ K ในสมการ ภายใต้สมมติฐานที่ว่า สมบัติของน้ำในชั้นที่เหนือ
 จาก monolayer ต่างจากสมบัติของน้ำบริสุทธิ์ในสถานะของเหลว ในขณะที่สมการ BET ถือว่า
 สมบัติของน้ำในชั้นที่เหนือจาก monolayer เหมือนกับสมบัติของน้ำบริสุทธิ์ในสถานะของเหลว
 นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า M_0 ที่ได้จากสมการ GAB จะมีค่ามากกว่าค่า M_0 ที่ได้จากสมการ BET
 เสมอ ข้อดีของสมการ GAB คือ ใช้ทำนายข้อมูล moisture sorption isotherm ได้ดีในอาหารเกือบ
 ทุกประเภท ในช่วง a_w ที่กว้าง (0.05 – 0.95) (Roos, 2001; Al-Muhtaseb และคณะ, 2002)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลขององค์ประกอบต่อเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ออสถิออนของน้ำตาลและน้ำตาลแอลกอฮอล์

Raudonus และคณะ (2000) ศึกษาเสถียรภาพของระบบออสถิออนของไอโซมอลท์เมื่อเติม doctoring agent ในกลุ่ม hydrogenated starch hydrolysate (HSH) ที่น้ำหนักโมเลกุลสูง 2 ชนิดคือ HS3375 และ HS6075 และ hydrogenated polydextrose (Litesse III) ทดลองผสม doctoring agent แต่ละชนิดเข้ากับไอโซมอลท์ในอัตราส่วนต่างๆ จากการศึกษพบว่าที่ความชื้นเท่ากัน (0 - 20%) การเติม doctoring agent ทั้ง 3 ชนิด ที่ระดับ 25% ของน้ำหนักแห้ง กลับทำให้ค่า T_g ของระบบมีค่าต่ำกว่าค่า T_g ของไอโซมอลท์บริสุทธิ์ แต่ยังสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_g และความชื้นของระบบโดยใช้สมการของ Gordon-Taylor ได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการดูดซับความชื้นและการเกิดผลึกของน้ำตาลแอลกอฮอล์ในลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์และ doctoring agent แต่ละชนิดในอัตราส่วน 10 30 และ 50% เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 80% พบว่าการเติม doctoring agent ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น กลับทำให้ระบบดูดความชื้นมากขึ้นและทำให้เกิดผลึกในตัวอย่างได้เร็วขึ้นและมากขึ้น ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการเติม doctoring agent ไม่ได้ช่วยป้องกันหรือชะลอการเกิดผลึกของไอโซมอลท์ในผลิตภัณฑ์ได้ตามทฤษฎี ทั้งนี้เป็นผลจาก HSH มีความสามารถในการดูดความชื้นสูงกว่าไอโซมอลท์ จึงทำให้ตัวอย่างมีความชื้นเพิ่มขึ้น และค่า T_g ลดลง จึงช่วยส่งเสริมการเกิดผลึกและหักล้างผลจากการเพิ่มความเหนียวของ doctoring agent ในการชะลอการเกิดผลึกด้วย

Novakowski และ Hartel (2002) ศึกษาผลของความชื้น รวมทั้งชนิดและปริมาณของกลูโคสซีรัปต่อเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ออสถิออนที่ทำจากน้ำตาลทรายผสมกลูโคสซีรัป (ลูกกวาดเนื้อแข็ง) แปรความชื้นตัวอย่างในช่วง 3-9% ใช้กลูโคสซีรัปที่มีค่าสมมูลเดกซ์โตรส (Dextrose Equivalent, DE) เท่ากับ 43 (43 DE) และ 65 (65 DE) ในปริมาณต่างกัน 3 ระดับคือ 15%, 37% และ 57% พบว่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า T_g ของตัวอย่างทุกสูตรลดลง และที่ความชื้นเดียวกัน (4-7%) การใช้กลูโคสซีรัปชนิด 43 DE ในปริมาณมากขึ้นทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น แต่การใช้กลูโคสซีรัปชนิด 65 DE ในปริมาณมากขึ้นไม่ส่งผลชัดเจนต่อค่า T_g เมื่อตรวจวัดเนื้อสัมผัสได้แก่ค่าความแข็งและค่าความเหนียวของตัวอย่างพบว่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งจะลดลง โดยเฉพาะในช่วงความชื้นระหว่าง 4.5-6% ที่ความชื้นเดียวกันการใช้กลูโคสซีรัปชนิด 43 DE หรือ 65 DE ในปริมาณ 15% จะทำให้ตัวอย่างมีค่าความแข็งต่ำสุด แต่หากใช้ในปริมาณ 37% และ 57% จะให้ตัวอย่างที่มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียว (stickiness) ที่ความชื้นต่างๆ พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบ Gaussian กล่าวคือ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุด จากนั้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นอีก

ส่งผลให้ค่าความเหนียวลดลง การใช้กลูโคสซีรัปในปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าความเหนียวเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ การใช้กลูโคสซีรัปชนิด 43 DE และ 65 DE ในปริมาณ 57% ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความเหนียวสูงสุดที่ความชื้น 4.5% และ 5.5% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ปริมาณการใช้กลูโคสซีรัปเท่ากัน ตัวอย่างที่ผสมกลูโคสซีรัปชนิด 65 DE มีค่าความเหนียวสูงสุดที่สูงกว่าตัวอย่างที่ผสมกลูโคสซีรัปชนิด 43 DE ดังนั้นแม้ว่าการเพิ่มปริมาณของกลูโคสซีรัปในตัวอย่างจะทำให้ตัวอย่างมีค่า T_g และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้ตัวอย่างมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ค่าความเหนียวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ผิวหน้าตัวอย่างเป็นหลัก ทำให้ผิวหน้ามีลักษณะเหนียว

Hadjikinova และคณะ (2003) ศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้นของลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้าที่ผลิตจากไอโซมอลท์และซอร์บิทอล โดยใช้ static gravimetric method พบว่าที่ 20°C ลักษณะเส้น moisture sorption isotherm ที่ได้มีลักษณะเดียวกับเส้น moisture sorption isotherm ของอาหารที่มีส่วนผสมของน้ำตาลในปริมาณสูง กล่าวคืออาหารมีค่าความชื้นที่สมดุลต่ำที่ a_w ต่ำๆ และเมื่อ a_w สูงกว่า 0.6 ความชื้นสมดุลจึงเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ สมการของ Peleg (Peleg, 1988) และ GAB ในการทำนาย moisture sorption isotherm ของตัวอย่างลูกกวาด พบว่าสมการของ Peleg มีความเหมาะสมกว่า ($r \geq 0.995$) นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากัน ลูกกวาดเนื้อแข็งที่ทำจากซอร์บิทอลมีความสามารถในการดูดความชื้นดีกว่าลูกกวาดเนื้อแข็งที่ทำจากไอโซมอลท์ จึงเป็นไปได้ว่าลูกกวาดเนื้อแข็งที่ทำจากซอร์บิทอลจะมีเสถียรภาพต่ำหรือเกิดการเสื่อยรูปร่างเนื่องจากความชื้นได้มากกว่าลูกกวาดเนื้อแข็งที่ทำจากไอโซมอลท์

McFetridge และคณะ (2004) ศึกษาผลของการเติม Doctoring agent ในกลุ่ม HSH ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (H5875) และชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (H6075) ต่อเสถียรภาพของระบบออสซิลฐานของไอโซมอลท์ เมื่อพิจารณาค่า T_g ของระบบออสซิลฐานปราศจากน้ำ (anhydrous) ของไอโซมอลท์ และ HSH แต่ละชนิดพบว่า ค่า T_g ของ H5875 มีค่าต่ำกว่าค่า T_g ของไอโซมอลท์ ส่วนค่า T_g ของ H6075 มีค่าสูงกว่าค่า T_g ของไอโซมอลท์ เมื่อผสมไอโซมอลท์และ HSH แต่ละชนิดในปริมาณ 25% 50% และ 75% ค่า T_g ของระบบออสซิลฐานผสมที่ปราศจากน้ำจะมีค่าอยู่ระหว่างค่า T_g ของส่วนผสมบริสุทธิ์แต่ละชนิด ในการศึกษาการเกิดชั้นผลึกในระบบออสซิลฐานผสมโดยเก็บตัวอย่างระบบออสซิลฐานผสมระหว่างไอโซมอลท์และ HSH แต่ละชนิด (ผสม HSH10%) ที่บดเป็นผงแล้ว ที่ 20°C และความชื้นสัมพัทธ์ 80% แล้วสังเกตชั้นผลึกที่ปรากฏเป็นคราบสีขาวบนตัวอย่างด้วยตาเปล่า พบว่า H5875 สามารถชะลอการเกิดชั้นผลึก โดยยืดระยะเวลาก่อนที่จะสังเกตเห็นคราบสีขาว (induction time) และลดอัตราส่วนของตัวอย่างที่เกิดชั้นผลึก นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อตัวอย่างดูดความชื้นจะพบค่า T_g มากกว่าหนึ่งค่า แม้ว่าตัวอย่างจะประกอบด้วยส่วนผสม

ชนิดเดียวหรือหลายชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการกระจายของความชื้นที่ไม่สม่ำเสมอภายในตัวอย่าง โดยค่า T_g ต่ำสุดอาจแสดงถึงค่า T_g ของผิวหน้าตัวอย่างซึ่งมีการดูดความชื้นมากที่สุด ส่วนค่า T_g สูงสุดซึ่งใกล้เคียงกับ T_g ของตัวอย่างปราศจากน้ำ อาจแสดงถึงค่า T_g ของแกนกลางตัวอย่าง ซึ่งยังไม่มีการดูดความชื้นจากบรรยากาศ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

3.1.1 การศึกษาเสถียรภาพของลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า

งานวิจัยส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดสมบัติที่บ่งถึงเสถียรภาพของลูกกวาดเนื้อแข็งที่วางจำหน่ายในท้องตลาดได้แก่ ปริมาณความชื้น และ glass transition temperature (T_g) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล

3.1.2 การศึกษาผลขององค์ประกอบต่อค่า T_g และ Moisture sorption isotherm ของตัวอย่างระบบบอสนฐานผสม

งานวิจัยส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลขององค์ประกอบได้แก่ น้ำและน้ำตาลแอลกอฮอล์ (ไอโซมอลท์ ซึ่งใช้เป็นส่วนผสมหลัก และ HSH ซึ่งทำหน้าที่เป็น doctoring agent) ต่อค่า T_g และสร้าง moisture sorption isotherm ของตัวอย่างระบบบอสนฐานผสม นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาพิจารณาเลือกสัดส่วนการแทนที่ไอโซมอลท์ด้วย HSH ที่ดีที่สุดเพียง 1 สูตร คือสูตรที่ให้ค่า T_g สูงสุดและดูดความชื้นได้น้อย เพื่อนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งต่อไป

3.1.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล

งานวิจัยส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลจากระบบบอสนฐานผสมที่เลือกได้จากข้อ 3.1.2 โดยนำมาปรุงแต่งสีและกลิ่นรสแล้วนำไปทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส (acceptance test) โดยผู้บริโภค คัดเลือกสูตรที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากคะแนนความชอบร่วมกับปัจจัยอื่น เช่น ต้นทุนการผลิต

3.1.4 การศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะเร่ง

งานวิจัยส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ตามสูตรที่ได้จากข้อ 3.1.3 ซึ่งประกอบด้วยไอโซมอลท์ผสม HSH เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ปรุงแต่งกลิ่นรสที่ไม่ผสม HSH (สูตรควบคุม) เก็บตัวอย่างลูกกวาดในรูปแบบเม็ดเปลือกและบรรจุในบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ พลาสติกประเภทลามิเนต 2 ชนิด ได้แก่ Oriented Polypropylene/ Metallized Cast Polypropylene (OPP/MCPP) และ Polyethylene terephthalate/ Cast Polypropylene (PET/ CPP) (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) เก็บตัวอย่างในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) หาค่าน้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดความชื้น และติดตามความหนาของชั้นผลึกของน้ำตาลแอลกอฮอล์บนผิวตัวอย่าง นำข้อมูลที่ได้มาช่วยในการประเมินอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ต่อไป

3.2 วัตถุดิบและอุปกรณ์

3.2.1 วัตถุดิบสำหรับการเตรียมตัวอย่างระบบอสังฐานผสม

3.2.1.1 ไอโซมอลท์ (ความบริสุทธิ์ $\geq 98\%$) (Palatinit[®], BENEIO Palatinit GmbH, ประเทศเยอรมัน)

3.2.1.2 Doctoring agent กลุ่ม hydrogenated starch hydrolysate (HSH) (มีองค์ประกอบหลักคือมอลทิทอล และองค์ประกอบย่อยคือซอร์บิทอล และน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำตาลต่อกันมากกว่า 3 หน่วย, Ueno Fine Chemicals, ประเทศไทย)

3.2.2 วัตถุดิบสำหรับการเตรียมตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็ง

3.2.2.1 ไอโซมอลท์ และ HSH เช่นเดียวกับข้อ 3.2.1.1 และ 3.2.1.2

3.2.2.2 สารสกัดจากพืช (เป็นของแข็งอยู่ในรูปผงแห้ง)

3.2.2.3 สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล กลุ่ม intense sweeteners

3.2.2.4 สีสผสมอาหาร

3.2.3 บรรจุภัณฑ์สำหรับตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็ง

บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นฟิล์มพลาสติกประเภทลามิเนต 2 ชนิด ได้แก่ Oriented Polypropylene/ Metallized Cast Polypropylene (OPP/MCPP) หนา 46 μm และ Polyethylene terephthalate/ Cast Polypropylene (PET/CPP) หนา 38 μm ซึ่งมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ข้อมูลในตารางที่ 3.1 ได้จากการส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย วัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำโดยเครื่อง water vapor permeation tester (Lyssy, L80-4000, Switzerland) ตามวิธี ISO 15106-1:2003 (E) (ISO, 2010) และวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนโดยเครื่อง oxygen permeation analyzer (Illinois Instruments, 8000, USA) ตามวิธี ASTM D3985-02 (ASTM, 2010)

ตารางที่ 3.1 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของฟิล์มพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ชนิดฟิล์มพลาสติก	ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)	ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)
PET/CPP	8.56	122
OPP/MCPP	0.73	120

ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ วัดที่ 38°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ส่วนค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน วัดที่ 23°C ความชื้นสัมพัทธ์ 0%

