

ผลของการดองน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสต่อคุณลักษณะและสมบัติทางเคมีกายภาพของ ผลิตภัณฑ์อาหารจากพืชทอดกรอบด้วยเครื่องทอดแบบสุญญากาศ

Effect of Osmotic Dehydration on Characteristics and Physicochemical Properties of Plant-Based Crisps with Vacuum Fryer

ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ และ ณัฐริกา ศิลาฉาย *

Tunyaporn Sirilert and Nattiga Silalai *

ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ประเทศไทย

Food Technology Department, Faculty of Science, Siam University, Thailand

Received : 16 December 2025, Received in revised form : 13 February 2026, Accepted : 15 February 2026

Available online : 26 February 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : ผลิตภัณฑ์ทอดกรอบส่วนใหญ่มักพบว่ามีปริมาณน้ำมันในอาหารสูงเนื่องจากการแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำและน้ำมันในอาหารระหว่างการทอด การดองน้ำออกจากวัตถุดิบก่อนการทอดจะช่วยลดความชื้นในอาหารให้ลดลงซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทอดมีการอมน้ำมันน้อยลง อีกทั้งการทอดสุญญากาศสามารถลดปริมาณน้ำมันในอาหารทอดลงเมื่อเปรียบเทียบกับทอดในบรรยากาศปกติ เนื่องจากน้ำในวัตถุดิบระเหยไปภายใต้สภาวะสุญญากาศ นอกจากนั้นอุณหภูมิที่ใช้ทอดส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทอด โดยพบว่าบริเวณ glass transition ของผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นบริเวณที่โมเลกุลของอาหารมี molecular mobility สูง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความนิ่มและอ่อนตัวเป็นสาเหตุให้น้ำมันในอาหารสามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของวิจัย คือ ศึกษาผลของวิธีการเตรียมวัตถุดิบก่อนการทอด (Pre-treatment) ที่มีต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารจากโปรตีนพืชทอดกรอบด้วยการดองน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส (Osmosis dehydration; OD) ก่อนนำไปทอดด้วยเครื่องทอดแบบสุญญากาศ และศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วยการวิเคราะห์ค่า glass transition temperature และ α -relaxation โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) ตามลำดับ แล้วนำค่าที่ได้มาศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอด และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทอดกรอบอื่นๆต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย : ในการศึกษาครั้งนี้ผลิตภัณฑ์เนื้อเลียนแบบจากพืชจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่ผ่านกรรมวิธีการเตรียมก่อนการทอด (Control) และกลุ่มที่ผ่านกรรมวิธีการเตรียมก่อนการทอดด้วยการดองน้ำออกด้วยวิธีการออสโมซิส (Osmosis dehydration; OD) ด้วยสารละลายเกลือ (NaCl) เข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสไลด์แล้วประมาณ 200 กรัม ใส่ลงกะละมังที่มีสารละลายเกลือ (NaCl) ในอัตราส่วน 1 : 10 (ตัวอย่างต่อสารละลายเกลือ) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เติสารละลายน้ำเกลือออกซึบน้ำส่วนเกินที่เหลือด้วยกระดาษทิชชู นำตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มไปทอดด้วยเครื่องทอดสุญญากาศที่ความดันประมาณ 13.33 kPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำผลิตภัณฑ์ทอด

ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์หลังการทอด ได้แก่ การหดตัว การสูญเสียน้ำหนัก ค่าเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ค่า Glass transition (T_g) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) และค่า Storage modulus (E') ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)

ผลการวิจัย : วิธีการเตรียมก่อนการทอดมีผลต่อคุณลักษณะและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ทอดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยอัตราส่วนของการหดตัว, ร้อยละการสูญเสียความชื้น, ร้อยละปริมาณความชื้น, ร้อยละปริมาณไขมัน และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังการทอดของกลุ่ม Control มีค่าเท่ากับ 2.53 ± 0.15 , 88.6 ± 0.82 , 6.90 ± 0.49 , 4.36 ± 0.18 และ 214.96 ± 1.17 N ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านวิธีการ OD มีอัตราการหดตัว, ร้อยละการสูญเสีย, ร้อยละปริมาณความชื้น, ร้อยละปริมาณไขมัน และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังการทอด เท่ากับ 1.29 ± 0.08 , 93.4 ± 0.51 , 3.22 ± 0.54 , 3.42 ± 0.26 และ 115.20 ± 1.20 N ตามลำดับ นอกจากนี้สมบัติด้านความร้อน (Thermal properties) ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านวิธีการ OD ได้แก่ glass transition temperature (T_g) และ α -relaxation temperature (T_α) มีค่าสูงกว่ากลุ่ม Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่า T_g และ T_α ของวิธี OD เท่ากับ 41.17 ± 0.58 และ 60.93 ± 0.88 °C ตามลำดับ และบริเวณ glass transition ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านวิธีการ OD มีการเปลี่ยนแปลงทางกล (storage modulus, $\Delta E'$) น้อยกว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม Control โดย $\Delta E'$ ของวิธี OD มีค่าเท่ากับ 1.51×10^9 ในขณะที่ค่า $\Delta E'$ ของผลิตภัณฑ์กลุ่มควบคุม เท่ากับ 5.02×10^9 ที่อุณหภูมิ 35 °C ค่า Force (hardness) ของผลิตภัณฑ์กลุ่ม OD มีค่าเท่ากับ 115 N ในขณะที่ค่า Force (hardness) ของผลิตภัณฑ์กลุ่มควบคุม เท่ากับ 215 N ซึ่งดูเหมือนว่าอุณหภูมิในการเก็บรักษาส่งผลต่อค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอด ค่า Force ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเก็บเพิ่มขึ้น ค่า Force ของผลิตภัณฑ์กลุ่มควบคุมมีค่าในช่วง 215-250 N ซึ่งค่า $\Delta E'$ มีความสัมพันธ์กับค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์บริเวณ glass transition

สรุปผลการวิจัย : วิธีการเตรียมก่อนการทอดด้วยการดึงน้ำออกจะช่วยลดอัตราการหดตัว ปริมาณความชื้นและไขมันของผลิตภัณฑ์ทอด แต่ส่งผลต่อการเพิ่มร้อยละการสูญเสียของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและทางกลของผลิตภัณฑ์สามารถนำมาใช้ในการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา รวมถึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ทอดกรอบให้ยาวนานขึ้นได้

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์อาหารว่างทอดกรอบจากโปรตีนพืช ; กระบวนการเตรียมก่อนการทอด ; กระบวนการดึงน้ำออกด้วยแรงดันออสโมซิส ; การวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก ; สมบัติทางเคมีกายภาพ

Abstract

Background and Objectives : Almost fried products contain high amount of oil since there was an exchange between water in food and oil during frying. Dehydration is one of the methods can reduce moisture content in food products leading to a reduction of oil uptake in fried products. Moreover, vacuum frying can also reduce the amount of oil content in fried food compared to atmospheric frying. Due to the fact that water evaporation under the vacuum

condition, there was low excessive retention of oil inside the product. In addition, temperature also affects to product characteristics. Around the glass transition, molecular mobility of food molecules increases resulting in softer product and enhancement of water molecular movement. Objective of the research was; therefore, to study the effect of a pre-treatment method on characteristics of plant-based crisps using osmosis dehydration (OD) prior to vacuum frying and to study thermal properties (glass transition temperature and α -relaxation) of plant-based crisps using a Differential Scanning Calorimeter (DSC) and a Dynamic Mechanical Analyzer (DMA), respectively. All data were used to evaluate the correlation of product characteristics, texture and physicochemical properties of plant-based crisps as well as to provide a guideline for application in other fried food industries.

