

ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดกลาสทรานซิชั่น ระหว่างการอบแห้งกับคุณภาพของอาหารแห้งที่ผลิตได้

สวานิต อิชยาวณิชย์¹

บทคัดย่อ

การเกิดกลาสทรานซิชั่นในอาหารระหว่างการอบแห้ง มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของอาหารอบแห้งที่ผลิตได้ เนื่องจากเมื่ออาหารได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชั่น อาหารจะมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง ซึ่งอาหารที่มีสถานะทั้งสองสถานะนี้จะมีโครงสร้างและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทำให้กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับอาหารระหว่างการอบแห้ง เช่น กระบวนการการสูญเสียน้ำ การหดตัว การตกผลึก การเกาะตัวกัน และการ

เปลี่ยนแปลงทางเคมี สามารถเกิดขึ้นในระดับที่แตกต่างกันออกไปด้วย ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของอาหารอบแห้งที่ผลิตได้ ดังนั้นการทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วกับการเกิดกลาสทรานซิชั่นของอาหารระหว่างการอบแห้ง จะทำให้ผู้ผลิตสามารถควบคุมการอบแห้งให้ได้อาหารที่มีคุณภาพตามที่ต้องการได้

คำสำคัญ: การเกาะตัวกัน การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การหดตัว การอบแห้ง กลาสทรานซิชั่น

¹ อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตเครื่องจักรกลอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี โทรศัพท์ 0-3721-3327 อีเมล: sawanit_aichayawanich@hotmail.com



The Relation between Glass Transition during Drying Process and the Quality of Dried Food Products

Sawanich Aichayanich¹

Abstract

Glass transition process has significant effects on quality of dried food products. When food temperature rises to glass transition temperature, food state changes from glassy to rubbery state. Food in glassy state has different structure and properties with food in rubbery state. Therefore, the changes of food during drying that depend on structure and properties of food including; loss of volatile, shrinkage, crystallization, agglomeration,

and chemical changes are also altered. These changes have significant effects on dried food quality products. Therefore, to control the quality of the dried food products, the relation between these changes and glass transition process of the food material during the drying should be studied.

Keyword: Agglomeration, Chemical Changes, Drying, Glass Transition, Shrinkage

¹ Lecturer, Department of Faculty of Industrial Technology and Management, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Prachinburi Campus, Tel. 0-3721-3327, E-mail: sawanit_aichayawanich@hotmail.com

1. การเกิดกลาสทรานซิชันกับกระบวนการอบแห้งอาหาร

กลาสทรานซิชัน (Glass Transition) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะลำดับที่สอง (Second-order Transition) ของวัสดุ ซึ่งพบได้ในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานหรือกึ่งผลึก (Amorphous or Semi-crystalline Material) เช่น สารโพลีเมอร์ นมผง น้ำตาล แป้ง เป็นต้น โดยเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เรียกว่าอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน (Glass Transition Temperature) ส่วนที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานในวัสดุจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้ว (Solid-like Glassy State) ซึ่งมีลักษณะแข็งเปราะ มีความหนืดประมาณ 10^{12} ปาสคาล.วินาที และมีโครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ แต่เป็นระเบียบน้อยกว่าของแข็ง กลายเป็นสถานะคล้ายยาง (Liquid-like Rubbery State) ซึ่งมีลักษณะเหนียวหนืด โครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ โดยโครงสร้างจะไม่เป็นระเบียบน้อยกว่าของเหลว และมีความหนืดประมาณ 10^6 ถึง 10^8 ปาสคาล.วินาที [1] โดยที่อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของวัสดุ น้ำหนักโมเลกุลของวัสดุ ความชื้นของวัสดุ เป็นต้น [2],[3] โดยเฉพาะความชื้นของวัสดุ หรือปริมาณน้ำในวัสดุ เนื่องจากน้ำสามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งมีหน้าที่ทำให้โครงสร้างของวัสดุนุ่ม และง่ายต่อการเกิดกลาสทรานซิชันมากขึ้น วัสดุที่มีน้ำมากหรือมีความชื้นสูงจึงมีอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันต่ำลง โดยที่อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันที่แปรผันตามความชื้นหรือปริมาณน้ำในวัสดุนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการของ Gordon-Taylor [4] ดังสมการที่ (1) หรือสามารถคำนวณได้จากสมการของ Couchmann-Karas [5] ดังสมการที่ (2) รวมทั้งยังสามารถหาได้จากการวิเคราะห์วัสดุที่มีความชื้นในระดับต่างๆ ด้วยเครื่องมือที่ชื่อว่า Differential Scanning Calorimeter (DSC)