3.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการเตรียมตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็ง

3.2.4.1 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Ohaus, model Explorer, Switzerland)

3.2.4.2 เตาไฟฟ้า (Hot plate) (Framo[®] - Geratetechnik รุ่น M 21/1, Germany)

3.2.4.3 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแอลกอฮอล์

3.2.4.4 เครื่องแก้ว (ปิ๊กเกอร์และแท่งแก้วคน)

3.2.4.5 เครื่องปิดผนึกฟิล์มพลาสติกด้วยความร้อน

3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาเสถียรภาพของลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด 8 ตัวอย่าง ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบหลักและประเทศผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายใน ท้องตลาดที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้

รหัสตัวอย่าง	องค์ประกอบหลัก			ประเทศผู้ผลิต
SC 1	ซูโครส 66 %	กลูโคสซีรัป 33 %		ไทย
SC 2	ซูโครส 66 %	กลูโคสซีรัป 33 %		ไทย
SC 3	ซูโครส 65 %	กลูโคสซีรัป 33.5 %		ไทย
SC 4	ซูโครส 68 %	กลูโคสซีรัป 30.08 %		สวีตเซอร์แลนด์
SFC 1	ไอโซมอลท์ 95 %	ซอร์บิทอล 0.61 %		สวีตเซอร์แลนด์
SFC 2	ไอโซมอลท์ 92 %			ไทย
SFC 3	ไอโซมอลท์ 86.6 %	มอลทิทอล 10 %		เยอรมัน
SFC 4	มอลทิทอล 99 %			ไทย

ชนิดและปริมาณน้ำตาลและ/หรืออนุพันธ์ของน้ำตาลที่ใช้เป็นส่วนผสมรายงานตามที่ระบุบนฉลาก ผลิตภัณฑ์

นำตัวอย่างมาวิเคราะห์สมบัติที่เป็นดัชนีของเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ดังนี้ (ทดลอง 3 ซ้ำ)

3.3.1.1 ปริมาณความชื้น ด้วยเครื่อง Karl-Fischer coulometric titrator (Metrohm, 795 KFT Titrino และ 703 Ti Stand, Switzerland) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1

3.3.1.2 ค่า T_g ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) (Perkin-Elmer, model Diamond DSC, USA) ดัดแปลงจากวิธีของ Raudonus และคณะ (2000) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2

3.3.1.3 Sorption isotherm ด้วยวิธี static gravimetric technique ดัดแปลงจากวิธีของ Hadjikinova และคณะ (2003) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3

3.3.2 การศึกษาผลขององค์ประกอบต่อค่า T_g และการหา moisture sorption isotherm ของตัวอย่างระบบอสัณฐานผสม

เตรียมตัวอย่างระบบอสัณฐานผสมระหว่างไอโซมอลท์บริสุทธ์ และ HSH แปรปริมาณ HSH ในอัตราส่วน 10% และ 20% โดยน้ำหนักแห้ง ผสมน้ำตาลแอลกอฮอล์และน้ำให้มีอัตราส่วนของแข็ง 70% โดยน้ำหนัก ต้มเคี้ยวส่วนผสมภายใต้ความดันบรรยากาศจนถึงอุณหภูมิประมาณ 105 - 160°C เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความชื้นสุดท้ายในช่วง 1 - 15% โดยตัวอย่างในช่วงความชื้น 1 - 3% จะเป็นของแข็ง ส่วนตัวอย่างในช่วงความชื้น 4 - 15% จะเป็นของเหลว นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพดังต่อไปนี้

3.3.2.1 ความชื้นและค่า T_g

วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นและค่า T_g ตามวิธีที่ระบุในข้อ 3.3.1 ในแต่ละชุดของระบบอสัณฐานผสม แปรปริมาณความชื้นเพื่อให้ได้ค่า T_g อย่างน้อย 4 ค่า นำข้อมูลที่ได้มาใช้ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบและค่า T_g ตามสมการ Gordon-Taylor (Gordon และ Taylor, 1952) แสดงดังสมการที่ 3.1

$$T_g = \frac{w_1 T_{g1} + k w_2 T_{g2}}{w_1 + k w_2} \quad (3.1)$$

เมื่อ T_{g1} คือ T_g ของของแข็งบริสุทธ์ที่ปราศจากน้ำ (°C)

T_{g2} คือ T_g ของน้ำบริสุทธ์ (°C) มีค่าเท่ากับ -134°C (Johari และคณะ, 1987)

w_1 และ w_2 คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของของแข็งและน้ำในระบบตามลำดับ

k คือ ค่าคงที่ แสดงถึงความไวของการเปลี่ยนแปลงค่า T_g เมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไป

3.3.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้นของระบบอสัณฐานผสม

สร้าง sorption isotherm ของตัวอย่าง ตามวิธีที่ระบุในข้อ 3.3.1 (ทดลอง 3 ซ้ำ) นำข้อมูลที่ได้มาทำนายความสัมพันธ์ระหว่าง a_w และความชื้นที่สมดุลตามสมการ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) (Anderson, 1946; de Boer, 1946 และ Guggenheim, 1966) ดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$M = \frac{M_0 C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (3.2)$$

เมื่อ M คือ ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง

M_0 คือ ปริมาณ monolayer water

C คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของ binding energy ระหว่างโมเลกุลของน้ำในชั้น monolayer และโมเลกุลของน้ำในชั้นที่เหนือขึ้นไป

K คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของ binding energy ระหว่างโมเลกุลของน้ำบริสุทธิ์ในสถานะของเหลวและโมเลกุลของน้ำในชั้นที่ถัดจาก monolayer ($K \leq 1$)

a_w คือ ค่ากิจกรรมของน้ำ

คัดเลือกอัตราส่วนการแทนที่ไอโซมอลท์ด้วย HSH ที่ดีที่สุดเพียง 1 สูตรคือสูตรที่ให้ค่า T_g สูงสุดและดูดความชื้นได้น้อย เพื่อนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งต่อไป

3.3.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล

เตรียมตัวอย่างลูกกวาดจากส่วนผสมที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.3.2 โดยกำหนดให้ส่วนประกอบที่เป็นของแข็ง ซึ่งได้แก่ น้ำตาลแอลกอฮอล์และสารสกัดจากพืชให้มีอัตราส่วนโดยรวมเท่ากับ 70% เตรียมตัวอย่างโดยผสมน้ำตาลแอลกอฮอล์และน้ำเข้าด้วยกัน ต้มเคี่ยวส่วนผสมภายใต้ความดันบรรยากาศจนถึงอุณหภูมิประมาณ 160°C แล้วจึงนำตัวอย่างมาเติมสารสกัดจากพืช สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลกลุ่ม intense sweeteners และสีผสมอาหาร คนส่วนผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว (อุณหภูมิตัวอย่างไม่ต่ำกว่า 140°C) หยอดตัวอย่างลงแม่พิมพ์ซิลิโคนแบบนึ่ง แล้วนำไปพักไว้ในกล่องพลาสติกปิดสนิทที่บรรจุ silica gel เพื่อให้ตัวอย่างเย็นลงและแข็งตัว (ใช้เวลาประมาณ 20 นาที) จะได้ตัวอย่างลูกกวาดเม็ดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm หนา 0.5 - 0.7 cm น้ำหนักต่อเม็ดประมาณ 3.0 - 3.5 g แล้วจึงบรรจุตัวอย่างที่ได้ลงในห่อฟิล์ม

พลาสติกชนิด OPP/MCPP ปิดผนึกด้วยความร้อน (heat seal) โดยใช้เครื่องปิดผนึกเพื่อรอการทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อไป

แปรชนิดของสารสกัดจากพืชเป็น 2 ชนิด (ไม่สามารถเปิดเผยรายละเอียดของสารสกัดที่ใช้ในงานวิจัยได้ตามข้อตกลงกับบริษัทที่ร่วมโครงการวิจัย) จึงได้ตัวอย่างลูกกวาด 2 สูตร นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติโดยรวม และความชอบรวม ด้วย 5-point hedonic scale โดยผู้บริโภคร่วมเป้าหมายจำนวน 50 คน ประกอบด้วยเพศชาย 38 คน เพศหญิง 12 คน ในช่วงอายุ 40-50 ปี

วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลในระดับความเชื่อมั่น 95% นำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาเลือกสูตรที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคร่วมกับปัจจัยอื่น เช่น ต้นทุนการผลิต

3.3.4 การศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะเร่ง

เตรียมตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็งจากสูตรที่คัดเลือกได้ในข้อ 3.3.3 ตามวิธีที่ระบุในข้อ 3.3.3 เก็บตัวอย่างในลักษณะเม็ดเปลือย (วางเม็ดเปลือยในถ้วยพลาสติกที่เปิดฝา) และบรรจุตัวอย่างในห่อฟิล์มพลาสติก 2 ชนิด ได้แก่ OPP/MCPP และ PET/PP ขนาดประมาณ 3×3 cm ปิดผนึกด้วยความร้อนและระวังไม่ให้มีรอยร้าว (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างและบรรจุภัณฑ์เริ่มต้น แล้วจึงบรรจุตัวอย่างแต่ละชุดลงในโถแก้วบรรจุสารละลายเกลือ KCl อิมตัว เพื่อควบคุมให้มีความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$ (Greenspan, 1977) เก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ หนึ่ง ภาวะการเก็บรักษานี้ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Raudonus และคณะ (2000) และ McFetridge และคณะ (2004) จากนั้นจึงตรวจวัดค่าต่อไปนี้ระหว่างการเก็บรักษา (ทดลอง 3 ซ้ำ)

3.3.4.1 น้ำหนักตัวอย่าง

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเม็ดเปลือยทุกๆ 3 - 4 วัน จนครบ 20 วัน ส่วนตัวอย่างในบรรจุภัณฑ์จะชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมบรรจุภัณฑ์ทุกๆ 15 วัน จนครบ 90 วัน คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก ตามสมการ 3.3

$$\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่เก็บรักษา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.3)$$

3.3.4.2 ความหนาของชั้นผลึกบนผิวตัวอย่าง

วัดความหนาของชั้นผลึกบนผิวตัวอย่างด้วยเครื่อง Stereomicroscope (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4) เก็บตัวอย่างตามช่วงเวลาที่จะระบุในข้อ 3.3.4.1 นำข้อมูลที่ได้มาช่วยประเมินอายุการเก็บโดยใช้เกณฑ์ว่า ผลึกที่อาจไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเมื่อสังเกตเห็นคราบสีขาวบริเวณผิวหน้าตัวอย่างอย่างชัดเจน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 เสถียรภาพของลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลจากตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรใช้น้ำตาลและกลูโคสซีรัป (สูตรปกติ) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด 4 ตัวอย่าง (SC 1 – SC 4) และลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรใช้น้ำตาลทางการค้า 4 ตัวอย่าง (SFC 1 - SFC 4) พบว่าตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรปกติมีความชื้นอยู่ในช่วง 1 - 3.5% และมีค่า T_g อยู่ในช่วง 44 - 60°C โดยตัวอย่างที่มีความชื้นสูงกว่าจะมีค่า T_g ต่ำลง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Nowakowski และ Hartel (2002) กล่าวคือ ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีส่วนผสมเป็นน้ำตาล 63% และ corn syrup (43 DE) 37% ที่ความชื้น 3.5% มีค่า T_g 45°C และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า T_g ต่ำลง ส่วนตัวอย่างผลิตภัณฑ์สูตรใช้น้ำตาลมีความชื้นในช่วง 1.8-2.5% ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างสูตรปกติ แต่กลับมีค่า T_g ต่ำกว่า (33-45°C) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากลูกกวาดทั้งสองสูตรมีองค์ประกอบต่างกัน จึงส่งผลให้มีค่า T_g ต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ความชื้นและค่า T_g ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

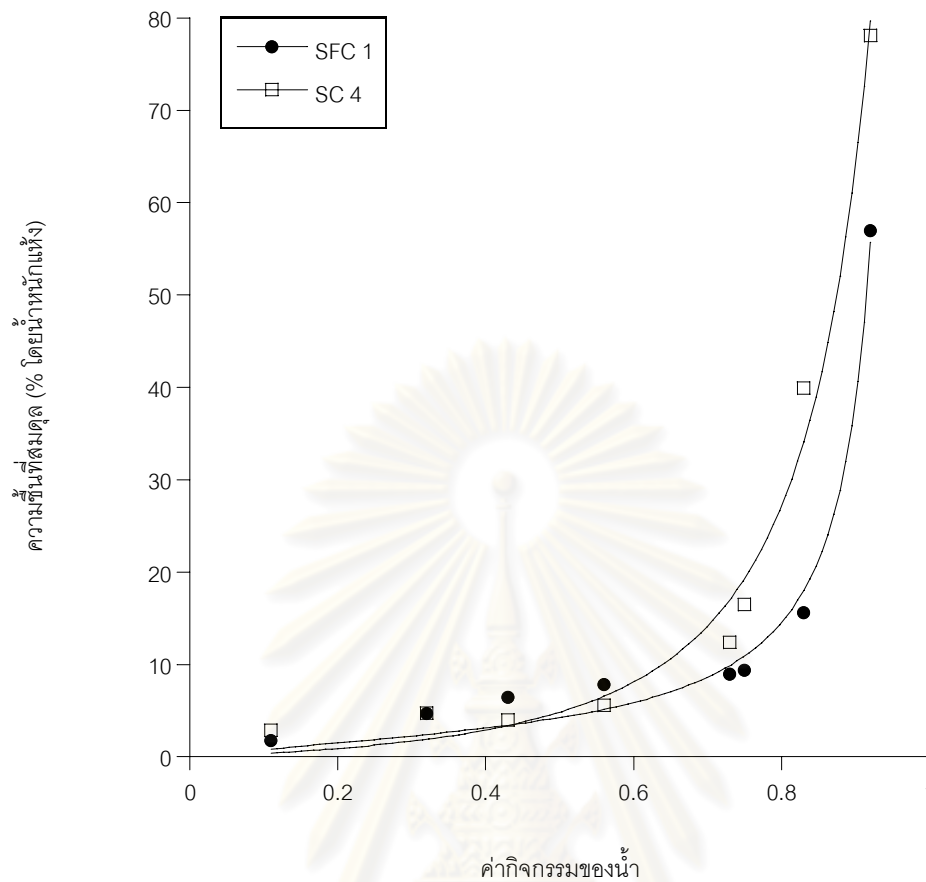
ตัวอย่าง	ส่วนผสมหลัก	ความชื้น (%)	T_g (°C)
SC 1	ซูโครส	1.94 ± 0.14	50.00 ± 2.08
SC 2	ซูโครส	3.23 ± 0.04	44.84 ± 0.34
SC 3	ซูโครส	3.49 ± 0.20	46.91 ± 0.91
SC 4	ซูโครส	1.04 ± 0.18	60.08 ± 0.28
SFC 1	ไอโซมอลท์	1.97 ± 0.07	44.38 ± 1.41
SFC 2	ไอโซมอลท์	2.27 ± 0.10	37.51 ± 0.47
SFC 3	ไอโซมอลท์	2.48 ± 0.05	33.37 ± 0.24
SFC 4	มอลทิทอล	1.86 ± 0.16	35.35 ± 2.11