Methodology : In the present study, there were 2 treatments consisting of the plant-based products without pre-treatment before frying (Control) and the products with pre-treatment with osmosis dehydration (OD) using 0.5% (w/w) salt solution (NaCl) prior to frying. The 200 g of pre-treatment products prior to frying were poured in the bowl containing 0.5% (w/w) NaCl solution in the ratio of samples to salt solution at 1:10 and soaked at 30°C for 1 hour. Then, the salt solution was drained and the excess water on the products was wiped off by tissue papers. The samples from both treatments were vacuum fried at 13.33 kPa for 3 hours. All vacuum fried products were analyzed as the physicochemical properties including shrinkage ratio, weight loss, hardness using texture analyzer, T_g using Differential Scanning Calorimetry (DSC), and storage modulus (E') using Dynamic Mechanical Analyzer (DMA).

Main Results : Pre-treatment frying method significantly affected characteristics and physicochemical properties of fried products ($p \leq 0.05$). Shrinkage ratio, %moisture content, %fat content and texture of the fried product (control) were 2.53 ± 0.15 , 6.90 ± 0.49 , 4.36 ± 0.18 and 214.96 ± 1.17 N, respectively, which were higher than those of the fried product with OD method. The shrinkage ratio, %moisture content, %fat content and texture of the fried product with OD method were 1.29 ± 0.08 , 3.22 ± 0.54 , 3.42 ± 0.26 and 115.20 ± 1.20 N, respectively. On the other hand, %weight loss of the fried product (control) was 88.6 ± 0.82 , which was lower than that of the fried product with OD method having 93.4 ± 0.51 . Moreover, glass transition temperature (T_g) of the fried product with OD method were 41.17 ± 0.58 , which were significantly higher than those of the control fried product having 31.14 ± 0.82 ($p \leq 0.05$) as a result of water plasticization behavior. Around the glass transition, storage modulus of the fried product (control) decreased dramatically, whereas a slight decrease in the storage modulus was found in the fried product with OD method. With consideration of a change in mechanical properties (storage modulus, $\Delta E'$), we found that the $\Delta E'$ of the fried product with OD method were lower than that of the control fried product. The $\Delta E'$ of the fried product with OD method was 1.51×10^9 , while the $\Delta E'$ of the control fried product was 5.02×10^9 . This was also consistent with α -relaxation as observed from a change in storage modulus around the glass transition. The α -relaxation

temperature (T_{α}) of the fried product with OD method was 60.93 ± 0.88 °C, which was significantly higher than that of the control ($p \leq 0.05$). The T_{α} of the fried product (control) was 41.13 ± 0.83 °C. Texture of the fried products with and without OD method was measured as force value. The results indicated that the storage temperature affected a product texture. Force values of the fried products with OD method stored at 35 °C were around 115 N, whereas force values of the control were approximately 215 N during storage. However, it seems that the force values of the fried products increased with increasing storage temperature. The force values of the fried products ranged from 215 to 250 N at storage temperature of 45 °C. The results indicated that the $\Delta E'$ had the correlation with changes in texture of the fried product, which were measured by the texture analyzer.

Conclusions : The pre-treatment process prior to frying could reduce shrinkage ratio, but increase weight loss of the fried products. Osmosis dehydration method could decrease moisture and fat content in the fried product, and also reduce changes in physicochemical properties during storage. In addition, DSC and DMA that were used to analyze thermal and mechanical properties of the products can be used to evaluate physical properties, such as fragility and crispness of the fried products during storage. The information could be a guideline to determine changes in fried products during process and storage including shelf-life extension.

Keywords : plant-based crisp ; pre-treatment frying ; osmosis dehydration ; dynamic mechanical analysis ; physicochemical property

*Corresponding author. E-mail : nattiga.sil@siam.edu

Introduction

จากกระแสความความนิยมอาหารโปรตีนพืชทดแทนเนื้อสัตว์ (Plant-Based Food) และการมุ่งเน้นเศรษฐกิจอย่างยั่งยืนและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ (Dagevos, 2021; Xu *et al.*, 2021) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะช่วยผลักดันให้ความต้องการนำเข้าผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากพืชขยายตัวเพิ่มขึ้น ตรงจุดนี้จึงถือว่าเป็นโอกาสของผู้ประกอบการไทยในการขยายตลาดผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากพืชมายังตลาดยุโรปเพิ่มขึ้น เนื่องจากไทยมีจุดแข็งด้านการเกษตรและอาหาร รวมถึงมีวัตถุดิบที่หลากหลายและมีคุณภาพ ซึ่งเป็นโอกาสในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายทั้งรูปแบบ และรสชาติ โดยถือเป็นการยกระดับและเพิ่มมูลค่าให้แก่สินค้าอาหารของไทย อีกทั้งแนวโน้มของผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับสุขภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากพืช (Plant-based products) นอกจากจะตอบโจทย์เรื่องรสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการให้มากที่สุด ควรเน้นใช้วัตถุดิบทางการเกษตรของไทยให้มากขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรและชุมชน ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีแนวความคิดในการใช้วัตถุดิบท้องถิ่นของไทยอย่างโปรตีนถั่วเขียวและเห็ดครงมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักของแหล่งโปรตีนในการผลิต Plant-based meat เพื่อช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรและชุมชน

ในปัจจุบันกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารว่างทอดกรอบ ถือว่าเป็นกลุ่มตลาดอาหารว่างที่ค่อนข้างใหญ่ มีปริมาณความต้องการในการบริโภคค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ง่ายต่อการบริโภค เนื้อสัมผัสที่กรอบ และง่ายต่อการเก็บรักษา แต่ปัญหาที่มักพบได้บ่อยครั้งในผลิตภัณฑ์ทอดกรอบ คือ การอมน้ำมันของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการแปรรูป ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทอดกรอบ ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่กรอบและเกิดกลิ่นหืนขึ้นในผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาและจำหน่าย การเทคโนโลยีการทอดด้วยเครื่องทอดสูญญากาศ จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารว่างทอดกรอบเพื่อช่วยลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ (Dueik & Bouchon, 2011) ซึ่งการอมน้ำมันของผลิตภัณฑ์ระหว่างการทอดที่มีผลกระทบมาจากหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร พื้นผิวสัมผัสของอาหาร สภาพในการทอด ชนิดน้ำมันที่ใช้ รวมถึงปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ก่อนการทอด (Dehghannya & Abedpour, 2018; Zhang *et al.*, 2018) ซึ่งกระบวนการเตรียมวัตถุดิบก่อนการแปรรูปจึงเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในมากในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะและยังช่วยรักษาเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Quan *et al.*, 2016; Llavata *et al.*, 2020) โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารแห้งและทอดกรอบนั้น ถ้ามีปริมาณน้ำมันที่มากเกินไปในผลิตภัณฑ์ทอดมักจะไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคอย่างยิ่ง เนื่องจากส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่กรอบอีกทั้งยังเกิดกลิ่นหืนที่ไม่พึงประสงค์ในระหว่างการเก็บรักษาด้วย โดยผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เลียนแบบจากพืชมีใยอาหารเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง ซึ่งจะอมน้ำมันได้มากกว่าระหว่างการทอดส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทอดที่ได้มีลักษณะนิ่มและไม่กรอบ ซึ่งการทอดเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลแบบไดนามิก (Dynamic mass transfer) ซึ่งอาหารจะสูญเสียความชื้นและดูดซับน้ำมันเข้ามาแทนที่ (Liberty *et al.*, 2019) ขณะที่ปัจจุบันนี้การทอดสูญญากาศ (Vacuum frying) กลายเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ทอดมากขึ้น เนื่องจากทำให้ผลิตภัณฑ์ทอดที่ได้คุณลักษณะที่ดีตามความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งหลักการของการทอดสูญญากาศ คือการระเหยน้ำออกจากอาหารผ่านตัวกลางทางความร้อน คือ น้ำมัน ที่มีค่าความจุความร้อนที่สูงกว่าการใช้ตัวกลางอากาศมากกว่า 1,000 เท่า โดยเทคโนโลยีการทอดสูญญากาศนั้นจะใช้อุณหภูมิและเวลาที่ต่ำกว่าการทอดที่สภาวะปกติส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบและมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับได้ทางสมบัติทางเคมี-กายภาพ รสชาติกลิ่น ซึ่งการทอดสูญญากาศพบว่า สามารถลดปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ทอดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการทอดในบรรยากาศปกติ (Shyu & Hwang, 2001) นอกจากนี้ Granda *et al.* (2004) ยังพบอีกว่าการทอดสูญญากาศสามารถช่วยลดการเกิดสารจำพวกอะคริลาไมด์ (Acrylamide) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่เกิดจากการไหม้ของสารประกอบคาร์โบไฮเดรตในผักและผลไม้ โดยการทอดสูญญากาศสามารถรักษาคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามินและแร่ธาตุของการแปรรูปผักและผลไม้ทอดกรอบได้ดีกว่าการทอดที่สภาวะบรรยากาศ นอกจากนี้กรรมวิธีการเตรียมก่อนการทอดก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง ที่นิยมนำมาใช้เป็นที่วิธีร่วมกับการทอด เพื่อช่วยลดการอมน้ำมันในและลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ทอด วิธีการดึงน้ำออกด้วยกระบวนการ Osmosis Dehydration ก่อนทอดสูญญากาศจะช่วยลดน้ำในอาหารได้ดี ช่วยรักษาโครงสร้าง สี กลิ่นรส ดั้งเดิม และลดการหดตัวรุนแรงตอนทอด เพราะน้ำบางส่วนถูกดึงออกด้วยความเข้มข้นของสารละลาย (เกลือ หรือน้ำตาล) ทำให้เนื้อสัมผัสคงรูปดีขึ้น ประหยัดพลังงานในการอบแห้ง และยังทำให้อาหารดูสดใหม่เหมือนเดิมก่อนนำไปทอดสูญญากาศต่อ และเนื้อสัมผัสกรอบมากยิ่งขึ้น (Nunes & Moreira, 2009; Dueik & Bouchon 2011; Oladejo *et al.*, 2017; Negoita *et al.*, 2022)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษานั้นมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ (Physicochemical Properties) ของผลิตภัณฑ์ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า บริเวณ Glass transition โดยในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนสถานะจาก Glassy state เป็น Rubbery state ซึ่งเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์มี Mobility ของโมเลกุลในอาหารสูง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะนิ่มและเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย (Roos, 1995; 2012) ซึ่งการเปลี่ยนทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์บริเวณค่า T_g (glass transition temperature) สามารถวิเคราะห์ได้จาก การเปลี่ยนแปลงของค่า Heat capacity (Takeda *et al.*, 2023) อีกทั้งยังมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางกล (Mechanical property) ซึ่งวิเคราะห์ได้จาก α -relaxation behavior บริเวณ glass transition ในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร (Silalai & Roos, 2011; Wu *et al.*, 2023) โดยการวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic mechanical analysis; DMA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ความร้อนที่ใช้วัดคุณสมบัติหยุ่นหนืดของวัสดุโดยการใช้แรงสั่นสะเทือนและวัดการตอบสนองของแรงดังกล่าว โดยเทคนิคนี้แสดงให้เห็นความสำคัญของการเปลี่ยนสถานะของวัสดุ เช่น การเปลี่ยนผ่านของวัสดุผ่าน อุณหภูมิ Glass transition (Glass transition; T_g) และการคาดการณ์ประสิทธิภาพของวัสดุภายใต้แรงเค้นโดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลง modulus บริเวณ T_g เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารผงในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา (Silalai & Roos, 2010a) ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีแนวความคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารว่างทอดกรอบจากโปรตีนพืช โดยศึกษาผลของวิธีการเตรียมก่อนการทอด (Pre-treatment method) ด้วยการใช้วิธีออสโมซิส (Osmosis dehydration; OD) ก่อนนำไปทอดด้วยเครื่องทอดแบบสูญญากาศ แล้วทำการประเมินคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ด้านเนื้อสัมผัสร่วมกับการศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วยการวิเคราะห์ค่า glass transition temperature และ α -relaxation โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) ตามลำดับ เพื่อนำผลที่ได้มาศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสและสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์ทอดที่เกิดขึ้นระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทอดกรอบอื่นๆต่อไป

Methodology

1. วัตถุดิบที่ใช้

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ โปรตีนถั่วเขียว (Mung bean protein powder 80%) ยี่ห้อเทสตี แพล้นส์ บริษัท เลอแพล้นส์ น้ำมันพืช ตราอรุณ แบ่งข้าวเจ้า ตราไทยวา หืดแครง และเต้าหู้สดชนิดแข็ง ซึ่งได้จากตลาดสด ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ texture vegetable protein (TVP) ได้จากบริษัทฟู้ดเทค โปรตีนถั่วเหลือง จำกัด (ประเทศไทย), wheat glute ได้จากร้านเพื่อนครัว Chiangmai Bakermart (ประเทศไทย) และส่วนผสมอื่นๆ (เกรดอาหาร) ได้แก่ carrageenan และ methylcellulose ได้จากบริษัทเคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (ประเทศไทย) และกลีนิรสนเนื้อ (yeast extract) และสีจากบีต (beetroot) ได้จากบริษัทหน้าเขียน (ประเทศไทย)