$$T_g = \frac{w_1 T_{g1} + k T_{g2} w_2}{w_1 + k w_2} \quad (1)$$

เมื่อ T_g คืออุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุ (องศาเซลเซียส)

w_1 คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุ

w_2 คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของน้ำในวัสดุ

T_{g1} คืออุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของวัสดุแห้ง (ความชื้นร้อยละ 0) (องศาเซลเซียส)

T_{g2} คืออุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของน้ำซึ่งเท่ากับ -135 องศาเซลเซียส

k คือค่าคงที่

$$T_g = \frac{w_1 T_{g1} + \left(\frac{\Delta C_{p2}}{\Delta C_{p1}} \right) T_{g2} w_2}{w_1 + \left(\frac{\Delta C_{p2}}{\Delta C_{p1}} \right) w_2} \quad (2)$$

เมื่อ ΔC_{p1} คือความแตกต่างระหว่างความจุความร้อนของน้ำในสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยาง (จูล/กิโลกรัม.องศาเซลเซียส)

ΔC_{p2} คือความแตกต่างระหว่างความจุความร้อนของวัสดุในสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยาง (จูล/กิโลกรัม.องศาเซลเซียส)

การอบแห้งอาหารเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดกลาสทรานซิชันในอาหารได้ เนื่องจากหลักการสำคัญของการอบแห้ง คือให้ความร้อนกับอาหาร เพื่อกำจัดน้ำซึ่งเป็นปัจจัยในการดำรงชีวิตที่สำคัญของจุลินทรีย์ และเป็นปัจจัยสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร [6] ซึ่งในระหว่างกระบวนการอบแห้ง จะมีตัวกลาง เช่น ลมร้อน หรือไอน้ำ ทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนให้กับอาหาร ทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น และน้ำในอาหารได้รับความร้อนจนสามารถระเหยออกจากชิ้นอาหารได้ ดังนั้นในระหว่างการอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นของอาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และเนื่องจากอาหารส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นกึ่งอสัณฐาน ทำให้สภาวะเหมาะสมแก่การเกิดกลาสทรานซิชัน ซึ่งการเกิดกลาสทรานซิชันนี้ส่งผลให้อาหารมีสถานะที่แตกต่างกันไประหว่างการอบแห้ง โดยการที่อาหารมีสถานะแตกต่างกันระหว่างการอบแห้งนี้ พบว่ามีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติของ

อาหารระหว่างการอบแห้ง ซึ่งโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหารนี้เป็นส่วนสำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของอาหารที่เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของอาหารแห้งที่ผลิตได้

2. ผลกระทบของการเกิดกลาสทรานซิชันระหว่างการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพอาหาร

คุณลักษณะทางกายภาพ เช่น สี กลิ่น รส ลักษณะปรากฏ เป็นลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของอาหาร เนื่องจากคุณลักษณะเหล่านี้เป็นคุณลักษณะที่ผู้บริโภคสัมผัสได้ตั้งแต่แรกเห็นอาหารชนิดนั้นๆ และคุณลักษณะทางกายภาพมักใช้เป็นเกณฑ์สำคัญในการตัดสินใจเลือกซื้ออาหาร

คุณลักษณะทางกายภาพสามารถแปรเปลี่ยนได้จากหลายปัจจัย แต่ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหารที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแปรรูป โดยกระบวนการแปรรูปที่ส่งผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหารอย่างชัดเจนกระบวนการหนึ่ง คือ การอบแห้งอาหาร โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหารระหว่างการอบแห้งบางอย่างนั้นเกิดจากการที่อาหารเกิดกลาสทรานซิชันหรือมีการเปลี่ยนสถานะ ส่งผลให้กระบวนการต่างๆ ที่มีกลไกเกี่ยวข้องกับโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหาร อาทิเช่น การสูญเสียกลิ่นของอาหาร การหดตัวของชิ้นอาหาร การเกาะตัวกันของชิ้นหรืออนุภาคอาหาร และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดขึ้นได้ในระดับที่แตกต่างกันไป [7] โดยความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดกลาสทรานซิชันและกระบวนการการสูญเสียกลิ่นของอาหาร การหดตัวของชิ้นอาหาร การเกาะตัวกันของชิ้นหรืออนุภาคอาหาร และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การสูญเสียกลิ่นของอาหารแห้ง (Loss of Volatile)