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาตัวอย่างสูตรไร้น้ำตาลที่มีความชื้นใกล้เคียงกันคือ SFC 1 และ SFC 4 พบว่ามีค่า T_g ต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะส่วนผสมที่ต่างกันกล่าวคือ SFC 1 มีส่วนผสมหลักเป็นไอโซมอลท์ ส่วน SFC 4 มีส่วนผสมหลักเป็นมอลทิทอล ซึ่งจากการพิจารณาค่า T_g ของไอโซมอลท์และมอลทิทอลบริสุทธิ์ที่ปราศจากน้ำพบว่ามีค่า 63.6 และ 39°C ตามลำดับ (Roos, 1993; Raudonus และคณะ, 2000) จึงเป็นผลให้ SFC 1 มีค่า T_g สูงกว่า SFC 4 สำหรับตัวอย่างที่มีไอโซมอลท์เป็นส่วนผสมหลัก (SFC 1-SFC 3) พบว่ามีความชื้นอยู่ในช่วง 2 – 2.5% และค่า T_g อยู่ในช่วง 33 - 44°C ซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยของ Raudonus และคณะ (2000) ที่รายงานว่าค่า T_g ของระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์ที่มีความชื้น 2-2.5% มีค่าอยู่ระหว่าง 45-49°C ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลทางการค้ามีส่วนผสมอื่นๆ ที่อาจส่งผลต่อค่า T_g

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการดูดความชื้น หรือ adsorption isotherm ของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า 2 ชนิด ได้แก่ SC 4 และ SFC 1 ซึ่งคัดเลือกมาเป็นตัวแทนของตัวอย่างสูตรปกติและสูตรไร้น้ำตาลตามลำดับ (รูปที่ 4.1; ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข.2.1-ข.2.2)) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ผลิตจากบริษัทเดียวกันรวมทั้งเป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมจากผู้บริโภคเป็นอย่างดี ซึ่งพบว่าที่ค่า $a_w > 0.56$ SC 4 มีความสามารถในการดูดความชื้นสูงกว่า SFC 1 และสามารถใช้สมการ GAB ในการอธิบาย sorption isotherm ของตัวอย่างทั้ง 2 ได้ (R มีค่าประมาณ 0.99) ค่าพารามิเตอร์จากสมการ GAB แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่า M_0 หรือความชื้นใน monolayer ของตัวอย่าง SC 4 มีค่ามากกว่าค่าดังกล่าวของตัวอย่าง SFC 1 ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดความชื้นของตัวอย่าง SC 4 ที่ดีกว่า

ในการพิจารณาเสถียรภาพของตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า จากข้อมูล T_g ร่วมกับ adsorption isotherm พบว่า ตัวอย่างสูตรปกติมีค่า T_g สูง (ตารางที่ 4.1) แต่มีความสามารถในการดูดความชื้นมากกว่า (รูปที่ 4.1) ดังนั้น ปัจจัยสำคัญที่อาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีเสถียรภาพต่ำลงคือ ความชื้น การรักษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ให้คงอยู่ในสถานะแก้วตลอดระยะเวลาเก็บรักษาของตัวอย่างกลุ่มนี้ ทำได้โดยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี เพื่อชะลอการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ส่วนตัวอย่างสูตรไร้น้ำตาล แม้ว่าจะดูดความชื้นได้น้อยกว่า (รูปที่ 4.1) แต่มีค่า T_g ต่ำกว่าตัวอย่างสูตรปกติ (ตารางที่ 4.1) ดังนั้น ปัจจัยสำคัญที่อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิด glass transition คือ อุณหภูมิการเก็บรักษา จึงควรเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าค่า T_g ของตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์สูตรไร้น้ำตาลที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องของประเทศในเขตร้อนชื้น ดังเช่นประเทศไทย ดังนั้น ผลิตภัณฑ์กลุ่มดังกล่าวจึงอาจเกิด glass transition ที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้เกิดผลึกหรือเหลวตัว จนผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้



รูปที่ 4.1 Moisture sorption isotherm ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สูตรปกติ (SC 4) และสูตรไร้น้ำตาล (SFC 1) เส้นที่บแสดงถึงค่าที่ทำนายได้จากสมการ GAB

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์จากสมการ GAB ที่เกี่ยวข้องกับ adsorption isotherm ของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สูตรปกติ (SC 4) และสูตรไร้น้ำตาล (SFC 1)

ลูกกวาดเนื้อแข็ง	M_0	K	C	R
SC 4	15.831	0.957	0.207	0.992
SFC 1	2.657	1.036	3.160	0.993

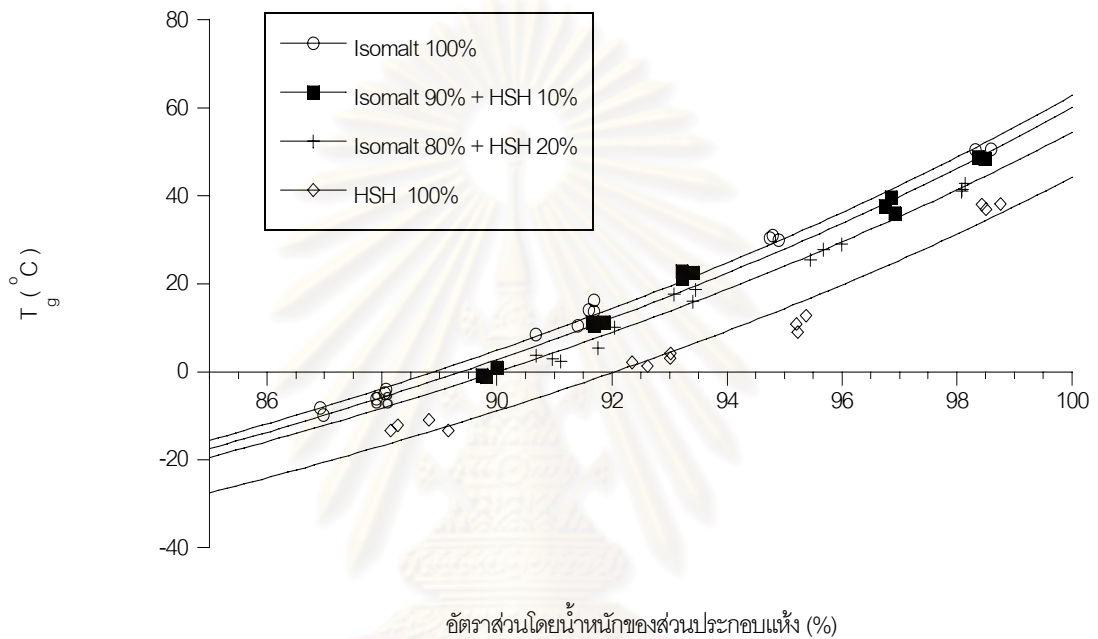
4.2 ผลขององค์ประกอบต่อค่า T_g และ Moisture sorption isotherm ของตัวอย่างระบบ อสังฐานผสม

ในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกไอโซมอลท์เป็นส่วนผสมหลักในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล เนื่องจากไอโซมอลท์เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในทางการค้าและมีค่า T_g สูง และทดแทนไอโซมอลท์บางส่วนด้วย doctoring agent กลุ่ม HSH เพื่อศึกษาผลของ HSH ในการชะลอการตกผลึกของน้ำตาลแอลกอฮอล์ในผลิตภัณฑ์ มี doctoring agent หลายชนิดที่สามารถนำมาใช้กับลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล (Raudonus และคณะ, 2000) แต่สาเหตุที่เลือกกลุ่ม HSH มาเป็นตัวแทนในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็น doctoring agent เพียงกลุ่มเดียวที่ผลิตในประเทศไทย จึงมีราคาถูก รวมทั้งให้ความเหนียวในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งในการคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของไอโซมอลท์และ HSH จำเป็นต้องพิจารณาถึงค่า T_g และความสามารถในการดูดความชื้นของระบบ ซึ่งบ่งถึงเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

เมื่อพิจารณาผลขององค์ประกอบต่อค่า T_g ของระบบอสังฐานผสม (รูปที่ 4.2; ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข.1.1-ข.1.4)) พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (อัตราส่วนของแข็งลดลง) จะส่งผลให้ค่า T_g ลดลง และที่ความชื้นเท่ากัน การเติม HSH กลับทำให้ค่า T_g ของระบบผสมมีค่าต่ำกว่า T_g ของระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์ แต่ยังสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_g ของตัวอย่างระบบอสังฐานผสมและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบโดยใช้สมการของ Gordon-Taylor ได้ ($R \geq 0.98$) ซึ่งสมการ Gordon-Taylor จะให้ข้อมูลเพิ่มเติมที่สำคัญ คือ ค่า k ซึ่งบ่งถึงความไวของการเปลี่ยนแปลงค่า T_g เมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลง และใช้สมการนี้เพื่อคำนวณค่า T_g ในระบบที่ปราศจากน้ำและที่ความชื้น 2% ซึ่งเป็นค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่วางจำหน่ายทั่วไปได้

เมื่อพิจารณตารางที่ 4.3 พบว่าค่า T_g ของ HSH บริสุทธิ์ที่ปราศจากน้ำมีค่า 44.2°C ซึ่งต่ำกว่าค่า T_g ของไอโซมอลท์บริสุทธิ์ที่ปราศจากน้ำ แม้ว่า HSH จะมีมวลโมเลกุลเฉลี่ยสูงกว่าไอโซมอลท์ น้ำตาลแอลกอฮอล์ที่เป็นองค์ประกอบของ HSH (เช่น มอลทิทอล ซอร์บิทอล และน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่ชนิดอื่นๆ) กลับแตกต่างจากองค์ประกอบของไอโซมอลท์สมบัติเฉพาะตัวของหน่วยย่อยที่เป็นองค์ประกอบของ HSH อาจส่งผลโดยรวมต่อค่า T_g ของ HSH ด้วย ดังนั้นความแตกต่างของค่า T_g ในกรณีนี้จึงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยมวลโมเลกุลเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการแทนที่ HSH ในอัตราส่วนที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่า T_g ของระบบผสมลดลงแต่ยังคงมีค่าสูงกว่า 44.2°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ McFetridge และคณะ (2004) ซึ่งพบว่าการแทนที่ HSH ที่มีค่า T_g สูงหรือต่ำกว่าค่า T_g ของไอโซมอลท์ในทุกอัตราส่วนจะส่งผลให้ระบบผสมมีค่า T_g อยู่ระหว่างค่า T_g ของ HSH บริสุทธิ์และไอโซมอลท์บริสุทธิ์ ส่วนค่า k ของระบบอสังฐาน

ผสมมีค่าใกล้เคียงกับค่า k ของระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์ แสดงว่าระบบบอัสฐานผสมและระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์มีความไวของการเปลี่ยนแปลงค่า T_g เมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างใกล้เคียงกัน เมื่อคำนวณค่า T_g ของระบบจากสมการ Gordon-Taylor ที่ความชื้น 2% ซึ่งใกล้เคียงกับความชื้นของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า พบว่าระบบที่ประกอบด้วย HSH 10% ยังมีค่า T_g สูงและใกล้เคียงกับค่า T_g ของระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์



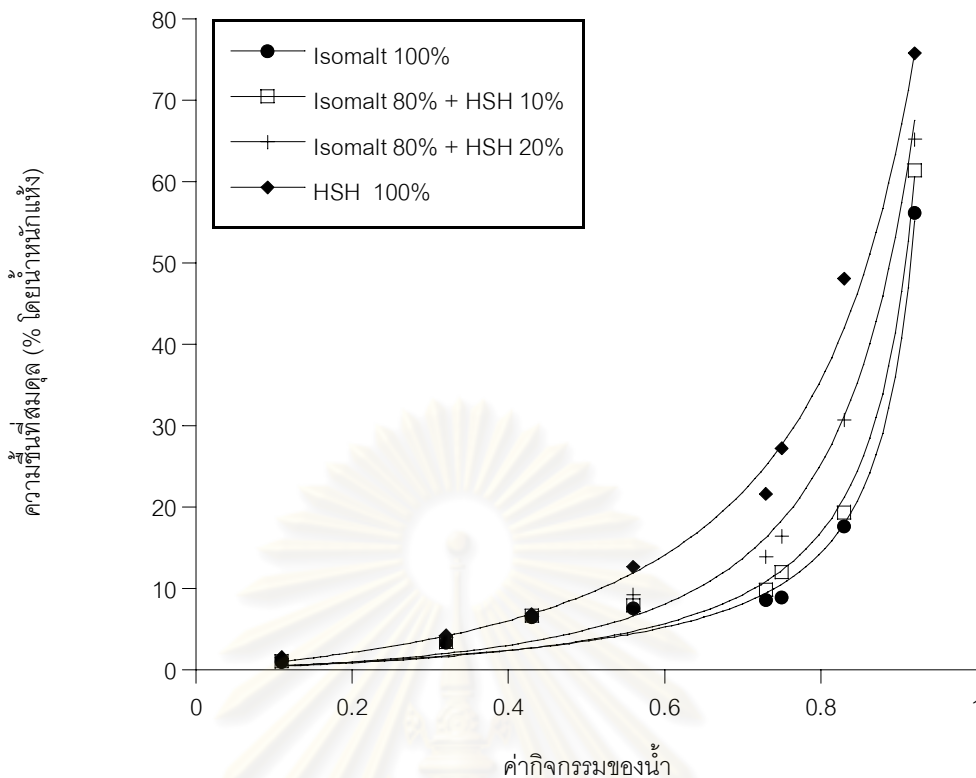
รูปที่ 4.2 ค่า T_g ของระบบบอัสฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์บริสุทธิ์ HSH บริสุทธิ์ และระบบผสมระหว่างไอโซมอลท์และ HSH ในอัตราส่วน 10% และ 20% โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบแห้งในระบบต่างกัน เส้นทึบแสดงค่าที่ทำนายได้จากสมการ Gordon-Taylor