2. การเตรียมตัวอย่างในการผลิต

2.1 การเตรียมเห็ดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ซึ่งเห็ดที่ใช้เป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เลียนแบบจากพืช คือ เห็ดแครงอบแห้ง โดยนำเห็ดแครงมาต้มในน้ำเดือดประมาณ 15-20 นาที เพื่อกำจัดกลิ่นและรสขม จากนั้นนำไปสะเด็ดน้ำด้วยเครื่องเหี่ยงสลัดน้ำ (VOICE รุ่น 360N, INTERtoshop) ที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที แล้วนำไปปั่นละเอียดด้วยเครื่องสับผสมที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที (รุ่น UNQS3A, Union Kitchen and Service Co., Ltd.) เก็บไว้ในภาชนะปิดสนิทเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

2.2. การเตรียม Texturized vegetable protein (TVP) เพื่อใช้ในการผลิตด้วยการนำไปโปรตีนพืช (Dried texture vegetable protein; Dried TVP) แห้ในน้ำสะอาดในอัตราส่วนของ Dried TVP : น้ำ เท่ากับ 1 : 1 เป็นเวลานาน 15 นาที เพื่อให้ TVP ดูชุ่มน้ำได้เต็มที่ก่อนนำไปใช้งาน

2.3. ทำการผสมส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ โปรตีนถั่วเขียวผง, เห็ดแครง, TVP, กลูเตน, น้ำมันพืช และน้ำเปล่าในปริมาณร้อยละ 15, 15, 11, 2, 2, 2 และ 53 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

2.4 นำส่วนผสมผสมทั้งหมดที่เตรียมไว้แล้วเทลงในเครื่องผสมอาหาร (Kitchen Aid, model K5SS, USA) นวดผสมให้เข้ากัน โดยขั้นตอนในการผลิตเนื้อเทียมจากพืชดัดแปลงมาจากวิธีของ Nakraksa (1993) จากนั้นนำตัวอย่างมาทำการขึ้นรูปให้เป็นท่อนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 35.0 ± 0.5 mm ท่อด้วยกระดาษฟลอยด์แล้วไปนึ่งให้ความร้อนให้สุกเพื่อทำการขึ้นรูปของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ นำมาหั่นสไลด์เป็นชิ้นๆ วงกลมด้วยเครื่องสไลด์เนื้อ (บริษัทสปริงกรีนโซลูชัน, โมเดล MS7, ประเทศไทย) ให้มีความหนาประมาณ 2.0 ± 0.2 mm

3. วิธีการเตรียมก่อนการทอดที่มีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เลียนแบบจากพืชทอดกรอบ

การทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic dehydration; OD) ด้วยสารละลายเกลือ (NaCl) เข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผ่านสไลด์แล้วประมาณ 200 กรัม ใส่ลงในกะละมังที่มีสารละลายเกลือ (NaCl) ในอัตราส่วน 1 : 10 (ตัวอย่างต่อสารละลายเกลือ) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเทสารละลายน้ำเกลือออก แล้วใช้กระดาษทิชชูซับน้ำส่วนเกินที่เหลือในตัวอย่าง (ดัดแปลงตามวิธีของ Kwaw *et al.*, 2024) จากนั้นตัวอย่างที่ได้จะถูกนำไปทอดด้วยเครื่องทอดสุญญากาศ ที่ความดันประมาณ 13.33 kPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้เก็บใส่ในกล่องพลาสติกปิดสนิทและเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 5-10 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์

4. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เลียนแบบจากพืชทอดกรอบ

4.1 การหดตัว (Shrinkage ratio; SR) ซึ่งในการวัดการหดตัวของผลิตภัณฑ์นั้นสามารถวัดได้โดยการวัดปริมาตรประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ (Effective volume) โดยวัดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ก่อนทอด (V_o) ด้วยถ้วยตวงมาตรฐานขนาด 100 กรัม จากนั้นวัดปริมาตรอีกครั้งของผลิตภัณฑ์หลังการทอด (V_f) ด้วยถ้วยตวงมาตรฐานเดิม (Wang *et al.*, 2017) แสดงดังสมการที่ (1)

$$\text{Shrinkage ratio (SR)} = V_o / V_f \quad (1)$$

4.2 การสูญเสียน้ำหนัก (%Weight loss) เป็นการวัดการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังการทอด ในการวัดการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์นั้นสามารถวัดได้โดยการชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนทอด (W_o) และหลังการทอด (W_f) ตามการทดลองของ Wang *et al.*, (2017) แสดงดังสมการที่ (2)

$$\text{Weight loss (\%)} = [(W_o - W_f) / W_o] \times 100 \quad (2)$$

4.3 ปริมาณการดูดซับน้ำมัน (Oil uptake) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในอาหารทอดโดยใช้วิธีการสกัดด้วย Soxhlet extraction โดยการบดตัวอย่างอาหารทอดใส่ลงใน Thimber สกัดไขมันด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมงตาม AOAC protocol (Krokida & Maroulis, 1997) นำตัวอย่างที่สกัดได้ไประเหยเอาตัวทำละลายออก ซึ่งปริมาณไขมันที่ได้แล้วนำไปคำนวณ ปริมาณไขมันที่คำนวณได้แสดงในรูปแบบน้ำหนักแห้ง (g/100 g dry basis)

4.4 ปริมาณความชื้น (Moisture content) เป็นการวัดปริมาณความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์หลังการทอดตาม AOAC protocol (Krokida & Maroulis, 1997) โดยนำตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 ± 1 องศาเซลเซียส องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปคำนวณปริมาณความชื้นโดยแสดงในรูปแบบน้ำหนักแห้ง (g/100 g dry basis)

4.5 ค่าเนื้อสัมผัส (Texture) เป็นวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์ทอดเกิดการแตกหัก (Force) ดัดแปลงตามการทดลองของ Nunes & Moreira (2009) และ Phungamngoen *et al.* (2016) ในการวัดความแข็งของผลิตภัณฑ์ทอดจะวัดโดยใช้ค่าแรงกด หรือ Force ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XTplus Texture Analyser, Stable Micro System, England) ด้วยการใส่ Load cell ขนาด 5 กิโลกรัม หัววัดแบบทรงกระบอก (Cylinder) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร บนแท่นรองฐานแบนขนาด 14×12.7 เซนติเมตร ในการทดสอบการบีบอัดผลิตภัณฑ์ทอด จะใช้ผลิตภัณฑ์ทอดจำนวน 5 ชิ้นซ้อนกัน กดด้วยแรง strain 45% ความเร็วในการบีบอัดเท่ากับ 0.6 mm/s ซึ่งค่าพีคสูงสุด (Maximum peak) ที่ได้จากราฟ จะถูกวิเคราะห์เป็น “แรง (Force)” ที่ใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์แตกหัก โดยแต่ละทริตเมนต์จะถูกทำการทดสอบ 12 ซ้ำ ณ อุณหภูมิห้อง

5. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เลียนแบบจากพืชทอดกรอบ

5.1 ค่า Glass transition เป็นการวิเคราะห์ค่า Glass transition temperature (T_g) ของผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งดัดแปลงตามการทดลองของ Silalai & Roos (2010b) โดยตัวอย่างอาหารทอดจะถูกนำมาบดให้ละเอียดเป็นผงประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถาด DSC อะลูมิเนียม (DSC Pan) ขนาด 40 μ L (Mettler Toledo-27331, Schwerzenbach, Switzerland) จากนั้นซีลปิดฝา DSC pan ให้สนิท และใช้ DSC pan ที่ว่างเปล่าเป็นตัวอย่างอ้างอิง (Reference) สำหรับการวิเคราะห์ นำตัวอย่างอาหารไปวางในเครื่อง DSC ให้ความร้อนด้วยอัตราเร็วเท่ากับ $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ตั้งแต่อุณหภูมิ -20°C ไปจนถึง 140°C ซึ่งอุณหภูมิ T_g วิเคราะห์ได้จากกราฟเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat Capacity) ของเส้นกราฟ DSC

5.2 ค่า Storage modulus (E') เป็นการศึกษา Mechanical properties ของผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) ด้วยการดัดแปลงตามการทดลองของ Silalai & Roos (2011) โดยตัวอย่างอาหารจะถูกเตรียมไว้ให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดความกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 10 x 35 x 1.2 มิลลิเมตร นำไปทอดด้วยเครื่องทอดสุญญากาศ จากนั้นนำตัวอย่างอาหารทอดแล้วไปใส่ในเครื่องวิเคราะห์ความร้อนของวัสดุเชิงกล หรือ DMA (METTLER TOLEDO รุ่น DMA/SDTA1+, Mettler Toledo Schwerzenbach, Switzerland) ด้วยโหมด Single cantilever bending ด้วยอัตราความร้อนเท่ากับ 3°C/min ตั้งแต่อุณหภูมิ -10°C ไปจนถึง 120°C ที่ความถี่ 0.5 Hz เพื่อวัดค่า Storage modulus ของอาหาร โดยค่า storage modulus ที่เริ่มเกิดการเปลี่ยน คือค่า α -Relaxation ของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะปรากฏบริเวณ Glass transition เนื่องจากโมเลกุลของอาหารมีความสามารถในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นจึงเห็นการเปลี่ยนแปลง (Roudaut *et al.*, 2004; Silalai & Roos, 2011) ในการศึกษาครั้งนี้อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของ Storage modulus ($\Delta E'$) คือ α -Relaxation temperature (T_α)

6. ศึกษาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เลียนแบบจากพืชทอดกรอบระหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอดระหว่างการเก็บรักษาสามารถวิเคราะห์ได้จากค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XTplus Texture Analyser, Stable Micro System, England) โดยนำผลิตภัณฑ์ทอดทั้ง 2 กลุ่ม (OD และ Control) บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ซีลปิดสนิทสุญญากาศ และเก็บรักษาภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ ที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส ทำการสุ่มตัวอย่างทุก 7 วัน ครั้งละ 1 ถุง เป็นระยะเวลา 35 วัน (ดัดแปลงตามวิธีของ Sinchaipanit *et al.*, 2022) จากนั้นทำการวัดค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ 2 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิบริเวณ T_g (35 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิเหนือ T_g (45 องศาเซลเซียส) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเนื้อสัมผัสกับสมบัติทางกลบริเวณเหนือ T_g ของผลิตภัณฑ์ทอด

Results

1. การเปลี่ยนแปลงสมบัติทาง Physical properties ของผลิตภัณฑ์

1.1 การหดตัว (Shrinkage ratio) และการสูญเสียน้ำหนัก (%Weight loss)

ผลของวิธีการเตรียมก่อนการทอด (Pre-treatment frying method) ส่งผลต่ออัตราส่วนของการหดตัว (shrinkage ratio) และการสูญเสียความชื้น (%weight loss) ดังใน Table 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดองน้ำออกก่อนการทอดด้วยวิธีออสโมซิส (OD) ช่วยลดอัตราการหดตัว (Shrinkage ratio) ของผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อน (Control) โดยอัตราการหดตัวของกลุ่ม Control มีค่าเท่ากับ 2.53±0.15 ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนด้วยวิธีออสโมซิส (OD) ที่มีค่าเท่ากับ 1.29±0.08 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ร้อยละการสูญเสีย (%weight loss) ของผลิตภัณฑ์หลังการทอดมีค่าตรงกันข้ามกับอัตราส่วนของการหดตัว โดยร้อยละการสูญเสียของผลิตภัณฑ์กลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อน (Control) มีค่าต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการ

ดิ่งน้ำออกก่อนการทอดด้วยวิธี OD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control ที่มีค่าร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 88.6 ± 0.82 ส่วนผลิตภัณฑ์ทอดที่มีการดิ่งน้ำออกก่อนการทอดด้วยวิธี OD มีค่าร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 93.4 ± 0.51

Table 1 Shrinkage ratio and weight loss of plant-based crisps

Pre-Treatment Method	Shrinkage ratio*	Weight loss (%)*
Control	2.53 ± 0.15	88.6 ± 0.82
Osmotic dehydration (OD)	1.29 ± 0.08	93.4 ± 0.51

Note: * There was significantly different in the vertical ($p \leq 0.05$).

1.2 ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณการดูดซับน้ำมัน (Oil uptake) และเนื้อสัมผัส (Texture)

ผลของการทอดตัวและร้อยละการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ที่มีความสอดคล้องกับปริมาณความชื้นและไขมันในผลิตภัณฑ์หลังการทอด โดยพบว่า ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.15 ± 0.50 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดิ่งน้ำออกก่อนการทอดด้วยวิธี OD มีปริมาณความชื้นร้อยละ 3.22 ± 0.54 ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกับปริมาณไขมันที่พบในผลิตภัณฑ์หลังการทอด โดยผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีปริมาณไขมันในสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการดิ่งน้ำออกด้วยการวิธี OD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีปริมาณไขมัน เท่ากับร้อยละ 4.36 ± 0.18 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่มีการดิ่งน้ำออกด้วยการวิธี OD ที่มีปริมาณไขมันร้อยละ 3.42 ± 0.26 (Table 2)

นอกจากนั้นผลด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังการทอดจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture ซึ่งจะอธิบายถึงแรง (Force) ที่ใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์ทอดแตกหัก พบว่า ค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีค่าสูงกว่าค่า Force ของผลิตภัณฑ์ที่มีการดิ่งน้ำออกด้วยการวิธี OD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีค่าเท่ากับ 214.96 ± 1.17 N ในขณะที่ค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดที่มีการดิ่งน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD มีค่าเท่ากับ 115.20 ± 1.20 N (Table 2) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีความเหนียวแข็ง หรือ soggy มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการดิ่งน้ำออกด้วยการวิธี OD เนื่องจากปริมาณความชื้นและไขมันที่หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ (Table 2) จึงต้องใช้แรงค่อนข้างมากในการทำลายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ทอด ในขณะที่ใช้แรงเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำลายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่ผ่านการดิ่งน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD ได้

Table 2 Moisture content and oil uptake of plant-based crisps

Pre-Treatment Method	Moisture content (%)*	Oil content (%)*	Force (N)*
Control	5.15 ± 0.50	4.36 ± 0.18	214.96 ± 1.17
Osmotic dehydration (OD)	3.22 ± 0.54	3.42 ± 0.26	115.20 ± 1.20

Note: * There was significantly different in the vertical ($p \leq 0.05$).

2. การเปลี่ยนแปลงสมบัติทาง Thermal properties ของผลิตภัณฑ์หลังการทอด

จากการศึกษาผลของวิธีการเตรียมก่อนการทอดต่อสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ผลิตภัณฑ์หลังการทอด โดยการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลแบบไดนามิกด้วยเครื่อง DMA เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ Storage modulus หรือ $\Delta E'$ ของผลิตภัณฑ์หลังการทอด ร่วมกับการวิเคราะห์ค่า Glass transition temperature (T_g) ของผลิตภัณฑ์ทอดด้วยเครื่อง DSC ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ทอดทั้ง 2 กลุ่มมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีค่าเท่ากับ 31.14 ± 0.82 °C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD (41.17 ± 0.58 °C) จะเห็นได้ว่ากระบวนการดองน้ำออกก่อนจะช่วยลด Plasticizer ในผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการทอดมีค่า T_g ที่สูงขึ้น

นอกจากนั้นกระบวนการดองน้ำออกยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า Storage modulus ($\Delta E'$) ในผลิตภัณฑ์ทอดอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าบริเวณเหนือ T_g ค่า Storage modulus (E') ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่มควบคุม (Control) ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ค่า E' ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD ลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งพิจารณาได้จากค่าการเปลี่ยนแปลงของ Storage modulus หรือ $\Delta E'$ โดยค่า $\Delta E'$ ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่มควบคุม (Control) มีค่าเท่ากับ 5.02×10^9 Pa ซึ่งมากกว่าค่า $\Delta E'$ ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD (1.51×10^9 Pa) ซึ่งอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของ Storage modulus คือ α -relaxation temperature (T_α) ของผลิตภัณฑ์ทอด ดังนั้นค่า T_α ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีค่าเท่ากับ 41.13 ± 0.83 °C จึงมีค่าต่ำกว่า T_α ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60.93 ± 0.88 °C (Figure 1)

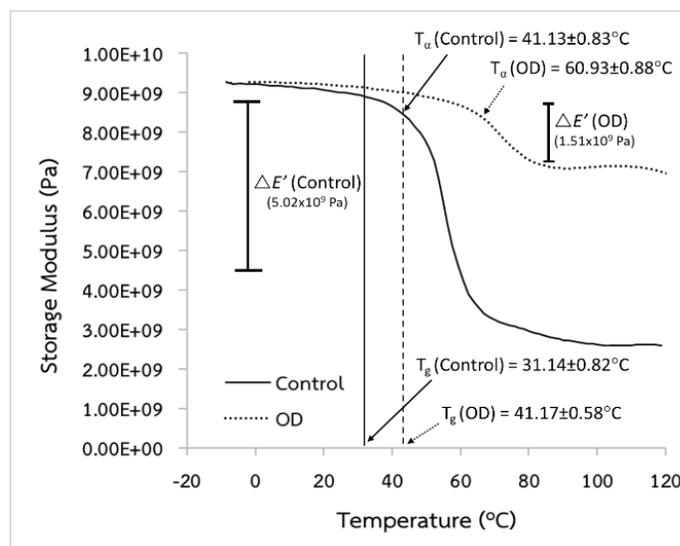


Figure 1 Storage modulus (E') of plant-based crisps determined by DMA at frequency of 0.5 Hz with heating rate at 3°C/min

3. คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทอดระหว่างการเก็บรักษา

ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD และผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทอดในระหว่างการเก็บรักษา โดยพบว่าค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกด้วยวิธี OD และผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control ที่เก็บรักษา ณ อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลานาน 35 วัน มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ในขณะที่เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45°C มีค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีค่าสูงขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ส่วนค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนด้วยวิธี OD มีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นเล็กน้อยระหว่างการเก็บรักษา (Figure 2)

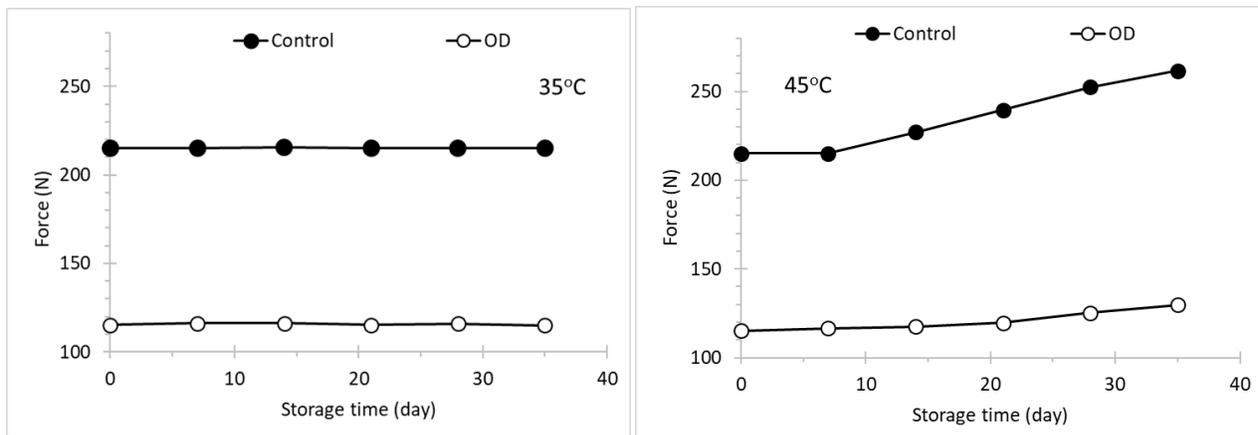


Figure 2 Changes in hardness of plant-based crisps during 35-day storage at 35°C and 45°C

Discussion

1. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองพบว่าการดองน้ำออกก่อนการทอดด้วยวิธีออสโมซิส (OD) ช่วยลดอัตราการหดตัว (Shrinkage ratio) เนื่องจากกระบวนการดองน้ำออกโดยอาศัยแรงดันออสโมซิส (osmotic dehydration) เป็นการดึงน้ำออกบางส่วนจากภายในชิ้นอาหารสู่ผิวของอาหาร ทำให้มีน้ำในโครงสร้างของอาหารลดน้อยลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แห้งอีกทั้งโครงสร้างของอาหารแน่นและแข็งแรงขึ้น ซึ่งการที่โครงสร้างของอาหารมีความแข็งแรงจะสามารถช่วยป้องกันหรือลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการทอดได้ (Krokida & Maroulis, 1997; Barati & Esfahani, 2012; Dziki, 2020; Osaie *et al.*, 2020; Devi *et al.*, 2021; Kwaw *et al.*, 2024) ซึ่งก็สอดคล้องกับผลของร้อยละการสูญเสีย ปริมาณความชื้นและไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วย โดยผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านการดองน้ำออกด้วยวิธี OD มีร้อยละการสูญเสียมาก แต่มีปริมาณความชื้นและไขมันน้อยกว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม Control อีกทั้งกระบวนการทอดที่ใช้ในการทดลองเป็นกระบวนการทอดแบบสุญญากาศ ซึ่งมีหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับน้ำมันภายใต้สุญญากาศ ทำให้จุดเดือดของน้ำมันภายใต้สภาวะสุญญากาศ

ลดลงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส รวมทั้งสมบัติทางความร้อนของน้ำในอาหารก็จะถูกลดต่ำลงด้วย ดังนั้นน้ำสามารถระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้สูญญากาศที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 70-90 องศาเซลเซียส จึงช่วยลดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเนื้อเยื่อในอาหารจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆได้ รวมทั้งช่วยลดปริมาณการดูดซับน้ำมันของอาหาร ความชื้น และการหดตัวของผักและผลไม้จึงสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ดี (Yamsaengsung *et al.*, 2008; Andres-Bello *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2018; Assawarachan & Tantikul, 2020; Su *et al.*, 2021)

นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านการดองน้ำออกด้วยวิธี OD มีความแข็งแรงมากกว่าผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control ซึ่งวัดได้จากค่า Force ที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ทอด โดยค่า Force ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านการดองน้ำออกด้วยวิธี OD มีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control เนื่องจากผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านการดองน้ำออกด้วยวิธี OD มีปริมาณความชื้นที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งการลดความชื้นในระหว่างการทอดแบบสูญญากาศนั้นสามารถเร่งอัตราการถ่ายโอนความชื้นออกจากเนื้อเยื่อภายในโครงสร้างอาหารและที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์ทอดที่ได้มีลักษณะแห้งและกรอบขึ้น (Yamsaengsung *et al.*, 2008; Andres-Bello *et al.*, 2010; Assawarachan & Tantikul, 2020) และจากการทดลองของ Nunes & Moreira (2009) พบว่า ความชื้นที่ถูกกำจัดออกจากผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็วในกระบวนการทอดทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการทอดมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แห้งเปราะ (brittle) ส่งผลให้ค่า Hardness ที่วัดได้ลดลง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารละลาย (เกลือ/น้ำตาล) และเวลาที่ใช้ในการทำ Osmotic dehydration รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดก็ส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน (van Koerten *et al.*, 2015; Adedeji & Ngadi, 2018; Piyalungka *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2021)

2. Thermal properties ของผลิตภัณฑ์หลังการทอด และการเปลี่ยนแปลงทางด้านเนื้อสัมผัสบริเวณ

glass transition temperature

การที่ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนมีค่าสูงกว่า T_g ของผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดองน้ำออกก่อนจะช่วยลดปริมาณความชื้นหรือน้ำที่ทำหน้าที่เป็น Plasticizer ซึ่งจะส่งผลต่อการลดลงของค่า T_g ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดได้ (Silalai & Roos, 2010b) นอกจากนี้จะมีสมบัติเป็น Plasticizer ที่ไปลดค่า Glass transition temperature (T_g) ของผลิตภัณฑ์แล้ว ยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์อาหารได้เช่นกัน ขณะเดียวกันกระบวนการทอดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์อาหารได้ ซึ่งการที่โมเลกุลของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทอดนั้นเกิดจากกระบวนการที่เรียกว่า Thermal plasticization โดยความร้อนจะทำให้โครงสร้างของอาหารเปลี่ยนแปลงจากที่อยู่ในรูปอสัณฐานวิทยา (Silalai & Roos, 2010b; Silalai & Roos, 2011) โดยกระบวนการดองน้ำออกก่อนทอดสามารถช่วยให้ผลิตภัณฑ์ทอดที่ได้มีความกรอบขึ้นเนื่องจากน้ำในโครงสร้างที่น้อยลงส่งผลให้โครงสร้างของอาหารมีความแน่นขึ้น ดังนั้นเมื่ออาหารได้รับความร้อนในระหว่างการทอดจึงทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Molecular mobility) ในอาหารน้อยกว่าอาหารที่มีโครงสร้างแบบหลวมๆหรือที่มีรูพรุนในโครงสร้างซึ่งจุดนี้อาจจะส่งผลให้เกิดการดูดซับของน้ำมันเข้ามาในโครงสร้างอาหารที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อนได้มากขึ้น ในระหว่างการทอดทำให้ผลิตภัณฑ์ทอดที่ได้มีลักษณะอ่อนหรือนิ่มขึ้นซึ่งพิจารณาได้จากผลของปริมาณไขมันและค่า Force ที่วิเคราะห์ได้ข้างต้น ซึ่งค่าเหล่านี้ก็มีสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของ Mechanical properties หรือ α -relaxation behavior

ในผลิตภัณฑ์ทอด โดยจะเห็นได้ว่าบริเวณเหนือ T_g นั้น การเปลี่ยนแปลงของค่า Storage modulus หรือ $\Delta E'$ ในผลิตภัณฑ์ทอดกลุ่ม Control มีค่ามากกว่า $\Delta E'$ ของผลิตภัณฑ์ทอดที่ผ่านกระบวนการดองน้ำออกก่อน (OD)

นอกจากนั้นค่า Force ที่วัดได้ของผลิตภัณฑ์ทอดครบทั้ง 2 กลุ่ม มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา โดยอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่อยู่ใกล้ค่า T_g จะมีค่า Force เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของ Storage modulus บริเวณ Glass transition อันเนื่องมาจาก Thermal plasticization ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นสมบัติทางความร้อนของ Glass transition และ Mechanical properties นี้ก็นำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอดครบในระหว่างกระบวนการแปรรูปและเก็บรักษาได้

Conclusions

กระบวนการดองน้ำออกก่อนการทอดจะส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทอด และยังช่วยลดความชื้นและการอมน้ำมันในผลิตภัณฑ์ทอด นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ทอดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ชะลอการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอดครบในระหว่างการเก็บรักษาได้นานขึ้น อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล (mechanical property) บริเวณ glass transition หรือ α -relaxation behavior มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอด เช่น ความกรอบของผลิตภัณฑ์ทอดในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา ซึ่งจากข้อมูลที่ได้พอจะสรุปได้ว่ากระบวนการทอดและเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g จะทำให้โครงสร้างอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายจากลักษณะ Molecular mobility และทำให้น้ำมันมีโอกาสซึมเข้าไปในโครงสร้างอาหารระหว่างการทอดได้ง่ายขึ้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซับน้ำมันมากและจะส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพในระหว่างการเก็บรักษาได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นเป็นแนวทางในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์อาหารทอดครบในระหว่างการแปรรูปและเก็บรักษา รวมถึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ทอดครบให้ยาวนานขึ้นได้

Acknowledgments

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในส่วนของงานมูลฐาน (Fundamental Fund) และขอขอบคุณสำนักส่งเสริมและพัฒนางานวิจัย มหาวิทยาลัยสยาม ผู้ประสานงานระหว่างสำนักงานส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) กับคณะกรรมการส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยสยาม ในการดำเนินการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการทุน

References

Adedeji, A.A., & Ngadi, M. (2018). Impact of freezing method, frying and storage on fat absorption kinetics and structural changes of parfried potato. *Journal of Food Engineering*, 218, 24-32.

- Andrés-Bello, A., García-Segovia, P., & Martínez- Monzó, J. (2010). Vacuum frying process of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) fillets. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 11, 630-633.
- Assawarachan, I., & Tantikul, S. (2020). Vacuum frying technology. *Vocational Education Innovation and Research Journal*, 5(2), 124-136.
- Barati, E., & Esfahani, J. (2012). Mechanical simulation of convective drying: spatially distributed temperature and moisture in carrot slab. *International Journal of Thermal Sciences*, 56, 86-94.
- Dagevos, H. (2021). Finding flexitarians: Current studies on meat eaters and meat reducers. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 530-539.
- Dehghannya, J., & Abedpour, L. (2018). Influence of a three stage hybrid ultrasound-osmotic-frying process on production of low-fat fried potato strips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1485-1491.
- Devi, S., Zhang, M., Ju, R., & Bhandari, B. (2021). Recent development of innovative methods for efficient frying technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(22), 3709-3724.
- Dziki, D. (2020). Recent trends in pretreatment of food before freeze-drying. *Processes*, 8 (1661), 1-18.
- Dueik, V., & Bouchon, P. (2011). Vacuum frying as a route to produce novel snacks with desired quality attributes according to new health trends. *Journal of Food Science*, 76(2), E188-95.
- Granda, C., Moreira, R.G., & Tichy, E. (2004). Reduction of acrylamide formation in potato chips by low-temperature vacuum frying. *Journal of Food Science* 69, 405-411.
- Krokida, M.K., & Maroulis, Z.B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, 10 (15), 1145-1155.
- Kwaw, E., Osae, R., Apaliya, M.T., Sackey, A.S., Alolga, R.N., Kaburi, S.A., Hinson, M., Bediako, G., Botwe, A.K., & Pitcher, V.M. (2024). Effect of different pre-treatments on the physical properties, frying kinetics and organoleptic physiognomies of fried sweet potato (*Ipomoea batatas*) chips. *Food and Humanity*, 3, 1-8.
- Liberty, J.T., Dehghannya, J., & Ngadi, M.O. (2019). Effective strategies for reduction of oil content in deep-fat fried foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 92, 172-183.

- Llavata, B., García-Pérez, J.V., Simal, S., & Cárcel, J.A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20-26.
- Nakraksa, W. (1993). Study on taro flour, mungbean protein isolate and white sesame used in meat analogue production. *King Mongkut's Agricultural Journal*, 13, 14-25. (in Thai)
- Negoita, M., Mihai, A.L., & Hornet, G.A. (2022). Influence of water, NaCl and citric acid soaking pre-treatments on acrylamide content in french fries prepared in domestic conditions. *Foods*, 11(9), 1204, 1-21.
- Nunes, Y., & Moreira, R.G. (2009). Effect of osmotic dehydration and vacuum-frying parameters to produce high-quality mango chips. *Journal of Food Science*, 74(7), E355-362.
- Oladejo, A.O., Ma, H., Qu, W., Zhou, C., Wu, B., Uzoejinwa, B.B., Onwude, D.I., & Yang, X. (2017). Application of pretreatment methods on agricultural products prior to frying: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(2), 456-466.
- Osaе, R., Essilfie, G., Alolga, R.N., Akaba, S., Song, X., Owusu-Ansah, P., & Zhou, C. (2020). Application of non-thermal pretreatment techniques on agricultural products prior to drying: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100 (6), 2585-2599.
- Phungamngoen, C., Chanapanpan, C., Jaksingto, P., Sikanon, S., & Suwan, T. (2016). Drying process development of instant rice product: Effects of methods and drying temperature. *Burapha Science Journal*, 21(2), 47-60. (in Thai).
- Piyalungka, P., Sadiq, M.B., Assavarachan, R., & Nguyen, L.T. (2019). Effects of osmotic pretreatment and frying conditions on quality and storage stability of vacuum-fried pumpkin chips. *International Journal of Food Science and Technology*, 54, 2963-2972.
- Quan, X., Zhang, M., Fang, Z., Liu, H., Shen, Q., & Gao, Z. (2016). Low oil French fries produced by combined pre-frying and pulsed-spouted microwave vacuum drying method. *Food and Bioproducts Processing*, 99, 109-115.
- Roos, Y.H. (1995). *Phase Transitions in Foods*. San Diego, CA.: Academic Press, Inc.

- Roos, Y.H. (2012). Phase and state transitions and related phenomena in foods. In B. Bhandari, & Y.H. Roos (Eds.), *Food Materials Science and Engineering* (pp. 136-150). Oxford, United Kingdom; Blackwell Publishing Ltd.
- Roudaut, G., Simatos, D., Champion, D., Contreras-Lopez, E., & Le Meste, M. (2004). Molecular mobility around the glass transition temperature. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5, 127–134.
- Shyu, S.L. & Hwang, L.S. (2001). Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips. *Food Research International* 34, 133-142.
- Silalai, N., & Roos, Y.H. (2010a). Dielectric and mechanical properties around glass transition of milk powders. *Drying Technology*, 28, 1044-1054.
- Silalai, N., & Roos, Y.H. (2010b). Roles of water and solids composition in the control of glass transition and stickiness of milk powders. *Journal of Food Science*, 75(5), 285-296.
- Silalai, N., & Roos, Y.H. (2011). Mechanical α -relaxations and stickiness of milk solids/maltodextrin systems around glass transition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(14), 2529-36.
- Sinchaipanit, P., Peasura, N., Sangsuriyawong, A., & Disnil, S. (2022). Testing the shelf life of food products under accelerated temperature. *Burapha Science Journal*, 27(3), 1930-1949. (in Thai).
- Su, Y., Zhang, M., Chitrakar, B., & Zhang, W. (2021). Reduction of oil uptake with osmotic dehydration and coating pre-treatment in microwave-assisted vacuum fried potato chips. *Food Bioscience*, 39(100825), 1-9.
- Takeda, K., Miyazaki, S., Okamoto, T., Imanaka, H., Ishida, N., & Imamura, K. (2023). Water sorption and glass-to-rubber transition of amorphous sugar matrices, vacuum foam- and spray-dried from alcohols. *Journal of Food Engineering*, 349(4) . doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111483
- van Koerten, K.N., Schutyser, M.A.L., Somsen, D., & Boom, R.M. (2015). Crust morphology and crispiness development during deep-fat frying of potato. *Food Research International*, 78, 336-342.
- Wang, J., Yang, X.H., Mujumdar, A., Wang, D., Zhao, J.H., Fang, X.M., Zhang, Q., Xie, L., Gao, Z.J., & Xiao, H.W. (2017). Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical

contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum L.*). *LWT-Food Science and Technology*, 77, 337-347.

Wu, D., Cao, Y., & Huang, Q. (2023). Trehalose and sodium pyrophosphate inhibit ice-induced freezing quality deterioration of surimi: A comparative study on water migration, ice crystal growth, glass transition and state diagram. *Journal of Food Engineering*, 357. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111657

Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T., Ciais, P., Tubiello, F.N., Smith, P., Campbell, N., & Jain, A.K. (2021). Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food*, 2, 724–732.

Yamsaengsung, R., Rungsee, C., & Prasertsit, C. (2008). Simulation of the heat and mass transfer processes during the vacuum frying of potato chips. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 30, 109-115.

Zhang, Y., Zhang, T., Fan, D., Li, J., & Fan, L. (2018). The description of oil absorption behavior of potato chips during the frying. *LWT-Food Science and Technology*, 96, 119-126.