กลิ่นของอาหารเป็นสารหอมระเหย ซึ่งจากงานวิจัยของ Livi และ Karel [8] ผู้ศึกษาอัตราการสูญเสียสารหอมระเหยออกจากระบบที่ประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส

และราฟไฟโนส ที่เป็นระบบอาหารที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน พบว่าอัตราการสูญเสียของสารหอมระเหยที่ระเหยออกจากอาหารจะแปรผันโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอาหารระหว่างการอบแห้งกับอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของอาหาร โดยอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันหรือมีสถานะคล้ายแก้วระหว่างการอบแห้ง มีการสูญเสียกลิ่นน้อยกว่าอาหารที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน หรือมีสถานะคล้ายแก้วระหว่างการอบแห้ง เนื่องจากมีส่วนของสารหอมระเหยในอาหารมีการเคลื่อนที่อย่างจำกัดเมื่ออาหารมีโครงสร้างคล้ายแก้ว โดยสารหอมระเหยจะแพร่ผ่านได้เฉพาะช่องว่างระหว่างโครงสร้างคล้ายแก้ว แต่เมื่ออยู่ในสถานะคล้ายยางปริมาตรอิสระ (Free volume) ของอาหารมีมากขึ้น ช่องว่างภายในโครงสร้างอาหารมีมากขึ้น ทำให้เมื่อได้รับความร้อนระหว่างการอบแห้ง สารหอมระเหยจึงระเหยเคลื่อนที่ผ่านออกจากอาหารที่มีสถานะคล้ายยางนี้ได้มากและรวดเร็ว [7]

2.2 การหดตัวของอาหารแห้ง (Shrinkage)

การหดตัวระหว่างการอบแห้งพบมากในอาหารที่มีลักษณะเป็นชิ้นและมีน้ำเป็นส่วนประกอบมาก โดยเฉพาะผลไม้อบแห้ง ซึ่งการหดตัวของชิ้นอาหารนอกจากจะมีผลต่อคุณลักษณะทางหน้าที่ของอาหาร เช่น การดูดซับน้ำและการคั้นตัว ยังส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตอาหารออกมาจำหน่ายอีกด้วย

การหดตัวของอาหารระหว่างการอบแห้งเกิดจากโครงสร้าง 2 ส่วนของเซลล์อาหารเกิดการยุบตัวหรือหดตัว เนื่องมาจากการระเหยหรือระเหิดของน้ำ ได้แก่ ผนังเซลล์ (Cell wall) ซึ่งทำหน้าที่ให้ความยืดหยุ่นกับเซลล์และของเหลวโพลีพลาสซึม (Protoplasmic Fluid) ซึ่งทำหน้าที่ให้แรงดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Pressure) กับผนังเซลล์ [9] ซึ่งในระหว่างที่อาหารมีสถานะคล้ายยาง ปริมาตรอิสระในอาหารมีมาก ทำให้เกิดช่องว่างที่จำเป็นในการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหาร ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อน น้ำในอาหารจึงสามารถระเหยหรือระเหิดออก

มาได้ในปริมาณมาก ของเหลวโพโทพลาสติคจึงมีปริมาตรลดลง ส่งผลให้ผนังเซลล์ยุบตัวลงมา ทำให้ชั้นอาหารหดรเล็กลง โดยปริมาตรของการหดตัวของอาหารที่มีลักษณะคล้ายยางระหว่างการอบแห้งนี้จะเทียบเท่ากับปริมาตรน้ำที่ถูกกำจัดออกไป แต่ในกรณีที่สามารถควบคุมให้อาหารอยู่ในสถานะคล้ายแก้วได้ระหว่างการอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงแรกของการอบแห้ง หรือควบคุมให้อาหารมีสถานะคล้ายแก้วได้นานที่สุดในระหว่างการอบแห้ง อาหารจะมีการหดตัวต่ำลง เนื่องจากโครงสร้างอาหารมีความแข็งแรงมากขึ้น องค์ประกอบในเซลล์มีลักษณะคล้ายของแข็ง และปริมาตรอิสระในอาหารลดลง ไม่เหมาะแก่การเคลื่อนที่ของน้ำออกจากอาหาร จึงไม่ส่งผลมากนักต่อปริมาณของเหลวโพโทพลาสติคและผนังเซลล์ ซึ่งจากการวิจัยของ Kurozawa และคณะ [10] ที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดกลาสทรานซิชันกับการหดตัวของมะละกออบแห้ง พบว่าการใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในการอบแห้ง ทำให้มะละกอมีสถานะคล้ายแก้วนานกว่าการอบแห้งมะละกอด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การหดตัวของมะละกอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสน้อยกว่ามะละกอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในสถานะคล้ายแก้วสั้นกว่า

2.3 การเกิดการตกผลึก (Crystallization)

ระหว่างการอบแห้ง อาหารเกิดการเปลี่ยนสถานะขึ้นหลายขั้นตอน โดยเมื่ออาหารได้รับความร้อน ตัวทำละลาย (Solvent) ในสารละลายภายในอาหารจะเกิดการระเหย ส่งผลให้ตัวถูกละลายตกผลึกไปอยู่ในรูปของของแข็งอสัณฐาน (Amorphous Solid) [11] หลังจากนั้นของแข็งอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแข็งผลึก (Crystalline Solid) ซึ่งโครงสร้างมีการเรียงตัวกันแน่นและเป็นระเบียบ โดยระหว่างที่ตัวถูกละลายอยู่ในสถานะของแข็งอสัณฐานนั้น ถ้าอุณหภูมิและความชื้นของอาหารเหมาะต่อการเกิดกลาสทรานซิชัน จะส่งผลอย่างมากต่อปริมาณการตกผลึกของตัวถูกละลายนี้ โดยอัตราในการเกิดผลึกขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ

อาหารในระหว่างการอบแห้งกับอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของอาหารนั้นๆ ซึ่งเมื่อใดที่อาหารมีความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองนี้สูง แสดงว่าอาหารมีสถานะคล้ายยางและขาดความเสถียร โมเลกุลของสารต่างๆ ในอาหารสามารถเคลื่อนที่ได้มาก เมื่อเกิดนิวเคลียสของผลึก สารต่างๆ จึงเข้าไปเกาะกับนิวเคลียสได้อย่างรวดเร็ว อัตราในการเกิดการตกผลึกจึงถูกเร่งให้สูงขึ้น [6] โดยที่อัตราการตกผลึกที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันสามารถคำนวณได้จากสมการ Williams-Landel-Ferry (WLF Kinetic Equation) [12] ดังสมการที่ (3)

$$\log_{10} \left(\frac{t}{t_g} \right) = \frac{-C_1(T-T_g)}{C_2 + (T-T_g)} \quad (3)$$

เมื่อ t คือเวลาในการตกผลึก

t_g คือเวลาสำหรับการตกผลึกที่อุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน

C_1 คือค่าคงที่ (17.44 องศาเซลวิน)

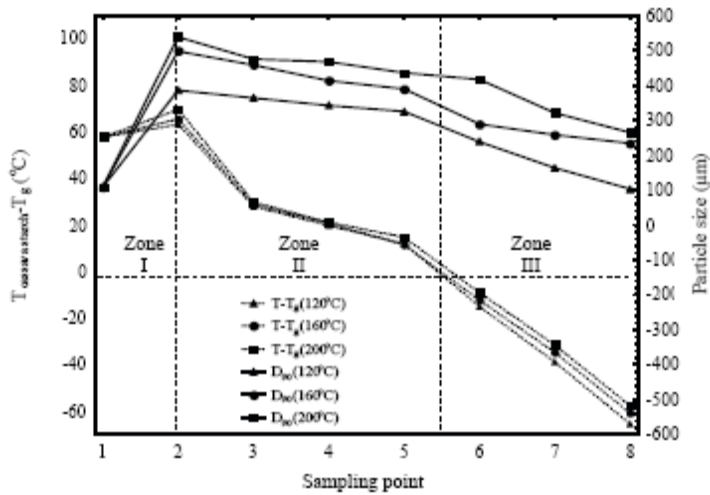
C_2 คือค่าคงที่ (51.60 องศาเซลวิน)

T คืออุณหภูมิ (องศาเซลวิน)

T_g คืออุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน (องศาเซลวิน)

2.4 การเกิดการเกาะตัวกันของอาหารแห้ง (Agglomeration)