ตารางที่ 4.3 ค่า T_g และค่า k ตามสมการ Gordon-Taylor ของระบบออสโมติกที่ประกอบด้วย ไอโซมอลท์ หรือ HSH และระบบผสมระหว่างไอโซมอลท์และ HSH ในอัตราส่วน 10% และ 20% โดยน้ำหนักแห้ง

ส่วนประกอบ	k	T_g (°C)		R
		ระบบที่ปราศจากน้ำ	ระบบที่มีความชื้น 2%	
Isomalt 100%	3.8	62.8	48.5	0.997
Isomalt 90%+HSH 10%	3.8	60.1	46.1	0.991
Isomalt 80%+HSH 20%	3.7	54.4	41.2	0.993
HSH 100%	3.8	44.2	31.4	0.984

ค่า T_g คำนวณจากสมการ Gordon-Taylor

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการดูดความชื้นของตัวอย่างระบบออสโมติก (รูปที่ 4.3; ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข.2.3-ข.2.6)) พบว่า adsorption isotherm ของระบบที่มีองค์ประกอบต่างกันจะแตกต่างกันด้วย โดยการเติม HSH ในระดับที่สูงขึ้นกลับส่งผลให้ระบบดูดความชื้นได้ดีขึ้น พฤติกรรมการดูดความชื้นของระบบที่เปลี่ยนแปลงตามชนิดของน้ำตาล แอลกอฮอล์ที่เป็นองค์ประกอบนี้มีรายงานไว้ในงานวิจัยของ Hadjikinova และคณะ (2003) ซึ่งพบว่าที่ $a_w > 0.75$ ระบบออสโมติกซอร์บิโพลมีความชื้นสมดุลสูงกว่าระบบออสโมติกไอโซมอลท์ประมาณ 20% ผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าเนื้อแข็งที่มีส่วนผสมของน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ดูดความชื้นได้ดีกว่าอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีเสถียรภาพต่ำลง เนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า T_g ลดลงด้วย เมื่อพิจารณาระบบผสมไอโซมอลท์และ HSH พบว่าระบบที่ประกอบด้วย HSH 10% มี sorption isotherm ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากระบบของไอโซมอลท์บริสุทธิ์ ที่ค่า a_w ในช่วง 0.7-0.8 ระบบที่ประกอบด้วย HSH 10% มีความชื้นสมดุลสูงกว่าระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์ไม่เกิน 3.5% แสดงถึงความสามารถในการดูดความชื้นที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะเมื่อเก็บตัวอย่างในภาวะที่มีความชื้นสูง (70-80%) นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้สมการ GAB อธิบายพฤติกรรมการดูดความชื้นของระบบออสโมติกได้ (R มีค่าประมาณ 0.99) ค่าพารามิเตอร์จากสมการ GAB ของตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน HSH ส่งผลให้ค่า M_0 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นแต่ค่า C และ K มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามค่า K ของทุกระบบยังคงมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งสอดคล้องกับค่า K ที่ได้จาก sorption isotherm ของอาหารอื่นๆ ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 (Timmermann, Chirife และ Iglesias, 2001) อนึ่ง ค่าความชื้นในชั้น monolayer ของระบบที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของ HSH อาจสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดความชื้นที่เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.3 Moisture sorption isotherm ของระบบออสดีนฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์บริสุทธิ์ HSH บริสุทธิ์ และระบบผสมระหว่างไอโซมอลท์และ HSH ในอัตราส่วน 10 และ 20% โดยน้ำหนักแห้ง เส้นที่บแสดงถึงค่าที่ทำนายได้จากสมการ GAB

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์จากสมการ GAB ที่เกี่ยวข้องกับ sorption isotherm ของระบบออสดีนฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์ หรือ HSH และระบบผสมระหว่าง ไอโซมอลท์ และ HSH ในอัตราส่วน 10 และ 20% โดยน้ำหนักแห้ง

ส่วนประกอบ	M_0	K	C	R
Isomalt 100%	2.899	1.032	1.332	0.993
Isomalt 90%+HSH 10%	3.990	1.021	0.774	0.994
Isomalt 80%+HSH 20%	13.794	0.946	0.257	0.994
HSH 100%	15.431	0.920	0.562	0.995

เมื่อพิจารณาค่า T_g ร่วมกับพฤติกรรมการดูดความชื้น พบว่าระบบบอัสฐานที่ประกอบด้วย HSH 10% เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีค่า T_g และพฤติกรรมการดูดความชื้นใกล้เคียงกับระบบไอโซมอลท์บริสุทธิ์

4.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล

ในงานวิจัยนี้ คัดเลือกผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายโดยให้ผู้บริโภคกรอกแบบสอบถามเบื้องต้นเพื่อหาผู้บริโภคที่มีความคุ้นเคยกับรสชาติจากพืชที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลสูตรผสม HSH 10% ที่ปรุงแต่งรสชาติจากพืชไปทดสอบกับผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายที่คัดเลือกได้ (ตัวอย่างแบบทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงในภาคผนวก ค.)

จากตารางที่ 4.5 พบว่าลูกกวาดเนื้อแข็งทั้ง 2 สูตรที่ผสมรสชาติจากพืชต่างสูตรกันได้รับคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติโดยรวม และความชอบรวมอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติแสดงในภาคผนวก ง.) โดยผู้บริโภคให้คะแนนความชอบแต่ละด้านอยู่ในช่วง “เฉยๆ” ถึง “ชอบ” (3 – 4) ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้คะแนนจากการทดสอบนี้เป็นเกณฑ์ในการเลือกสูตรผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด จึงพิจารณาจากต้นทุนของผลิตภัณฑ์แล้วพบว่า ส่วนผสมในสูตรที่ 1 ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีต้นทุนต่ำกว่า จึงเลือกสูตร 1 ในการศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป

ตารางที่ 4.5 คะแนนความชอบของผู้บริโภคต่อตัวอย่างลูกกวาด 2 สูตร

ตัวอย่าง	สีของลูกกวาด ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	รสชาติโดยรวม ^{ns}	ความชอบรวม ^{ns}
สูตร 1	3.42 ± 0.61	3.38 ± 0.83	3.34 ± 1.00	3.34 ± 0.85
สูตร 2	3.52 ± 0.54	3.40 ± 0.78	3.34 ± 0.89	3.42 ± 0.81

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนความชอบแบบ 5-point hedonic scale (1 หมายถึง ไม่ชอบมาก และ 5 หมายถึง ชอบมาก)

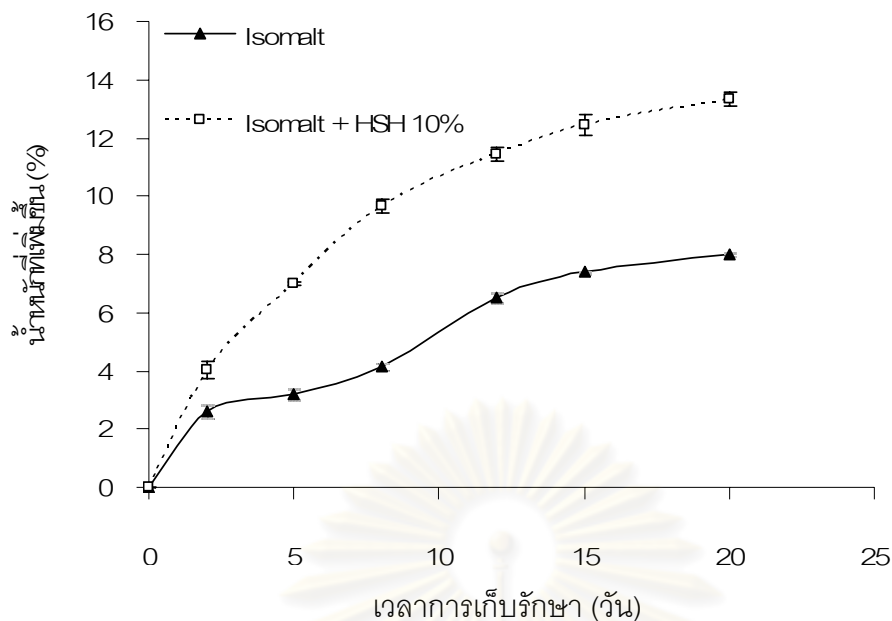
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.4 การศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะเร่ง

4.4.1 ผลิตภัณฑ์เม็ดเปลือย

จากรูปที่ 4.4 - 4.6 และตารางที่ 4.6 (ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข.3.1)) พบว่าลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยสูตรผสม HSH 10% มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากกว่า (ดูจากความขึ้นได้ดีกว่า) และเกิดขึ้นผลิตภัณฑ์ตัวอย่างได้เร็วกว่าและมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผสม HSH กล่าวคือ ในระหว่างเก็บรักษา 20 วัน ลูกกวาดเนื้อแข็งทั้ง 2 สูตร มีการเพิ่มน้ำหนักอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 0-8 และเริ่มคงที่หลังจากวันที่ 15 เป็นต้นไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของชั้นผลิตภัณฑ์บนผิวหน้าลูกกวาด และพบว่า สูตรผสม HSH 10% เกิดผลิตภัณฑ์จนถึงเม็ด โดยกินเนื้อที่เข้าไปถึงแกนกลางของตัวอย่าง ตั้งแต่วันที่ 15 ของการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องมาจาก HSH มีความสามารถในการดูดความชื้นที่ดีกว่าไอโซมอลท์ (Raudonus และคณะ, 2000; McFetridge และคณะ, 2004) แม้ว่า sorption isotherm ของตัวอย่างไอโซมอลท์ล้วน และสูตรผสม HSH 10% จะไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงๆ แต่การผสม HSH เพียง 10% กลับทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดความชื้นได้ดีขึ้น การเพิ่มขึ้นของความชื้นที่พื้นผิวรอบนอกของตัวอย่างทำให้ค่า T_g ของน้ำตาลแอลกอฮอล์บนผิวหน้าตัวอย่างมีค่าต่ำลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษา ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) ทำให้ผิวรอบนอกของตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นสถานะคล้ายยาง (rubbery state) ที่มีความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (ในที่นี้คือน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ผิวหน้าตัวอย่างลูกอม) เพิ่มมากขึ้น (Roos และ Karel, 1991) โมเลกุลของน้ำตาลแอลกอฮอล์จึงเคลื่อนที่มารวมตัวกัน จัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างผลึกได้ดีขึ้น เกิดเป็นชั้นผลิตภัณฑ์บนผิวของตัวอย่าง

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Raudonus และคณะ (2000) กล่าวคือ เมื่อเก็บรักษาลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์ และ doctoring-agent ชนิดต่างๆ ในอัตราส่วนแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 80% พบว่าการเติม doctoring agent ทุกชนิดในอัตราส่วนที่สูงขึ้นกลับทำให้ระบบดูดความชื้นมากขึ้น และทำให้เกิดชั้นผลิตภัณฑ์ของไอโซมอลท์ในตัวอย่างได้เร็วขึ้นและมากขึ้น แม้ว่า HSH จะช่วยเพิ่มความหนืดให้แก่ตัวอย่าง แต่ผลของการเพิ่มความหนืดโดยการเติม HSH 10% นี้ อาจจะไม่เพียงพอที่จะต้านทานผลของการดูดความชื้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้น HSH จึงไม่สามารถชะลอการเกิดชั้นผลิตภัณฑ์ของไอโซมอลท์ในตัวอย่างเม็ดเปลือยในภาวะเร่ง (ความชื้นสัมพัทธ์สูง) ได้



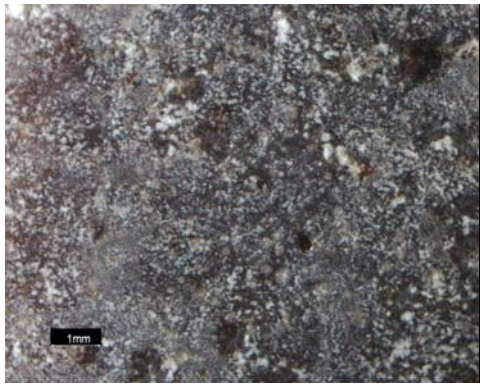
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยสูตรไม่ผสม HSH (isomalt) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + 10% HSH) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^\circ\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) Error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.6 ความหนาของชั้นผลึกบนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยสูตรไม่ผสม HSH (isomalt) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^\circ\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$)

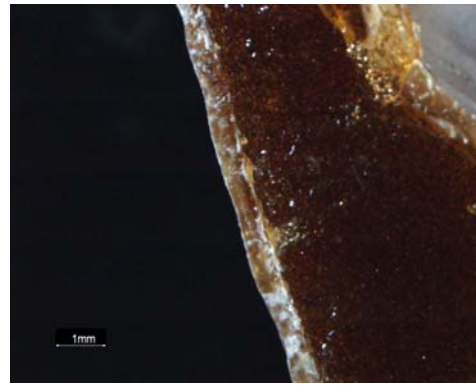
วันที่	ความหนาของชั้นผลึกบนผิวของตัวอย่าง (มม.)	
	Isomalt	Isomalt + HSH 10%
2	0.52 ± 0.03	0.65 ± 0.04
5	1.05 ± 0.02	1.20 ± 0.03
8	1.43 ± 0.04	2.08 ± 0.09
12	1.70 ± 0.03	2.56 ± 0.11
15	2.06 ± 0.06	-
20	2.46 ± 0.09	-

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

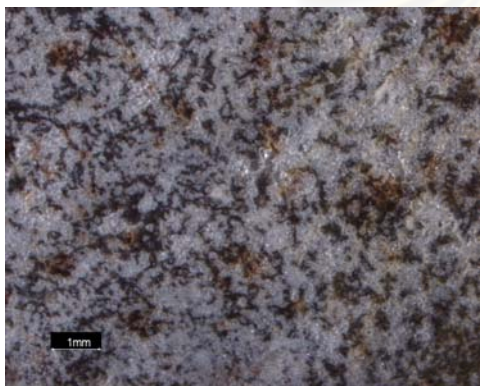
“-” ไม่สามารถวัดความหนาของชั้นผลึกของตัวอย่าง isomalt + HSH 10% ที่ 15 และ 20 วันได้ เนื่องจากเกิดผลึกถึงแกนกลางเม็ด



(a)



(b)



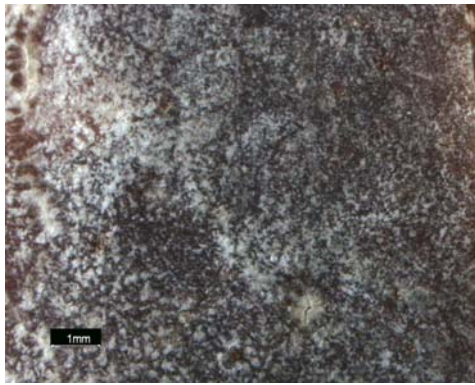
(c)



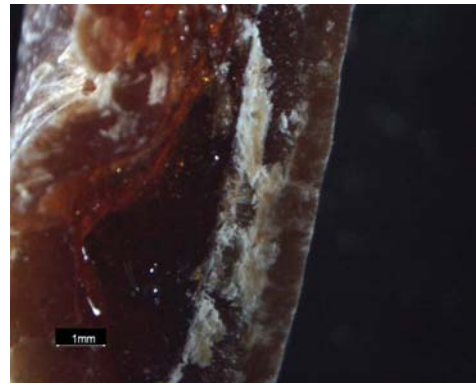
(d)

รูปที่ 4.5 ชั้นผลึกบนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยสูตรไม่ผสม HSH (isomalt)(a, b) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%)(c, d) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) ที่ 2 วัน

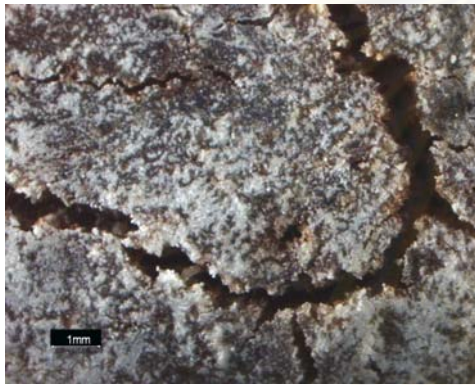
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



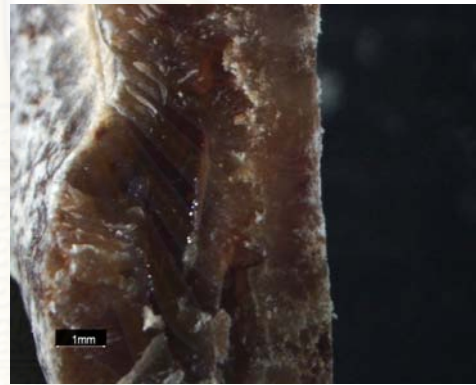
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.6 ชั้นผลึกบนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยสูตรไม่ผสม HSH (isomalt)(a, b) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%)(c, d) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) ที่ 12 วัน

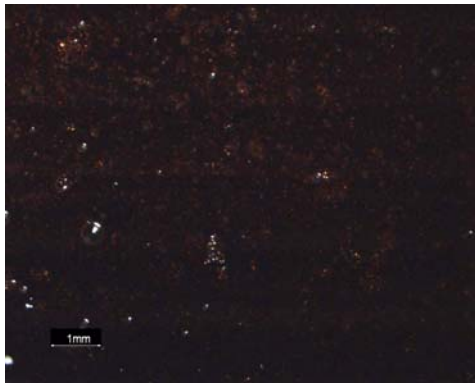
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 ผลกระทบที่บรรจุในห่อฟิล์มพลาสติก

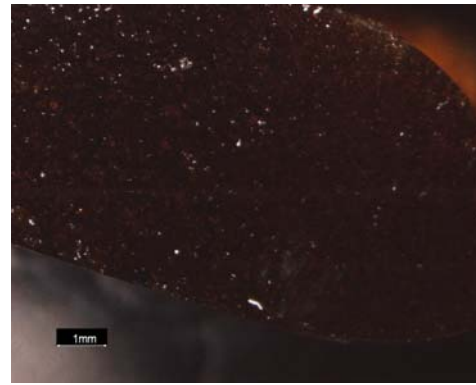
เมื่อบรรจุลูกกวาดเนื้อแข็งในห่อฟิล์มพลาสติก 2 ชนิด ได้แก่ OPP/MCPP และ PET/ CPP (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) พบว่า ลูกกวาดเนื้อแข็งทั้งสองสูตร (ผสมหรือไม่ผสม HSH) ที่บรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด OPP/MCPP เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไม่เกิน 0.3% และไม่พบการเกิดขึ้นผลึกบนผิวตัวอย่างตลอดระยะเวลา 3 เดือน (รูปที่ 4.7) ส่วนลูกกวาดเนื้อแข็งที่บรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/ CPP ทั้ง 2 สูตร มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและเกิดขึ้นผลึกบนผิวตัวอย่างในระดับที่ตรวจวัดได้ (รูปที่ 4.8 - 4.11 และตารางที่ 4.7; ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข.3.2)) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่พบในตัวอย่างในฟิล์มพลาสติกชนิด OPP/MCPP ทั้งนี้เนื่องมาจากบรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/MCPP มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำดีกว่า (ตารางที่ 3.1) โดยทั่วไป บรรจุภัณฑ์ที่ประกอบด้วยชั้น metalized จะต้านการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี (Fellows, 2000)

เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่บรรจุห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/ CPP เปรียบเทียบกับตัวอย่างเม็ดเปลือย พบว่า ตัวอย่างในห่อฟิล์มชนิดนี้มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักและการเกิดขึ้นผลึกน้อยกว่าและช้ากว่าตัวอย่างเม็ดเปลือย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากบรรจุภัณฑ์ที่ช่วยกันความชื้น และชะลอการดูดความชื้นของตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างที่บรรจุใน PET/ CPP ผลการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักและการเกิดขึ้นผลึกในตัวอย่างสูตรที่ผสมและไม่ผสม HSH กลับมีระดับที่ใกล้เคียงกัน แสดงถึงผลของ HSH ในการเพิ่มความหนืดและชะลอการเกิดขึ้นผลึกที่ยังไม่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการผสม HSH ในปริมาณที่น้อย (10%) อย่างไรก็ตาม การเติม HSH ในอัตราส่วนที่สูงกว่านี้อาจเกิดผลเสียคือลดค่า T_g และเพิ่มความสามารถในการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในหัวข้อ 4.2 จึงเป็นข้อจำกัดของการใช้ HSH เพื่อเป็น doctoring agent ในผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาล

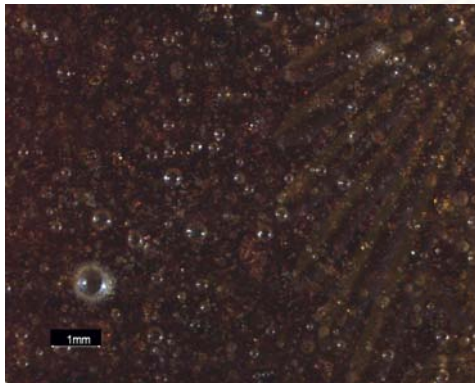
หากพิจารณาข้อมูลการเกิดขึ้นผลึกบนผิวตัวอย่าง เป็นเกณฑ์สำคัญที่ใช้ประมาณอายุการเก็บรักษาตัวอย่างในห่อฟิล์มทั้ง 2 ชนิด พบว่า ลูกกวาดเนื้อแข็งที่บรรจุห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/ CPP มีอายุการเก็บรักษาสั้นกว่า และเมื่อเก็บในภาวะเร่ง คือ ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 84% จะปรากฏคราบผลึกสีขาวที่ชัดเจนบนผิวตัวอย่างที่เวลา 1 เดือนของการเก็บรักษา (รูปที่ 4.10) ส่วนลูกกวาดเนื้อแข็งที่บรรจุห่อฟิล์มพลาสติกชนิด OPP/MCPP จะมีอายุการเก็บอย่างน้อย 3 เดือน แม้อยู่ในภาวะเร่งดังกล่าว ดังนั้นลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรผสม HSH 10% ที่พัฒนาได้นี้จะมีเสถียรภาพที่ดีเท่าเทียมกับสูตรควบคุม (ไม่ผสม HSH) เมื่อเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ชนิด OPP/MCPP



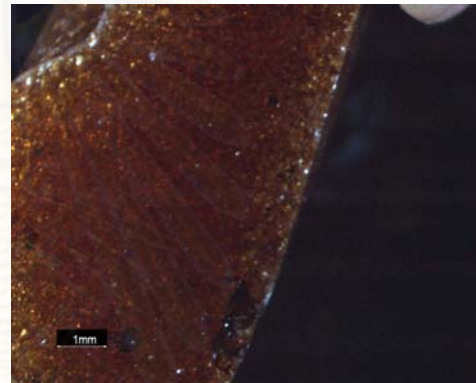
(a)



(b)



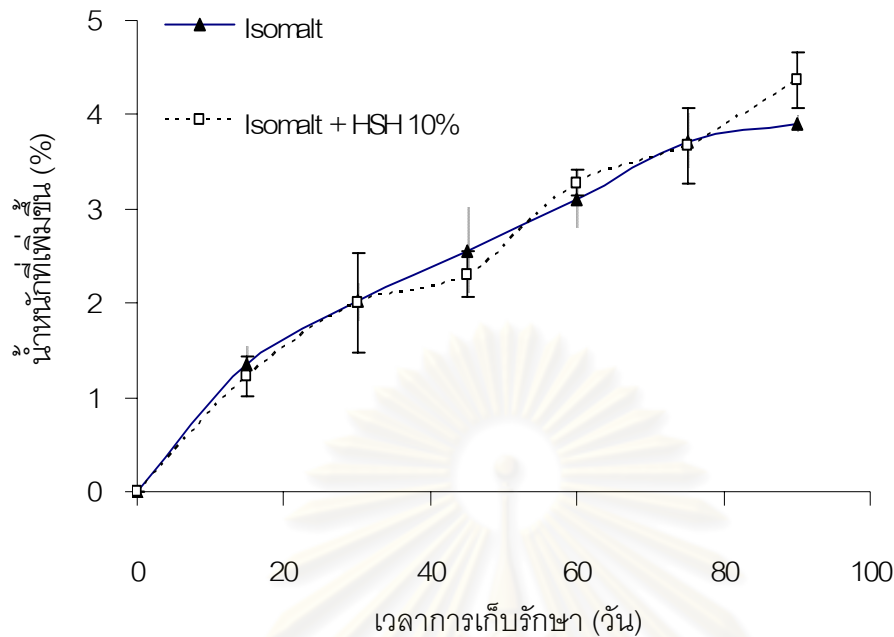
(c)



(d)

รูปที่ 4.7 ชั้นผลึกบนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด OPP/MCPP (บรรจุ 1 เม็ด ต่อซอง) สูตรไม่ผสม HSH (isomalt) (a, b) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) (c, d) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) ที่ 90 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

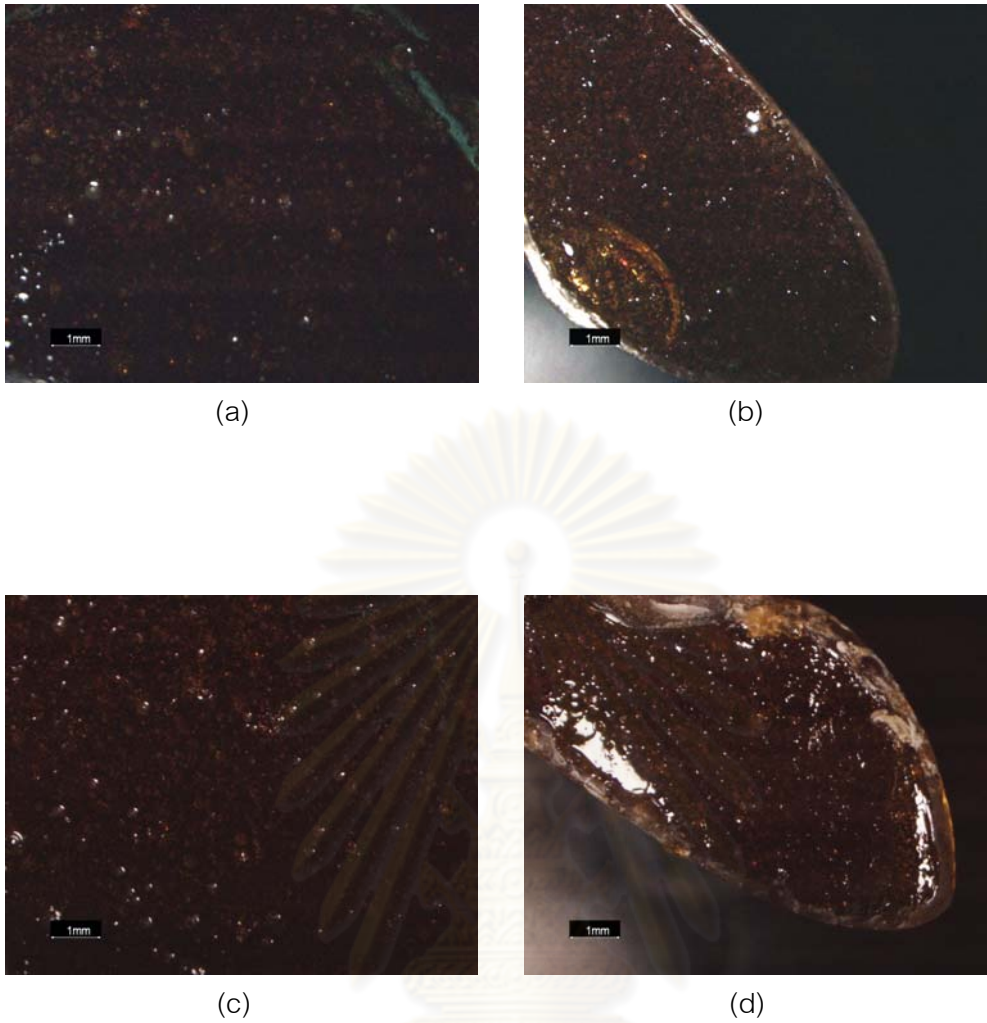


รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/PP (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) สูตรไม่ผสม HSH (isomalt) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) Error bar แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.7 ความหนาของชั้นผลึกบนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/PP (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) สูตรไม่ผสม HSH (isomalt) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$)