ปัจจุบันนี้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเกาะตัวกันของชิ้นหรืออนุภาคอาหารในระหว่างการอบแห้งแบบต่างๆ โดยเฉพาะอาหารผงซึ่งผลการวิจัยพบว่ากลไกการเกาะตัวกันของอาหารผงระหว่างการอบแห้งล้วนแล้วแต่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าของอนุภาคอาหารผงเหล่านั้น รวมถึงเกี่ยวข้องกับลักษณะการเคลื่อนที่และการชนกันของอนุภาคอาหารผงภายในระบบการอบแห้ง โดยกลไกการเกาะตัวกันของอาหารผงในระหว่างการอบแห้งที่มักพบมี 3 ชนิด ด้วยกัน ได้แก่ การเกิดสะพานของเหลว (Liquid Bridge) การเกิดสะพานของแข็ง (Solid Bridge) และการเกี่ยวตัวกันในระดับจุลภาค



รูปที่ 1 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้ง (T) กับอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของแป้งมันสำปะหลัง (T_g) และขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้ง (D_{90}) ที่อุณหภูมิ 120 160 และ 200 องศาเซลเซียส [19]

(Micromechanical Interlocking) [13]-[17] ซึ่งการเกิดสะพานของเหลวเป็นกลไกการเกาะตัวกันของอาหารผงที่พบบ่อยและมากที่สุดในช่วงการอบแห้ง โดยเฉพาะในอาหารที่มีส่วนประกอบของน้ำตาลในปริมาณมาก เช่น นมผง เครื่องดื่มผง [18] ซึ่งปกติแล้วก่อนการอบแห้ง อาหารเหล่านี้มักจะอยู่ในสถานะคล้ายแก้วหรือมีสถานะคล้ายยางเล็กน้อย แต่เมื่อได้รับความร้อนสูงเกินอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันระหว่างการอบแห้งแล้ว อาหารจะเปลี่ยนสถานะจากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยางหรือมีสถานะคล้ายยางมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคมีลักษณะคล้ายของเหลวหนืด โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าของอนุภาคอาหารซึ่งได้รับความร้อนสูงกว่าส่วนอื่นๆ และเมื่ออนุภาคของอาหารผงเคลื่อนที่มาชนกันเนื่องจากได้รับแรงจากการเคลื่อนที่ของตัวกลางในการให้ความร้อน แต่ละอนุภาคจึงสามารถเกาะติดกันกลายเป็นอนุภาคอาหารผงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่อาหารผงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนี้อาจเป็นที่ต้องการหรือไม่ต้องการของผู้บริโภคก็ได้ [13]-[16] ตัวอย่างเช่น Aichayawanich และคณะ [19] ซึ่งทำการศึกษากลไกการเกิดแป้งมันสำปะหลังหยابในช่วงการอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic Conveying

Drying) ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมแป้ง พบว่าขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแป้งมันสำปะหลัง (T) ระหว่างการอบแห้งกับอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน (T_g) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณความชื้นเท่ากัน ดังรูปที่ 1 โดยแป้งมันสำปะหลังที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้งกับอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของแป้งมันสำปะหลังสูง (ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีลักษณะคล้ายยางสูง จะมีการเกาะตัวกันเป็นขนาดใหญ่และกลายเป็นแป้งมันสำปะหลังหยابมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่อบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า (อุณหภูมิต่ำกว่า 120 และ 160 องศาเซลเซียส) ซึ่งแป้งมันสำปะหลังหยابนี้จะต้องนำกลับไปเข้ากระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังอีกครั้ง ทำให้สิ้นเปลืองทั้งต้นทุนและเวลาในการผลิต แต่ในกรณีของ Vissotto และคณะ [20] พบว่าในกระบวนการผลิตโกโก้ผง จำเป็นที่จะต้องทำให้อนุภาคโกโก้ผงมีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการละลาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการผลิต เพื่อให้ผงโกโก้ที่มีขนาดเล็กเกาะตัวกัน โดยอุณหภูมินั้นควรสูงกว่าอุณหภูมิใน

การเกิดกลาสทรานซิชัน เพื่อให้แห้งโกก้อยู่ในสถานะคล้ายยางมากและยาวนานที่สุด

นอกจากการเกิดกลาสทรานซิชันจะมีผลอย่างมากต่อการเกาะตัวกันของอนุภาคอาหารผงแล้ว การเกิดกลาสทรานซิชันยังมีผลอย่างมากต่อการเกิดการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคอาหารกับผนังเครื่องอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย และเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เป็นต้น ทำให้มักเกิดปัญหาการอุดตันของเครื่องอบแห้งและการเกิดการไหม้ของอาหารผงที่เกาะติดอยู่กับผนังของเครื่องอบแห้งนั้น ซึ่งกลไกในการเกิดการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคของอาหารและผนังเครื่องอบแห้งอาจเกิดขึ้นได้ เช่นเดียวกับการเกิดการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคอาหารกับอาหาร [21] นั่นคืออนุภาคอาหารที่มีสถานะคล้ายยางจะเกาะติดกับผนังเครื่องอบแห้งได้ง่าย ดังนั้นในระหว่างการอบแห้งจึงควรทำการป้องกันไม่ให้อาหารเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะคล้ายยาง หรือควบคุมให้อาหารมีสถานะคล้ายยางสั้นที่สุด ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น การลดความชื้นของอาหารก่อนการอบแห้งด้วยกรรมวิธีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ หรือทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชันของอาหารนั้น เป็นต้น

2.5 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

งานวิจัยหลายชิ้นพบว่าในช่วงที่อาหารมีสถานะคล้ายยางสารต่างๆ จะมีความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าออกหรือเคลื่อนที่อยู่ภายในอาหารได้สูงกว่าในช่วงที่อาหารมีสถานะคล้ายแก้ว ทำให้ปฏิกิริยาต่างๆ สามารถเกิดได้ดีในช่วงที่อาหารมีสถานะคล้ายยางนี้ เช่น การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ (Non-enzymatic Browning) การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งต้องอาศัยการรวมตัวกันของสารหลายชนิด [22],[23] ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออาหารมีสถานะคล้ายยาง โครงสร้างของอาหารมีลักษณะค่อนข้างโปร่งของเหลว ซึ่งโมเลกุลมีการเคลื่อนที่ได้ส่งผลให้โมเลกุลของสารต่างๆ สามารถเคลื่อนที่เข้ามาทำปฏิกิริยากันได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในระหว่างการอบแห้งถ้าอาหารมีอุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิในการเกิดกลาสทรานซิชัน ซึ่งอาหารจะเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว

เป็นสถานะคล้ายยาง หรือในกรณีที่อาหารนั้นมีความชื้นสูงจนทำให้อยู่ในสถานะคล้ายยางระหว่างการอบแห้งเป็นเวลานาน อาหารนั้นจะมีโอกาสในการเกิดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ดังที่กล่าวมาได้ค่อนข้างสูงขึ้นไป

3. สรุป

กระบวนการการสูญเสียกลิ่น การหดตัว การตกผลึก การเกาะตัวกัน และการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ของอาหารแห้ง มีความแปรผันอย่างมากกับการเกิดกลาสทรานซิชันของอาหารในระหว่างการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องมากจากการเกิดกลาสทรานซิชัน ทำให้สถานะของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง จากสถานะคล้ายแก้วเป็นสถานะคล้ายยาง โดยอาหารที่มีสถานะทั้งสองแบบนี้จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อการเคลื่อนที่ของสารต่างๆ ภายในอาหารเมื่อได้รับความร้อนจากการอบแห้ง นอกจากนี้สถานะที่แตกต่างกันระหว่างสถานะคล้ายยางและสถานะคล้ายแก้วนี้ยังส่งผลต่อคุณสมบัติของอาหารระหว่างการอบแห้งด้วย โดยเฉพาะความหนืด ดังนั้นกระบวนการใดที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและความหนืดของอาหาร จึงมีความแปรผันอย่างมากต่อการเกิดกลาสทรานซิชันในระหว่างช่วงอบแห้ง โดยกระบวนการต่างๆ เหล่านี้อาจส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพของอาหารหลังการอบแห้ง ดังนั้นผู้ผลิตอาหารจึงควรทำการควบคุมการเกิดกลาสทรานซิชันระหว่างการอบแห้งเพื่อให้อาหารแห้งที่ผลิตได้มีคุณภาพตามที่ผู้บริโภคต้องการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Truong, B.R. Bhandari, T. Howes, and B. Adhikari, "Glass transition behavior of fructose," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 39, pp. 569-578, 2004.
- [2] Y.H. Roos, *Phase transition in foods*, San Diego: Academic Press, 1995, pp. 73-107.
- [3] Y.H. Roos and M. Karel "Water and molecular weight effects on glass transition in amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions,"



- Journal of Food Science*, vol. 56, pp. 1676–1681, 1991.
- [4] M. Gordon and J. Taylor, “Ideal copolymers and the second-order transitions of synthetic rubbers. I. Non-crystalline copolymers,” *Journal of Applied Chemistry*, vol. 2, pp. 493-500, 1952.
- [5] P.R. Couchman and F.E. Karasz, “A classical thermodynamic discussion of the effect of composition on glass-transition temperatures,” *Macromolecules*, vol. 11, no. 1, pp. 117-119, 1978.
- [6] P. Buera, C. Schebor, and B. Elizalde, “Effects of carbohydrate crystallization on stability of dehydrated foods and ingredient formulation,” *Journal of Food Engineering*, vol. 67, pp. 157-165, 2005.
- [7] B.R. Bhandari and T. Howes, “Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods,” *Journal of Food Engineering*, vol. 40, pp. 71-79, 1999.
- [8] G. Levi and M. Karel, “The effect of phase transition on release of n-propanol entrapped in carbohydrate glasses,” *Journal of Food Engineering*, vol. 24, pp. 1-13, 1995.
- [9] J.M. del Valle, T.R.M. Cuadros, and J.M. Aguilera, “Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces,” *Food Research International*, vol. 3 pp. 191-204, 1998.
- [10] L.E. Kurozawa, M.D. Hubinger, and K.J. Park, “Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying,” *Journal of Food Engineering*, vol. 108, pp. 43-50, 2012.
- [11] M.I.U. Islam and T.A.G. Langrish, “An investigation into lactose crystallization under high temperature conditions during spray drying,” *Food Research International*, vol. 43 pp. 46-56, 2010.
- [12] M.I.U. Islam, T.A.G. Langrish, and D. Chiou, “Particle crystallization during spray drying in humid air,” *Journal of Food Engineering*, vol. 99, pp. 55-62, 2010.
- [13] B. Adhikari, T. Howes, B.R. Bhandari, and V. Troung, “Surface stickiness of drops of carbohydrate and organic acid solutions during convective drying: Experiments and modeling,” *Drying Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 839-873, 2003.
- [14] P. Boonyai, B. Bhandari, and T. Howes, “Stickiness measurement techniques for food powders: a review,” *Powder Technology*, vol. 145, pp. 34-46, 2004.
- [15] K.D. Foster, J.E. Bronlund, and A.H.J. Pasterson, “Glass transition related cohesion of amorphous sugar powders,” *Journal of Food Engineering*, vol. 77, pp. 997-1006, 2006.
- [16] S.E. Papadaki and R.E. Bahu, “The sticky issues of drying,” *Drying Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 817-837, 1992.
- [17] J. Tomas, “Adhesion of ultrafine particles- Amicromechanical approach,” *Chemical Engineering Science*, vol. 62, pp. 1997-2010, 2007.
- [18] B. Adhikari, T. Howes, B.R. Bhandari, and V. Troung, “Effect of addition of maltodextrin on drying kinetics and stickiness of sugar and acid-rich foods during convective drying: experiments and modeling,” *Journal of Food Engineering*, vol. 62, pp. 53-68, 2004.
- [19] S. Aichayawanicha, M. Nopharatanaa, A. Nopharatanab, and W. Songkasiric, “Agglomeration mechanisms of cassava starch during pneumatic conveying drying,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 84, pp. 292–298, 2011.
- [20] F.Z. Vissotto, L.C. Jorge, G.T. Makita, M.I. Rodrigues, and F.C. Menegalli, “Influence of



- the process parameters and sugar granulometry on cocoa beverage powder steam agglomeration,” *Journal of Food Engineering*, vol. 97, pp. 283–291, 2010.
- [21] B. Adhikari, T. Howes, D. Lecomte, and B.R. Bhandari, “A glass transition temperature approach for the prediction of the surface stickiness of a drying droplet during spray drying,” *Powder Technology*, vol. 149, pp. 168-179, 2005.
- [22] R. Karmas, M.P. Buera, and M. Karel, “Effect of glass transition on rates of nonenzymatic browning in food systems,” *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, vol. 40, pp. 873-879, 1992.
- [23] Y. Shimada, Y. Roo, and M. Karel, “Oxidation of methyl linoleate encapsulated in amorphous lactose-based food model,” *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, vol. 39, pp. 637-641, 1992.