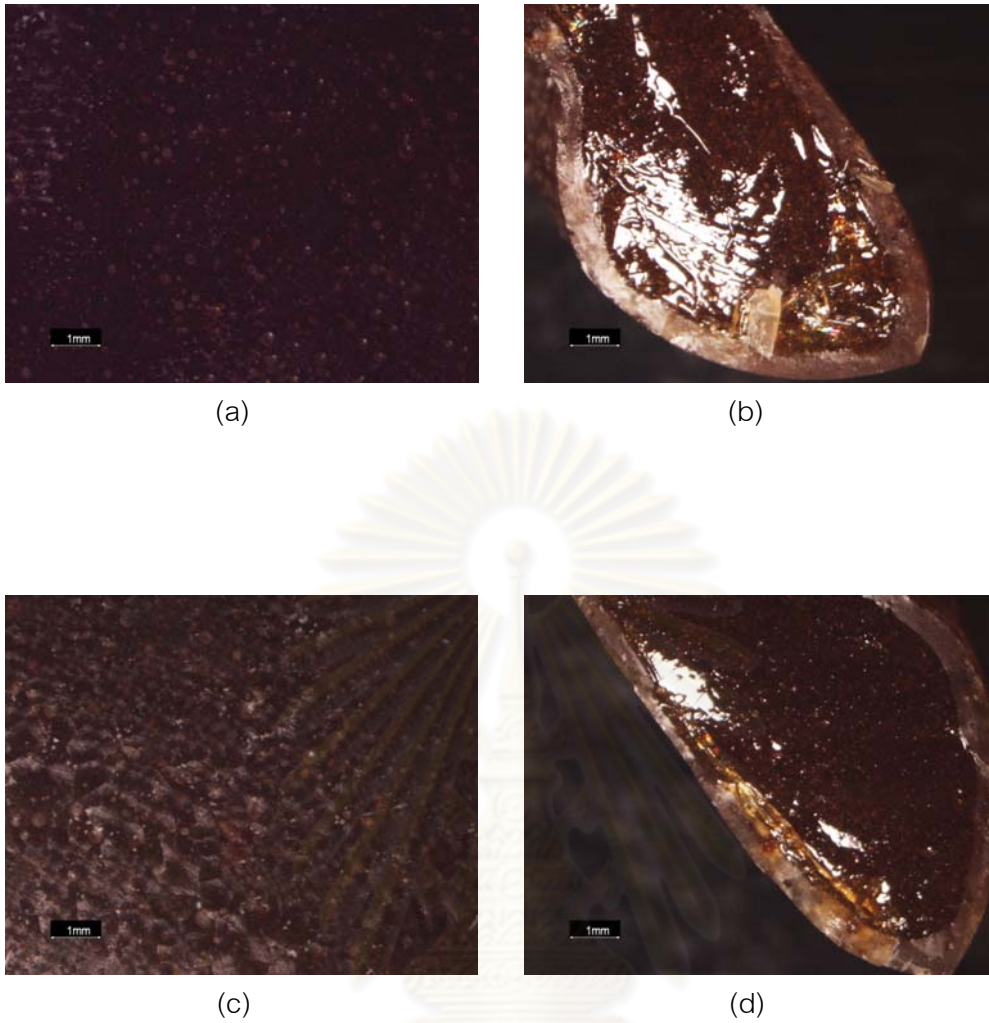
วันที่	ความหนาของชั้นผลึกบนผิวของตัวอย่าง (มม.)	
	isomalt	isomalt + HSH 10%
15	0.16 ± 0.07	0.30 ± 0.03
30	0.39 ± 0.03	0.43 ± 0.03
45	0.62 ± 0.03	1.67 ± 0.05
60	0.80 ± 0.07	1.08 ± 0.09
75	1.15 ± 0.02	1.20 ± 0.05
90	1.36 ± 0.09	1.57 ± 0.10

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ



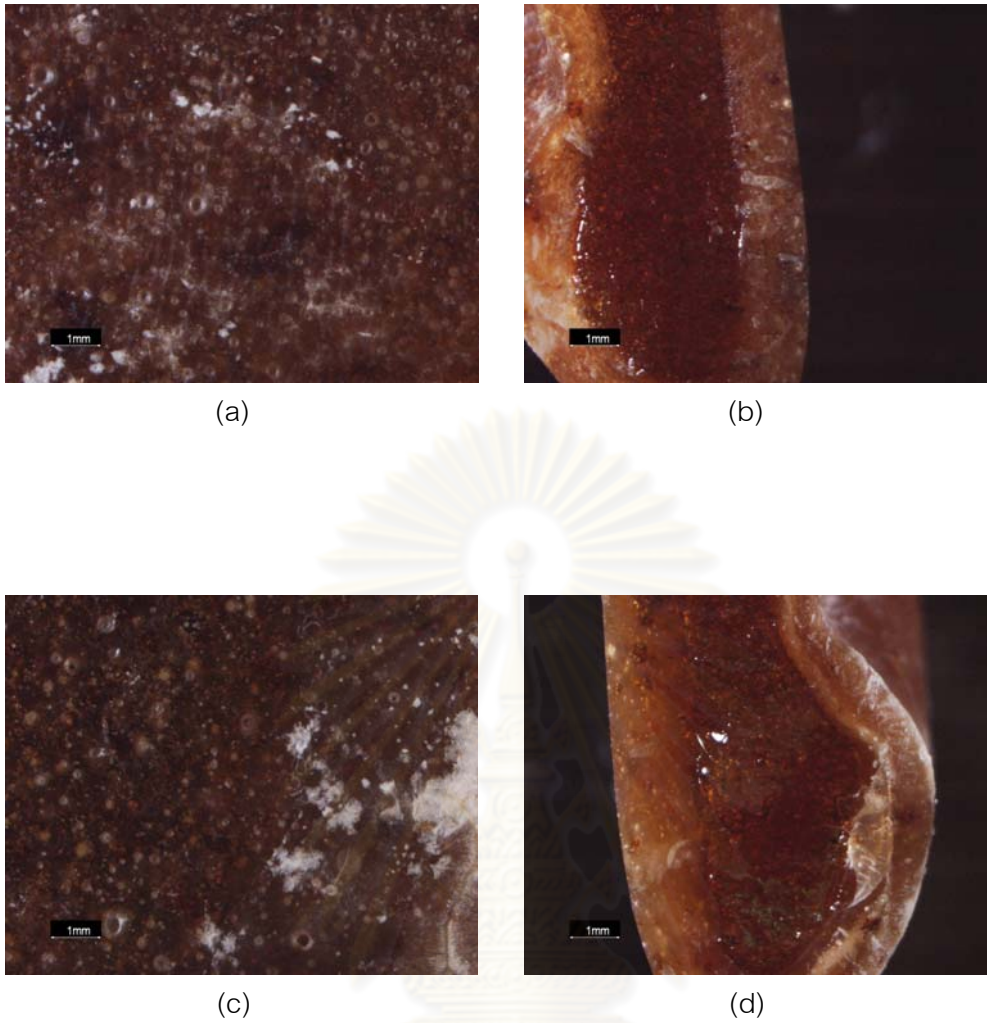
รูปที่ 4.9 ชั้นผลึกบนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/CPP (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) สูตรไม่ผสม HSH (isomalt) (a, b) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) (c, d) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) ที่ 15 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 ชั้นผลึกบนผิวลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/PP (บรรจุ 1 เม็ด ต่อซอง) สูตรไม่ผสม HSH (isomalt) (a, b) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) (c, d) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) ที่ 30 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ชั้นผลิตภัณฑ์ผิวลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/CPP (บรรจุ 1 เม็ด ต่อซอง) สูตรไม่ผสม HSH (isomalt) (a, b) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) (c, d) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) ที่ 90 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 สมบัติเด่นของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลสูตรทนอุณหภูมิสูงที่พัฒนาขึ้น

จากการศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้ พบว่า การเติม HSH 10% ไม่สามารถแสดงผลของ doctoring agent ในการชะลอการตกผลึกได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการเพิ่มความหนืดของ HSH ยังไม่สามารถต้านผลจากการดูดความชื้นของตัวอย่าง จึงต้องใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำได้สูง เช่น OPP/MCPP ร่วมด้วยจึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์สูตรผสม HSH 10% มีเสถียรภาพเท่าเทียมสูตรปกติเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30°C

แม้ว่างานวิจัยนี้ไม่ได้ทดลองเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง (>30°C) จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ส่วนผสมอื่นๆ ที่เติมเพื่อปรุงแต่งกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีผลต่อค่า T_g ของตัวอย่าง ดังนั้นจึงอาจใช้ข้อมูลค่า T_g ของระบบอสมมูลผสม (isomalt 90%+HSH 10%, ตารางที่ 4.4) ในการประมาณค่า T_g ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ เมื่อพิจารณาค่า T_g ของระบบดังกล่าวร่วมกับผลจากการศึกษาเสถียรภาพข้างต้น พบว่า ผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลสูตรที่พัฒนาได้ (ที่ความชื้น 2%) จะคงสถานะแก้วที่เสถียรได้ที่อุณหภูมิสูงที่สุดถึงประมาณ 46°C ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงบรรลุวัตถุประสงค์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งไร้น้ำตาลสูตรทนอุณหภูมิสูง กล่าวคือ การทดแทนไอโซมอลต์ด้วย HSH 10% ร่วมกับการใช้บรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันความชื้นได้ดี (OPP/MCPP) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรไร้น้ำตาลที่คงเสถียรภาพภายใต้การเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงถึง 46°C ที่ความชื้นตัวอย่างประมาณ 2% นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ช่วยลดต้นทุนการผลิตเนื่องจาก HSH มีราคาถูกกว่าไอโซมอลต์ประมาณ 4 เท่า ดังนั้นการเติม HSH 10% น่าจะช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ประมาณ 7.5% เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติม HSH (ใช้ไอโซมอลต์เพียงอย่างเดียว)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการพิจารณาเสถียรภาพของตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็งทางการค้า พบว่า ตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรใช้น้ำตาลและกลูโคสซีรัปทางการค้ามีความชื้น 1 - 3.5% และมีค่า T_g 44 - 60°C ส่วนตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็งสูตรใช้น้ำตาลทางการค้า แม้จะมีความชื้นใกล้เคียงกัน (1.8-2.5%) แต่มีค่า T_g ต่ำ (33-45°C) กว่าตัวอย่างสูตรใช้น้ำตาลและกลูโคสซีรัป และอาจเกิด Glass transition ที่อุณหภูมิห้องของประเทศในเขตร้อนดังเช่นประเทศไทยได้

เมื่อศึกษาผลขององค์ประกอบต่อค่า T_g และ Moisture sorption isotherm ของตัวอย่างระบบอสังฐานผสม พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของน้ำตาลแอลกอฮอล์กลุ่ม HSH ทำให้ค่า T_g ของระบบลดลง แต่สามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_g ของตัวอย่างระบบอสังฐานผสมและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบแห่งในระบบโดยใช้สมการของ Gordon-Taylor ได้นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ HSH ทำให้ระบบดูดความชื้นมากขึ้น ทั้งนี้สามารถทำนาย adsorption isotherm ของระบบอสังฐานโดยใช้สมการ GAB ได้ อย่างไรก็ดี ระบบที่ประกอบด้วย HSH 10% มีค่า T_g และ adsorption isotherm ที่ใกล้เคียงกับระบบของไอโซมอลท์บริสุทธิ์ (T_g สูงและดูดความชื้นได้น้อย) เมื่อพิจารณาผลที่มีต่อค่า T_g และ sorption isotherm ร่วมกันแล้ว จึงเลือกระบบที่ดีที่สุดที่ให้ค่า T_g สูงและดูดความชื้นได้น้อย ได้แก่ ระบบที่ประกอบด้วย HSH 10% (w/w) ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งผสมสารสกัดจากพืช โดยแปรชนิดของสารสกัดจากพืชเป็น 2 ชนิด จึงได้ผลิตภัณฑ์ 2 สูตร นำไปทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภค พบว่า ลูกกวาดเนื้อแข็งทั้ง 2 สูตรได้รับคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จึงเลือกสูตรที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากสูตรที่ให้ต้นทุนของวัตถุดิบที่ต่ำกว่า

การศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่พัฒนาขึ้นนี้ ทำโดยเก็บตัวอย่างเม็ดเปลือก และบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติก 2 ชนิด ได้แก่ OPP/MCPP และ PET/ CPP (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) ในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^\circ\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$) พบว่าตัวอย่างเม็ดเปลือกสูตรผสม HSH 10% มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากกว่า (ดูดความชื้นได้ดีกว่า) และเกิดผลึกบนผิวตัวอย่างได้เร็วกว่าและมากกว่าตัวอย่างสูตรไม่ผสม HSH ส่วนตัวอย่างทั้งสองสูตร ที่เก็บในฟิล์ม PET/ CPP มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและเกิดชั้นผลึกน้อยกว่าตัวอย่างเม็ดเปลือก แต่ยังคงเกิดคราบผลึกสีขาวชัดเจนหลังเก็บ 30 วัน และพบว่าตัวอย่างสูตรผสม HSH 10% ที่บรรจุในฟิล์มชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและเกิดชั้นผลึกบนผิวตัวอย่างในระดับที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างสูตรไม่ผสม

HSH ในขณะที่ตัวอย่างทั้งสองสูตรที่บรรจุในฟิล์มชนิด OPP/MCPP มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักไม่เกิน 0.3% และไม่พบการเกิดชั้นผลึกตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 3 เดือน ดังนั้น การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (ความชื้น) ได้ดีดังเช่น ฟิล์มชนิด OPP/MCPP จะส่งผลให้ตัวอย่างผสม HSH 10% ที่พัฒนาได้ มีเสถียรภาพที่ดีเทียบเท่าสูตรไม่ผสม HSH และมีอายุการเก็บรักษาอย่างน้อย 3 เดือน ที่อุณหภูมิห้องภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูง (84%) และผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้น 2% สามารถคงสถานะแก้วที่เสถียรได้ที่อุณหภูมิสูงสุดถึงประมาณ 46°C

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะเร่งได้แก่ อุณหภูมิ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$ (ภาวะเร่งโดยพิจารณาจากความชื้นสัมพัทธ์เป็นหลัก) เพียงภาวะเดียว ทำให้ไม่สามารถประเมินอายุการเก็บรักษาที่แท้จริงของผลิตภัณฑ์ได้ จึงควรศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะปกติ หรือภาวะเร่งที่อุณหภูมิสูง ($>30^{\circ}\text{C}$) มากกว่าหนึ่งอุณหภูมิด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลอายุการเก็บที่แท้จริง หรืออาจศึกษาผลของ doctoring agent ชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีข้อดีทั้งในด้านเสถียรภาพสูงและต้นทุนต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เป็นธิดา มณีโชติ พรพรรณ หอมขจร และพรพิมล ทองปลอด. 2550. เส้นความชื้นซอร์พชันไอโซเทอมของถั่วแมคคาเดเมียที่ปลูกในประเทศไทย. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุวรรณ สุภิมารส. 2543. เทคโนโลยีการผลิตลูกกวาดและช็อกโกแลต. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิวาพร ศิวเวชช. 2529. วัตถุดิบอาหาร. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2530. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ลูกกวาด (มอก.696-2530). กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

Anderson, R. B. 1946. Modification of the B.E.T equation. Journal of the American Chemical Society 68 : 686-691.

A.O.A.C. 1995. Official Methods of Analysis. 16th ed. Washington D.C.: The Association of the Official Analytical Chemists.

ASTM. 2010. ASTM D3985-02 Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor. West Conshohocken: ASTM International.

Al-Muhtaseb A. H., McMinn W. A. M., and Magee T. R. A. 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. Transactions of the Institute of Chemical Engineer, Part B 80 : 118-128.

Bhadeshia, H. K. D. H. 2007. Differential scanning calorimetry [Online]. Available from: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2002/Thermal2.pdf> [2010, January 18]

- Brunauer S., Deming L. S., Deming W. E., and Troller E. 1940. On the theory of Van der Waals adsorption of gases. Journal of the American Chemical Society 62 : 1723-1732.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., and Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. Journal of the American Chemical Society 60 : 309.
- de Boer, J. H. 1953. The Dynamical Character of Adsorption. Oxford : Clarendon Press.
- Eberhardt, L. 2001. Hydrogenated starch hydrolysate, In N. A. Nabors, L. O (eds), Alternative Sweeteners, pp. 255-264. New York: Marcel Dekker.
- Fellow, P. 2000. Food Processing Technology. Washington D. C. : Woodhead publishing.
- Gabarra, P., and Hartel, R. W. 1998. Corn syrup solids and their saccharide fractions affect crystallization of amorphous sucrose. Journal of Food Science 63(3) : 523-528.
- Gordon, M., and Taylor, J. S. 1952. Ideal copolymers and the second order transitions of synthetic rubbers I Non-crystalline copolymers. Journal of Applied Chemistry 2(9) : 493-500.
- Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry 81A : 89-96.
- Guggenheim, E. A. 1966. Application of Statistical Mechanics. Oxford : Clarendon Press.
- Hadjikinova, M., Menkov, N., and Hadjikinov, D. 2003. Sorption characteristics of dietary hard candy. Journal of Food Science 21(3) : 97-99.
- Hartel, R. W. 1987. Sugar crystallization in confectionery products. The Manufacturing Confectioner 67(10) : 59-65.
- ISO. 2010. ISO 15106-1:2003 Determination of Water Vapour Transmission Rate. Geneva: International Organization for Standardization.
- Johari, G. P., Hallbrucker, A., and Mayer, E. 1987. The glass-liquid transition of hypersequenced water. Nature 330 : 552-553.
- Karel, M., 1985. Effects of water activity and water content on mobility of food components, and their effects on phase transition in food systems, In D.

- Simatos, and J. L. Multon (eds), Properties of water in foods, pp. 153-169, The Netherlands: Martinus Nijhoff.
- Katz, E.E., and Labuza, T. P. 1981. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products. Journal of Food Science 46(2) : 403-409.
- Labuza, T. P. 1968. Sorption phenomena in foods. Food Technology 22 : 15-24.
- Levine, L., and Slade, L. 1988. Food Structure - Its Creation and Evaluation. London : Butterworths.
- Liu, Y., Bhandari, B., and Zhou, W. 2006. Glass transition and enthalpy relaxation of amorphous food saccharides. Journal of Agricultural and Food Chemistry 54(16) : 5701-5717.
- Liu, Y., Bhandari, B., and Zhou, W. 2007. Study of glass transition and enthalpy relaxation of mixtures of amorphous sucrose and amorphous tapioca starch syrup solid by differential scanning calorimetry (DSC). Journal of Food Engineering 81 : 599-610.
- Mitchell, H. 2006. Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology. Oxford : Blackwell publishing.
- McFetridge, J., Rades, T., and Lim, M. 2004. Influence of hydrogenated starch hydrolysates on the glass transition and crystallization of sugar alcohols. Food Research International 37(5) : 409-415.
- Nowakowski C. M., and Hartel R. 2002. Moisture sorption of amorphous sugar products. Journal of food science 67(4) : 1419-1425.
- Peleg, M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. Journal of Food Science 53 : 1216-1217.
- PerkinElmer, 2001. PYRIS Diamond DSC [Online]. Available from: http://las.perkinelmer.co.uk/Content/relatedmaterials/brochures/bro_pyrisdiamonddsc.pdf [2010, June 8]
- Raudonus, J., Bernard, J., Janssen, H., Kowalczyk, J., and Carle, R. 2000. Effect of oligomeric or polymeric additives on glass transition, viscosity and crystallization of amorphous isomalt. Food Research International 33(1) : 41-51.

- Roos, Y. 1993. Melting and glass transition of low molecular weight carbohydrates. Carbohydrate Research 238 : 39-48.
- Roos, Y. 1995a. Characterization of food polymers using state diagrams. Journal of Food Engineering 24(3) : 339-360.
- Roos, Y. 1995b. Phase Transitions in Foods. San diego : Academic press.
- Roos, Y. 2001. Water activity and plasticization, In N. A. Michael Eskin, and S. Robinson (eds), Food Shelf Life Stability, Boca Raton: CRC Press.
- Roos, Y., and Karel, M. 1990. Differential scanning calorimetry study of phase transitions affecting the quality of dehydrated materials. Biotechnology Progress 6(2) : 159-163.
- Roos, Y., and Karel, M. 1991. Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. Journal of Food Science 56(1) : 38–43.
- Slade, L., and Levine, H. 1991. Beyond water activity – recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. Food Science and Nutrition 30(2-3) : 115–360.
- Timmermann, E. O. Chirife, J. and Iglesias, H. A. 2001. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB. Journal of Food Engineering 48 : 19-31.
- Tromp, R. H., Parker, R., and Ring, S. G. 1997. Water diffusion in glasses of carbohydrates. Carbohydrate Research 303(2) : 199-205
- White, G. W., and Cakebread, S. H. 1966. The glassy state in certain sugar-containing food products. Journal of Food Technology 1(1) : 73-82.
- Yu, L. 2001. Amorphous pharmaceutical solids: preparation, characterization, and stabilization. Advanced Drug Delivery Reviews 48(1) : 27–42.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่างลูกกวาดเนื้อแข็งด้วยเครื่อง Karl-Fischer coulometric titrator

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. Karl-Fischer coulometric titrator (Metrohm, 795 KFT Titrino และ 703 Ti Stand, Switzerland)
2. เครื่องตวงตุนิยม 4 ตำแหน่ง (Ohaus, model Explorer, Switzerland)

สารเคมี

1. Hydranal[®] – composite 5 (อัตราส่วน reagent (ml) ต่อ น้ำ (mg) ในการทำปฏิกิริยาเป็น 1:5) (Sigma-aldrich, USA)
2. Methanol, AR grade (Lab scan, Ireland)
3. Formamide, AR grade (Unilab, Australia)

วิธีวิเคราะห์

1. การเทียบมาตรฐาน (standardize) ของ reagent
 - 1.1. ผสมตัวทำละลาย คือ methanol และ formamide ตามอัตราส่วนดังนี้
 - 1.1.1. ใช้อัตราส่วน methanol ต่อ formamide เป็น 2:1 สำหรับตัวอย่างที่มีส่วนผสมเป็นน้ำตาลและกลูโคสซีรัป
 - 1.1.2. ใช้อัตราส่วน methanol ต่อ formamide เป็น 1:1 สำหรับตัวอย่างที่มีส่วนผสมเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์แล้วกดปุ่มเติมตัวทำละลายลงในถ้วยวิเคราะห์จน ท่วม electrode
 - 1.2. เลือกวิธีวิเคราะห์ "H₂O Titer"
 - 1.3. กดปุ่ม start เพื่อปรับสภาพของตัวทำละลายในโถวิเคราะห์ (conditioning) กล่าวคือ เป็นขั้นตอนการเติม Karl-Fischer reagent ลงในถ้วยวิเคราะห์ เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับน้ำในตัวทำละลายจนหมด และมี Karl-Fischer reagent มากเกินไปในถ้วยวิเคราะห์ รอจนกระทั่งหน้าจอปรากฏคำว่า drift OK

- 1.4. กดปุ่ม start อีกครั้ง รอจนกระทั่งหน้าจอปรากฏช่องว่างเพื่อบันทึกข้อมูลน้ำหนักน้ำที่จะใช้เทียบมาตรฐาน
- 1.5. ใช้ micro syringe ดูดน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 10 μ l (0.010 mg) ซึ่งน้ำหนักที่แน่นอน เติมลงในถ้วยวิเคราะห์ แล้วบันทึกน้ำหนักของน้ำที่แน่นอนลงในเครื่อง
- 1.6. กดปุ่ม start เพื่อเทียบมาตรฐานของ reagent กล่าวคือ เป็นขั้นตอนการตรวจสอบว่าต้องใช้ reagent ที่มีลิลิตรในการทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำ 1 mg ซึ่งค่านี้ควรใกล้เคียงกับค่าที่ระบุไว้บนฉลาก reagent เช่น Hydranal[®] – composite 5 ควรให้ค่าอัตราส่วน reagent (ml) ต่อ น้ำ (mg) ในการทำปฏิกิริยาประมาณ 1:5 ดังนั้น หากทดสอบด้วยน้ำ 0.010 mg ควรใช้ reagent ในการเทียบมาตรฐานประมาณ 0.002 ml (2 μ l)
2. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในตัวอย่าง
 - 2.1. ผสมตัวทำละลาย คือ methanol และ formamide ตามอัตราส่วนในข้อ 1.1
 - 2.2. กดปุ่มเติมตัวทำละลายลงในถ้วยวิเคราะห์จนท่วม electrode
 - 2.3. เลือกวิธีวิเคราะห์ “KF”
 - 2.4. กดปุ่ม start เพื่อปรับสภาพของตัวทำละลายในโถวิเคราะห์
 - 2.5. กดปุ่ม start อีกครั้ง รอจนกระทั่งหน้าจอปรากฏช่องว่างเพื่อให้บันทึกข้อมูลน้ำหนักตัวอย่างที่จะวิเคราะห์
 - 2.6. ชั่งตัวอย่าง 0.1 - 0.5 g (สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งให้บดด้วยเครื่องบดไฟฟ้าก่อน) ใส่ตัวอย่างในถ้วยวิเคราะห์ รอจนกระทั่งตัวอย่างละลายหมด
 - 2.7. บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะไตเตรทหาปริมาณน้ำในตัวอย่าง
 - 2.8. รอจนกระทั่งหน้าจอปรากฏคำว่า OK แล้วจึงกดปุ่ม stop เพื่อให้เครื่องหยุดการไตเตรท โดยเครื่องจะรายงานปริมาณความชื้น (% โดยน้ำหนักเปียก) โดยอัตโนมัติ

ก.2 การหาค่า T_g ของตัวอย่างระบบอสัณฐานผสมและลูกกวาดเนื้อแข็งด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ดัดแปลงจากวิธีของ Raudonus และคณะ (2000)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Differential scanning calorimeter (Perkin-Elmer, model Diamond DSC, USA) ต่อเข้ากับ intracooler unit (Perkin-Elmer, model 2P, USA) ใช้แก๊ส

- ไนโตรเจน (99.99%) เป็น purge gas ต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ และ Pyris™ operation software version 8.0
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Ohaus, model Explorer, Switzerland)
 3. Aluminium volatile sample pan (Perkin-Elmer, kit number 0219-0062, USA)
 4. เครื่องบดไฟฟ้า (Panasonic, model MX-795N, ประเทศไทย)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 10 mg (สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งให้บดด้วยเครื่องบดไฟฟ้าก่อน) บรรจุลงใน aluminium volatile sample pan
2. ปิดฝา pan ด้วยเครื่องปิดฝานี้
3. วิเคราะห์ตัวอย่างด้วย DSC โดยให้ความร้อนแก่ pan ตัวอย่าง และ pan อ่างอิง (pan เปล่า) ด้วยอัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ จากอุณหภูมิ $T_g - 30^{\circ}\text{C}$ ถึง $T_g + 30^{\circ}\text{C}$
4. scan ตัวอย่างซ้ำ 2 ครั้ง ใช้ข้อมูลจากการ scan ครั้งที่ 2 เพื่อหาค่า T_g ($^{\circ}\text{C}$) โดยใช้ Pyris™ operation software version 8.0 ในการหาค่า T_g จะใช้เทคนิค half C_p extrapolated ซึ่ง ค่า T_g ที่รายงานคือ ค่า T_g midpoint

ก.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้นของตัวอย่างทางการค้าและตัวอย่างระบบ อสังฐานผสม ดัดแปลงจากวิธีของ Hadjikinova และคณะ (2003)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. โถบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ
3. เครื่องบดไฟฟ้า (Panasonic, model MX-795N, ประเทศไทย)
4. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Ohaus, model Explorer, Switzerland)
5. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, WTB binder, model 7200 TUTTLINGEN Type E53 number 89353, Germany)

สารเคมี

1. เกลือ 8 ชนิดได้แก่ LiCl , MgCl_2 , K_2CO_3 , NaBr , NaNO_2 , NaCl , KCl และ K_2NO_3 (QReC™, New Zealand)

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายเกลืออิมิตัวในโถแก้ว โดยผสมเกลือเข้ากับน้ำตามอัตราส่วนในตารางที่ ก.1 ทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล (สารละลายเกลืออิมิตัวสมบูรณ์) ซึ่งสังเกตได้จากผลึกเกลือที่เหลืออยู่ไม่สามารถละลายเพิ่มได้อีก และมีระดับน้ำเกลือใสสูงเหนือผลึกประมาณ 0.5 - 1.0 cm
2. ชั่งตัวอย่าง 0.5 ± 0.1 g ใส่ในจานแก้วที่อบแห้งและทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปวางไว้ในโถบรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวทั้ง 8 ชนิด ที่ให้ค่า a_w คงที่ในช่วง 0.11 - 0.92 โดยประมาณ (ตารางที่ ก.1)
3. เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 ± 2°C จนระบบเข้าสู่สมดุล (ไม่เกิน 3 สัปดาห์)
4. หาค่าความชื้นของตัวอย่างตามวิธีของ AOAC (1995) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3. แล้วจึงอบตัวอย่างในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C จนมีน้ำหนักคงที่ หากเป็นตัวอย่างลูกกวาดสูตรน้ำตาลใช้เวลาอบประมาณ 8 ชั่วโมง และหากเป็นตัวอย่างลูกกวาดหรือระบบบอส์พื้นฐานสูตรน้ำตาลแอลกอฮอล์ใช้เวลาอบประมาณ 16 ชั่วโมง คำนวณความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างโดยรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ตามสมการ ก.1

$$\text{ปริมาณความชื้น (\% โดยน้ำหนักแห้ง)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}} \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนเกลือต่อน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ

เกลือ	อัตราส่วนเกลือ (g) : น้ำ (ml)	a_w ที่ 30°C
LiCl	150:110	0.11
MgCl ₂	200:60	0.32
K ₂ CO ₃	200:130	0.43
NaBr	200:130	0.56
NaNO ₂	200:80	0.64
NaCl	200:150	0.75
KCl	200:170	0.84
K ₂ NO ₃	200:100	0.92

ค่าอัตราส่วนเกลือต่อน้ำ อ้างอิงจากเป็นธิดา มณีโชติ พรพรรณ หอมขจร และพรพิมล ทองปลอด (2550) ส่วนค่า a_w อ้างอิงจาก Greenspan (1977)

ก.4 การวัดความหนาของชั้นผลึกบนผิวของลูกกวาดเนื้อแข็ง

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. มีดหั่นตัวอย่าง
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Ohaus, model Explorer, Switzerland)
3. Stereomicroscope (SMZ-1000, Nikon Instrument, USA) ซึ่งประกอบเข้ากับเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) รุ่น Plan Apo 1X WD-70 ตัวกล้องต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมถ่ายรูป Nikon ACT-1 version 2.63 (Nikon Instrument, USA) และโปรแกรมวิเคราะห์ UTHSCSA Image tool for windows version 3.0 (Department of Dental Diagnostic Science, University of Texas Health Science Center, San Antonio, TX)

วิธีวิเคราะห์

1. แบ่งตัวอย่างเป็นสองส่วนโดยหั่นตัวอย่างด้วยมีดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ด นำตัวอย่างที่แบ่งครึ่งแล้วไปวางบนช่องว่างตัวอย่าง
2. ปรับกำลังขยายส่วน intermediate magnification เป็น 0.8X
3. เปิดโปรแกรม Nikon ACT-1 version 2.63 ปรับค่าพารามิเตอร์ ในโปรแกรมโดยใช้คำสั่ง image ให้มีค่าดังต่อไปนี้

- Optical
 - Objective lens 1X
 - Intermediate magnification 0.8X
- Mode
 - Quick 3: 1280 × 1024
- File
 - Format jpeg (normal)
- Sensitivity
 - High

4. บันทึกภาพของชั้นผลึกบนผิวตัวอย่างโดยใช้คำสั่ง Save
5. หาความหนาของชั้นผลึกโดยใช้โปรแกรม UTHSCSA Image tool for windows version 3.0 ใช้คำสั่ง analysis → distance
6. สำหรับตัวอย่างแต่ละเม็ด บันทึกภาพตัดขวางของตัวอย่างที่แบ่งครึ่งแล้วทั้ง 2 ซีก ในแต่ละซีกหาความหนาของชั้นผลึกที่ตำแหน่งขอบซ้าย ขวา และกึ่งกลาง รวม 3 ตำแหน่ง จึงได้ค่าการวัดซ้ำของค่าความหนา 6 ค่าต่อตัวอย่าง 1 เม็ด จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาหาเป็นค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 1 เม็ด (1 ซ้ำ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลองเพิ่มเติม

ข.1 ข้อมูลค่า T_g ของระบบอสัณฐานที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบแห้งในระบบต่างกัน สำหรับสร้างกราฟตามสมการ Gordon-Taylor

ตารางที่ ข.1.1 ค่า T_g ของระบบอสัณฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์บริสุทธิ์เมื่อมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบแห้งในระบบต่างกัน

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบแห้ง (%)	T_g (°C)
86.93	-8.23
86.98	-9.84
87.91	-6.24
88.05	-4.86
88.08	-4.04
90.68	8.44
91.41	10.43
91.60	13.91
91.69	16.09
91.69	13.60
94.75	30.35
94.80	30.93
94.90	29.94
98.32	50.34

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบแห้งคำนวณจากความชื้นที่วัดได้จากเทคนิค Karl-Fisher titrator ตามสูตร

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบแห้ง (%) = $100 - \text{ปริมาณความชื้น (\% โดยน้ำหนักเปียก)}$

ตารางที่ ข.1.2 ค่า T_g ของระบบออสตราฐานไอโซมอลท์ผสม HSH ที่ประกอบด้วย HSH 10%
เมื่อมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบต่างกัน

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่ง (%)	T_g (°C)
89.74	-0.78
89.81	-1.16
90.00	0.94
91.66	11.24
91.69	10.70
91.87	11.16
93.22	22.79
93.23	21.18
93.40	22.50
96.75	37.67
96.85	39.55
96.92	36.00
98.37	48.85
98.48	48.49

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งคำนวณจากความชื้นที่วัดได้จากเทคนิค
Karl-Fisher titrator ตามสูตร

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่ง (%) = $100 - \text{ปริมาณความชื้น (\% โดยน้ำหนักเปียก)}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1.3 ค่า T_g ของระบบอสัณฐานไอโซมอลท์ผสม HSH ที่ประกอบด้วย HSH 20%
เมื่อมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบต่างกัน

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่ง (%)	T_g (°C)
90.68	3.68
90.96	2.95
91.11	2.34
91.76	5.38
92.04	10.07
93.08	17.62
93.40	16.06
93.45	18.68
95.45	25.43
95.68	27.82
95.99	28.91
98.08	41.11
98.09	41.48
98.14	42.70

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งคำนวณจากความชื้นที่วัดได้จากเทคนิค Karl-Fisher titrator ตามสูตร

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่ง (%) = $100 - \text{ปริมาณความชื้น (\% โดยน้ำหนักเปียก)}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1.4 ค่า T_g ของระบบอสังฐานที่ประกอบด้วย HSH บริสุทธิ์ เมื่อมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งในระบบต่างกัน

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่ง (%)	T_g (°C)
88.15	-13.3
88.28	-12.13
88.82	-10.91
89.15	-13.3
92.35	2.18
92.62	1.32
93.01	3.16
93.02	4.17
95.21	10.81
95.23	9.02
95.37	12.76
98.43	38.08
98.51	37.02
98.76	38.12

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่งคำนวณจากความชื้นที่วัดได้จากเทคนิค Karl-Fisher titrator ตามสูตร

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนประกอบหนึ่ง (%) = $100 - \text{ปริมาณความชื้น (\%โดยน้ำหนักเปียก)}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 Moisture sorption isotherm ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สูตรปกติ (SC 4) และสูตรไร้น้ำตาล (SFC 1)

ตารางที่ ข.2.1 ความชื้นที่สมดุลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สูตรปกติ (SC 4) ที่ค่า a_w ต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^\circ\text{C}$

a_w	ความชื้นที่สมดุล (% โดยน้ำหนักเปียก)
0.11	2.88 ± 0.92
0.32	4.75 ± 0.24
0.43	4.04 ± 0.03
0.56	5.61 ± 0.39
0.73	12.37 ± 0.40
0.75	16.52 ± 1.41
0.84	39.92 ± 2.02
0.92	78.15 ± 1.42

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ ข.2.2 ความชื้นที่สมดุลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลูกกวาดเนื้อแข็งที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สูตรไร้น้ำตาล (SFC 1) ที่ค่า a_w ต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^\circ\text{C}$

a_w	ความชื้นที่สมดุล (% โดยน้ำหนักเปียก)
0.11	1.81 ± 0.13
0.32	4.68 ± 0.38
0.43	6.44 ± 0.28
0.56	7.85 ± 0.36
0.73	8.93 ± 0.15
0.75	9.40 ± 0.43
0.84	15.61 ± 1.24
0.92	56.95 ± 0.68

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ ข.2.3 ความชื้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบบดสัณฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์
ที่ค่า a_w ต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^\circ\text{C}$

a_w	ความชื้นที่สมดุล (% โดยน้ำหนักเปียก)
0.11	0.95 ± 0.67
0.32	3.33 ± 0.12
0.43	6.48 ± 0.18
0.56	7.56 ± 0.12
0.73	8.58 ± 0.40
0.75	8.85 ± 1.29
0.84	17.66 ± 0.47
0.92	56.51 ± 0.84

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ ข.2.4 ความชื้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบบดสัณฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์ผสม
HSH ที่ประกอบด้วย HSH 10% ที่ค่า a_w ต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^\circ\text{C}$

a_w	ความชื้นที่สมดุล (% โดยน้ำหนักเปียก)
0.11	0.98 ± 0.12
0.32	3.37 ± 0.76
0.43	6.66 ± 0.52
0.56	7.94 ± 0.01
0.73	9.88 ± 1.95
0.75	11.96 ± 0.01
0.84	19.36 ± 0.76
0.92	61.37 ± 1.20

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ ข.2.5 ความชื้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบอสังฐานที่ประกอบด้วยไอโซมอลท์ผสม HSH ที่ประกอบด้วย HSH 20% ที่ค่า a_w ต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^\circ\text{C}$

a_w	ความชื้นที่สมดุล (% โดยน้ำหนักเปียก)
0.11	1.34 ± 0.63
0.32	3.96 ± 0.56
0.43	6.54 ± 0.59
0.56	9.25 ± 0.49
0.73	13.89 ± 1.95
0.75	16.44 ± 1.49
0.84	30.73 ± 0.78
0.92	65.22 ± 0.57

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ ข.2.6 ความชื้นที่สมดุลของตัวอย่างระบบอสังฐานที่ประกอบด้วย HSH ที่ค่า a_w ต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^\circ\text{C}$

a_w	ความชื้นที่สมดุล (% โดยน้ำหนักเปียก)
0.11	1.56 ± 0.04
0.32	4.19 ± 0.31
0.43	6.82 ± 0.28
0.56	12.65 ± 0.17
0.73	21.58 ± 1.97
0.75	27.23 ± 1.48
0.84	48.07 ± 0.86
0.92	75.73 ± 1.57

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ข.3 การศึกษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ในภาวะเร่ง

ตารางที่ ข.3.1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของลูกกวาดเนื้อแข็งเม็ดเปลือยสูตรไม่ผสม HSH และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$)

เวลา (วัน)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%)	
	Isomalt	Isomalt + HSH 10%
0	0	0
2	2.59 ± 0.23	4.03 ± 0.28
5	3.19 ± 0.19	6.99 ± 0.06
8	4.14 ± 0.10	9.67 ± 0.22
12	6.54 ± 0.17	11.43 ± 0.23
15	7.38 ± 0.05	12.46 ± 0.35
20	8.02 ± 0.05	13.36 ± 0.24

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ ข.3.2 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของลูกกวาดเนื้อแข็งบรรจุในห่อฟิล์มพลาสติกชนิด PET/CPP (บรรจุ 1 เม็ดต่อซอง) สูตรไม่ผสม HSH (isomalt) และสูตรผสม HSH 10% (isomalt + HSH 10%) เมื่อเก็บรักษาในภาวะเร่ง ($30 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ $84.0 \pm 0.2\%$)

เวลา (วัน)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%)	
	Isomalt	Isomalt + HSH 10%
0	0	0
2	1.36 ± 0.18	1.46 ± 0.25
5	2.02 ± 0.20	2.40 ± 0.63
8	2.56 ± 0.46	2.77 ± 0.29
12	3.10 ± 0.30	3.93 ± 0.17
15	3.72 ± 0.28	4.40 ± 0.48
20	3.90 ± 0.09	5.24 ± 0.36

ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านสีของลูกกวาดเนื้อแข็ง

Source	Type III Sum				
	of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	25.660 ^a	50	0.513	3.469	0.000
Intercept	1204.090	1	1204.090	8137.988	0.000
Formula	0.250	1	0.250	1.690	0.200
Consumer	25.410	49	0.519	3.505	0.000
Error	7.250	49	0.148		
Total	1237.000	100			
Corrected Total	32.910	99			

a. R Squared = 0.780 (Adjusted R Squared = 0.555)

ตารางที่ ง.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านกลิ่นของลูกกวาดเนื้อแข็ง

Source	Type III Sum				
	of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	36.300 ^a	50	0.726	1.294	0.184
Intercept	1149.210	1	1149.210	2048.428	0.000
Formula	0.010	1	0.010	0.018	0.894
Consumer	36.290	49	0.741	1.320	0.167
Error	27.490	49	0.561		
Total	1213.000	100			
Corrected Total	63.790	99			

a. R Squared = 0.569 (Adjusted R Squared = 0.129)

ตารางที่ ง.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านรสชาติโดยรวมของ
ลูกกวาดเนื้อแข็ง

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	51.440 ^a	50	1.029	1.362	0.140
Intercept	1115.560	1	1115.560	1477.363	0.000
Formula	0.000	1	0.000	0.000	1.000
Consumer	51.440	49	1.050	1.390	0.126
Error	37.000	49	0.755		
Total	1204.000	100			
Corrected Total	88.440	99			

a. R Squared = 0.582 (Adjusted R Squared = 0.155)

ตารางที่ ง.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคะแนนความชอบด้านความชอบรวมของ
ลูกกวาดเนื้อแข็ง

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	41.720 ^a	50	0.834	1.582	0.055
Intercept	1142.440	1	1142.440	2166.392	0.000
Formula	0.160	1	0.160	0.303	0.584
Consumer	41.560	49	0.848	1.608	0.050
Error	25.840	49	0.527		
Total	1210.000	100			
Corrected Total	67.560	99			

a. R Squared = 0.618 (Adjusted R Squared = 0.227)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภคมณ ปภาศิริวาทย์ เกิดวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร จากภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2550 และศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551

ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่

ภคมณ ปภาศิริวาทย์ และ ชนิษฐา ธนานวงค์. ผลขององค์ประกอบต่อเสถียรภาพของระบบ อัดพื้นฐานของน้ำตาลแอลกอฮอล์. [CD-ROM] ใน รายงานการสัมมนาวิชาการและการ ประชุมวิชาการ ครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. 8-9 ธันวาคม 2552 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย