การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

Optimization of crispy pork stick production by microwave heating using the response surface method

นันทา เป็งเนตร์ และดรุณี นาคเสวี*[1]

Nantha Pengnet[1*] and Darunee Naksavi[1]

Received: 11 September 2024 ; **Revised**: 20 December 2024 ; **Accepted**: 23 January 2025

บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบเป็นโจทย์วิจัยที่ทางผู้ประกอบการ บริษัทร้องกวาง กรีนฟู้ด จำกัด ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อหมูแปรรูปในรูปแบบใหม่ที่อุดมไปด้วยคุณค่าอาหารและสามารถทานร่วมกับอาหารเช้าได้ในสภาวะที่เร่งรีบของการใช้ชีวิตประจำวัน งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟเพื่อวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ โดยการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ ปริมาณเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส (X_3) ออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) และแปรผันตัวแปรในแต่ละปัจจัยประกอบด้วยปริมาณเนื้อหมู 70.0-75.0% (w/w) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 4.0-8.0% (w/w) และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส 0.18-0.22% (w/w) ผลการศึกษาพบว่าค่าความแข็ง (Y_1) และค่าปริมาณความชื้น (Y_5) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9996 และ 0.9659 ตามลำดับ การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการทำนาย (lack of fit) พบว่าโมเดลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ค่าที่ได้จากสมการทำนายประกอบด้วยปริมาณเนื้อหมู 70% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 7.57% และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส 0.18% คุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย ค่าพลังงานทั้งหมด 412 กิโลแคลอรี พลังงานจากไขมัน 104 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 11.5 กรัม ไขมันอิ่มตัว 4.25 กรัม โคเลสเตอรอล 79.8 มิลลิกรัม โปรตีน 52.3 กรัม คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 24.8 กรัมและใยอาหาร 0.61 กรัมต่อตัวอย่าง 100 กรัม ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน ขนาดบรรจุ 30 กรัม มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 18.5 เดือน และมีค่า aw เท่ากับ 0.28 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผู้ประกอบการสามารถนำผลิตภัณฑ์ใหม่ที่พัฒนามาดำเนินการต่อยอดในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: หมูแท่งอบกรอบ, ไมโครเวฟ, โปรตีนถั่วเหลือง, คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส, วิธีการทางพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

The development of crispy pork stick products is a research topic that Songkwang Green Food Co., Ltd. wanted to develop a new processed pork product that is rich in nutrients and can be eaten with breakfast in the hustle and bustle of daily life. This research aimed to determine the optimization conditions of the crispy pork sticks process with the microwave method, which analyzed the nutritional value and shelf life. The central composite design (CCD) was designed with the variables in each factor including 70.0-75.0% pork (w/w), 4.0-8.0% soy protein extract (w/w), and carboxymethyl cellulose 0.18-0.22% (w/w). The lack of fit test showed that the model did not differ statistically significantly ($p>0.05$), and the value obtained from the prediction equation consisted of 70% pork, 7.57% soy protein extract, and 0.18% carboxymethylcellulose. The product had the energy from fatty 104 kcal, total fat 11.5 g, saturated fat 4.25 g,

[1] คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

[1] Faculty of Agriculture, Uttaradit Rajabhat University, Muang District, Uttaradit, 53000

* Corresponding author, e-mail: darunee.nak@uru.ac.th

cholesterol 79.8 mg, protein 52.3 g, total carbohydrate 24.8 g, and dietary fiber 0.61 g / 100 g sample, respectively. The crispy pork sticks packaged in nitrogen-filled aluminum foil bags (30 g) had a shelf life of 18.5 months, and the aw was 0.28 at 35 °C. The entrepreneurs can take the newly developed and commercialized products.

Keywords: Crispy pork stick, microwave, soy protein, carboxymethyl cellulose, response surface methodology

บทนำ

บริษัทร้องกวาง กรีนฟู้ด จำกัด จัดตั้งโดยคุณธงไชยพัฒน์ ติลาธนาชัยและหุ้นส่วนธุรกิจ เป็นผู้ประกอบการที่เริ่มต้นการทำธุรกิจแปรรูปเนื้อสัตว์ มีแนวความคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบ (crispy pork stick) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อหมูแปรรูปที่ไม่ใช้วิธีการทอดแต่จะใช้วิธีการอบจนสุก เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่เน้นการรับประทานอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ลดการสะสมของไขมันเนื่องจากการทอด ประกอบด้วยแหล่งโปรตีนสูง ผลิตภัณฑ์ยังรับประทานง่าย (ready to eat) สะดวกสบายต่อการบริโภค (convenience in consumption) และเป็นรูปแบบใหม่ของสินค้าที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในยุคดิจิตอล

ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปไขมันต่ำเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เนื่องจากการบริโภคไขมันจากเนื้อสัตว์ในปริมาณมากนำไปสู่การเกิดโรคในมนุษย์ ปัจจุบันมีการใช้สารทดแทนไขมัน (fat replacer) ในผลิตภัณฑ์อาหารอย่างกว้างขวาง เพื่อลดหรือทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปส่งผลให้ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องใช้ส่วนผสมอาหารที่ให้สมบัติทางหน้าที่คล้ายไขมัน (functional ingredient) เช่น โปรตีน แป้ง และสารให้ความข้นหนืดหรือความคงตัว (thickening agent or stabilizer) ได้แก่ บุก กัม คาราจีแนน เพกติน และเจลาติน (Hurler, 2012) ผลิตภัณฑ์เนื้อที่อยู่ในกลุ่มเนื้อบดละเอียดแบบอิมัลชันเกิดจากการลดขนาดของเนื้อสัตว์ให้มีขนาดย่อยเล็กลงด้วยการบดสับให้ละเอียด ลักษณะการเกิดอิมัลชันในผลิตภัณฑ์เนื้อ (emulsion meat หรือ meat batter) ทำให้สามารถรักษาเสถียรภาพได้โดยที่อนุภาคของไขมันไม่แยกชั้นออกมารวมกัน เนื่องจากอนุภาคไขมันถูกกักไว้ภายในโครงร่างตาข่าย 3 มิติของโปรตีนเจล (gelled protein - water matrix) ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของโปรตีนไมโอซินที่หุ้มอนุภาคไขมันด้วยความร้อนในขณะสับผสมและขณะทำให้สุก (André & Shai, 1997)

คาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส (carboxy methyl cellulose) เป็นพอลิเมอร์ประจุลบที่ละลายน้ำได้ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) กับโปรตีนจากเนื้อสัตว์โดยการเชื่อมข้าม (cross-link) กับประจุบวกของหมู่คาร์บอกซิ (carboxyl group) ที่เป็นโครงสร้างของกรดอะมิโนในโปรตีนไมโอไฟบริลา (myofibrillar protein) ปฏิสัมพันธ์นี้สามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์ (Minyi & Hanne, 2017) มีการนำคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสมาเป็นสารทดแทนไขมันในไส้เนื้อทอดเพื่อปรับปรุงลักษณะทางประสาทสัมผัส ได้แก่ เนื้อสัมผัส สี รสชาติ และความชุ่มฉ่ำ ระดับความเข้มข้นของคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นสารทดแทนไขมัน คือ 0.5%-3.0% แต่การใช้คาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสเป็นสารทดแทนไขมันที่ระดับมากกว่า 0.5% ทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ คุณภาพทางประสาทสัมผัส และเนื้อสัมผัสเมื่อผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อน (Monika *et al*., 2015) ในการปรับโครงสร้างของไขมันหรือการทดแทนไขมันด้วยองค์ประกอบอื่น เช่น สารละลายไฮโดรคอลลอยด์ ทำให้เกิดส่วนเกินของน้ำในระบบอิมัลชันและเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อมีลักษณะเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไปในทางไม่พึงประสงค์ การเติมโปรตีนจากนมหรือโปรตีนถั่วเหลืองสามารถเปลี่ยนโครงสร้างร่างแหของโปรตีนระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปมีเนื้อสัมผัสดีขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแน่น เด้ง และมีความแข็งแรงของเจลที่มากขึ้น (Asuming-Bediako *et al*., 2014)

กลไกการจับไขมันและรักษาเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปแบบอิมัลชันมีบทบาทสำคัญ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เนื้อบดลดขนาดส่วนใหญ่ประกอบ ด้วยไขมัน 20-35% และโปรตีน 10-15% โดยน้ำหนัก ซึ่งโปรตีนในผลิตภัณฑ์จะทำหน้าที่รักษาน้ำหนักให้เป็นปกติ 50-60% ของน้ำหนักสูตรผลิตภัณฑ์ ในขั้นตอนระหว่างการแปรรูปส่วนใหญ่เกิดปัญหาการแยกชั้นของอิมัลชัน เกิดการแยกตัวของชั้นไขมันในระหว่างการปรุงสุกทำให้เกิดการสูญเสียที่มีมูลค่ามากโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมอาหารขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ โดยการตรวจสอบการแปรผันปริมาณของสูตรที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณเนื้อหมู โปรตีนถั่วเหลืองและคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสที่ส่งผลต่อคุณภาพทางด้านเคมีกายภาพโดยใช้วิธีการตอบสนอง เพื่อพัฒนาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบที่มีปริมาณไขมันลดลงโดยการใช้คาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสเป็นสารทดแทนไขมันและโปรตีนถั่วเหลืองทำหน้าที่ปรับปรุงเนื้อสัมผัสและการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

การทดลอง

1. การเตรียมวัตถุดิบและการกำหนดสภาวะของการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

เนื้อหมูตัดแต่งในส่วนสันนอกซื้อจากตลาดสดเทศบาลอำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน นำมาหั่นเป็นชิ้นและบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Multifunctional cutter รุ่น QS5A เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาทำการผลิตโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสจากบริษัทพีทีเคโซลูชั่น แอนด์ซัพพลายส์ จำกัด ประเทศไทย

กำหนดปัจจัยของการศึกษากระบวนการผลิตโดยนำสูตรพื้นฐานของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบประกอบด้วยเนื้อหมู โปรตีนถั่วเหลืองสกัด คาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส และเครื่องปรุงรส นำมาบดผสมด้วยเครื่อง Multifunctional cutter รุ่น QS5A เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแท่งโดยกำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งครั้งที่หนึ่งโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และพักให้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการอบแห้งครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และนำผลิตภัณฑ์ไปอบด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที กระบวนการผลิตในงานวิจัยนี้ได้รับการออกแบบโดยอิงจากผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ (นันทา เป็งเนตร์ และคณะ, 2563) ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการที่ตอบสนองต่อความต้องการทางเทคโนโลยี ผลิตภัณฑ์ที่ได้บรรจุใส่ถุงอลูมิเนียมฟอยล์และรอการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ

ปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ ปริมาณเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส (X_3) โดยออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) ทำการแปรผันระดับตัวแปรในแต่ละปัจจัย ดังนี้ ปริมาณเนื้อหมู 70.0-75.0% (w/w) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 4.0-8.0% (w/w) และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส 0.18-0.22% (w/w) ทำการศึกษาปัจจัยละ 5 ระดับ (ค่ารหัส -1.414, -1, 0, 1, 1.414) โดยทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง (ค่ารหัส 0) จำนวน 2 ซ้ำ รวมได้ 12 สิ่งทดลอง

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมทางด้านเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

นำผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ ได้แก่ การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยวิธี AOAC (2000) การวิเคราะห์ค่าสี L* a* b* โดยเครื่องวัดค่าสี Hunter Lab ยี่ห้อ Colour flex รุ่น miniscan Xp plus และค่าความแข็ง (hardness) โดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA.Xplus (Stable Micro System, England) ทำการวัดตัวอย่าง 5 ซ้ำ ใช้หัววัด knife edge with slotted Insert (HDP/BS) ใช้แรง 25 kg test speed เท่ากับ 2.0 mm/s post test เท่ากับ 10.0 mm/s ระยะห่างเท่ากับ 5 mm และ Trigger force เท่ากับ 25 g รายงานผลในหน่วย kgf/mm^2

การคัดเลือกตัวแปรตอบสนองในการสร้างแบบจำลองสมการทำนายค่าตอบสนอง การวิเคราะห์สมการแบบถดถอยแบบพหุ (multiple linear regression) เพื่อทดสอบความเหมาะสม (lack of fit) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการตอบสนอง แบบสมการพหุนามกำลังสอง (second-order polynomial) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=i+1}^{3} \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากแบบจำลอง

$\beta_0 \beta_i \beta_{ii} \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของจุดตัดแกน Y สมการเส้นตรงสมการอันดับสองและเทอมอิทธิพลร่วม

ในการประเมินสภาวะที่เหมาะสมต่อการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบจากการสร้างแบบจำลองสมการทำนายค่าตอบสนองดำเนินการโดยใช้เกณฑ์ในด้านของค่าความแข็งที่มีค่าสูงสุดและปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ ในการทวนสอบความแม่นยำของสมการที่ทำนายโดยการทำการทดลองซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Yexp) และแทนค่าตัวแปรที่ศึกษา (X_{1-3}) ในสมการที่วิเคราะห์ได้ และมีความน่าเชื่อถือ เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (Ypred) คำนวณค่า Root Mean Square (RMS) ซึ่งบ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการทำนายจาก สมการ (2)

$$RMS = 100 \frac{\sqrt{\sum\left[\frac{(Yexp - Ypred)}{Ypred}\right]^2}}{N} \quad (2)$$

เมื่อ Yexp คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง

Ypred คือ ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ตามฉลากโภชนาการ ได้แก่ ค่าพลังงานทั้งหมด พลังงานจากไขมัน ไขมันทั้งหมดและไขมันอิ่มตัว โคเลสเตอรอล โปรตีน คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ใยอาหาร น้ำตาล โซเดียม วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 แคลเซียมและเหล็ก โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบดำเนินการโดยบรรจุผลิตภัณฑ์ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน (N_2) น้ำหนักโดยปริมาณของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 30 กรัม ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 สัปดาห์ สุ่มตัวอย่างตรวจสอบคุณภาพ ได้แก่ ค่าสี L* a* b* โดยเครื่องวัดค่าสี Hunter Lab ยี่ห้อ colour flex รุ่น miniscan Xp plus ค่า water activity (a_w) ด้วยเครื่อง AQUALAB รุ่น series 3 ค่าความแข็ง (hardness) โดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA.Xplus ยี่ห้อ Stable Micro System และค่า thiobarbituric acid-reactive substance (TBARs) โดยใช้วิธีดัดแปลงจาก Wenjiao (2013) และการทำนายอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะเร่งโดยใช้ค่า Q10 (Accelerated shelf-life testing) (Phimolsiripol and Suppakul, 2016)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณในรูปของพื้นที่ตอบสนองด้วยโปรแกรม Design Expert 5 Software (StatEase, Inc. Minne-apolis, MN, USA) เพื่อหาความสัมพันธ์สมการถดถอยแบบพหุ เพื่อทดสอบความเหมาะสม (lack of fit) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determinate; R^2) ของสมการที่ตอบสนองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของตัวแปรตอบสนองที่ใช้เป็นค่าสหสัมพันธ์ในการเลือกค่าตอบสนอง (Y)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมทางด้านเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

การผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นที่ผิวตอบสนองจากการแปรผันปริมาณของเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส (X_3) ที่มีต่อค่าความแข็ง ค่าสี L* a* b* และค่าปริมาณความชื้น (Table 1) ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุแบ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear effect) ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic effect) และอิทธิพลระหว่างปัจจัย (interaction effect) โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือเทอมกำลังหนึ่ง (X_1,X_2,X_3) ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหรือเทอมกำลังสอง (X_1^2, X_2^2, X_3^2) และอิทธิพลระหว่างปัจจัยหรือเทอมที่มีอิทธิพลร่วมกัน (X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3) โดยการประเมินทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการพบว่า ค่าความแข็ง (Y_1) และค่าปริมาณความชื้น (Y_5) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9996 และ 0.9659 ตามลำดับ (Table 2) การพิจารณาความน่าเชื่อถือของสมการจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ถ้าค่าตัวเลขเข้าใกล้ 1 หมายความว่าสมการมีความน่าเชื่อถือเหมาะสมที่จะนำมาทำนายค่าได้ และค่า model significance ของค่าความแข็งมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงถึงความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่า X และค่า Y อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) ในการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการทำนาย (lack of fit) พบว่าโมเดลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะใช้ทำนายค่าความแข็งและค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบ โดยค่า ANOVA เป็นเกณฑ์สำหรับการวัดความเหมาะสมของแบบจำลอง ซึ่งหากค่าการทดสอบความเหมาะสม (lack of fit) มีนัยสำคัญทางสถิติแสดงว่าแบบจำลองนั้นไม่เหมาะสม เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการเลือกใช้ตัวแปรที่ไม่เหมาะสม (Kutner *et al*., 2004; Derringer & Suich, 1980) ค่าความแข็งและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบอยู่ในรูปของสมการรูปแบบกำลังสอง (quadratic equation) ซึ่งเป็นสมการศึกษาปัจจัยและการตอบสนองพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) เมื่อนำสมการถดถอยแบบพหุมาสร้างกราฟพื้นที่ตอบสนองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อหมู (X_1) ปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และปริมาณคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (X_3) พบว่าการเพิ่มปริมาณเนื้อหมูและปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ (Figure 1) เป็นผลเนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทำหน้าที่จับตัวกับน้ำทำให้เกิดเป็นโครงสร้างเจลที่ดีและสามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของหมูแท่งอบกรอบได้ดีขึ้น นอกจากนี้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดจัดอยู่ในกลุ่มสารทดแทนไขมันทำหน้าที่ดูดซับน้ำโดยจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำถูกจับไว้ในโมเลกุลของโปรตีนจึงสามารถใช้เป็นสารทดแทนไขมันได้ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2557) ในขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณเนื้อหมูและปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดส่งผลทำให้ค่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

(Figure 2) ซึ่งในขั้นตอนของการบดผสมทำให้โปรตีนจากเนื้อหมูเกิดการสูญเสียสภาพตามธรรมชาติของโปรตีนทำให้ส่วนของไฮโดรโฟบิคเปิดตัวออกมา ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง อัตราการพองตัวลดลง โปรตีนจึงไม่ดูดซับน้ำแต่สร้างเจลเป็นโครงสร้างลักษณะคล้ายร่างแหที่สามารถห่อหุ้มน้ำ ไขมันและของแข็งให้อยู่รวมกันได้ส่งผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ ซึ่งโปรตีนถั่วเหลืองมีสมบัติการเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดี เนื่องจากในโมเลกุลประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงสามารถจับน้ำและไขมันให้คงตัวอยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยในด้านการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส ทำให้มีความชุ่มฉ่ำและลดการสูญเสียน้ำหนักหลังผ่านการทำให้สุก (Petracci *et al*., 2013) ขณะเดียวกันคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นสารทดแทนไขมันและเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูป การใช้คาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัสและความชุ่มฉ่ำของผลิตภัณฑ์เนื้อได้

สมการถดถอยของค่าสี L* และ a* อยู่ในรูปแบบอิทธิพลระหว่างปัจจัย (interaction effect) ระหว่างโปรตีนถั่วเหลือง (X_2) และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส (X_3) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.3623 และ 0.5765 ตามลำดับ ในขณะเดียวกันสมการถดถอยของค่าสี b* อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear effect) เป็นผลมาจากอิทธิพลของปริมาณเนื้อหมู (X_1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (X_2) และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส (X_3) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.6663 และสมการมีค่า model significance เท่ากับ 0.0261 ($p \leq 0.05$) แสดงถึงค่า Y และค่า X มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (Table 2) แต่ค่าสี L* a* และ b* มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจน้อยกว่า 0.75 ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายข้อมูลได้อย่างเที่ยงตรง ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลิตภัณฑ์แสดงผลลัพธ์ของความค่าสี L* a* และ b* ของตัวอย่างไม่แตกต่างต่างกัน

การทวนสอบความแม่นยำของสมการที่เลือกไว้ 2 สมการ คือ สมการของค่าความแข็งและสมการค่าปริมาณความชื้น (Table 3) โดยวิเคราะห์ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (actual value) รวมทั้งค่าตัวแปรที่ศึกษา (X_{1-3}) ในสมการที่เลือกได้เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (predicted value) นำมาคำนวณค่า root mean square (RMS) ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายจากการใช้สมการ ซึ่งจากการพิจารณา ค่า RMS พบว่าค่าความแข็งและค่าปริมาณความชื้น มีค่าเท่ากับ 0.0030% และ 0.0038% ซึ่งค่า RMS บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการทำนายจากการใช้สมการต่ำกว่า 20% แสดงถึงค่าที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงน้อย (Julian, 2004) จากผลการทดลองยืนยันว่าสมการที่เลือกทั้ง 2 สมการคือ ค่าความแข็ง (Y_1) และค่าปริมาณความชื้น (Y_5) มีความเหมาะสมและแม่นยำเพียงพอที่จะนำไปใช้กำหนดสูตรของส่วนผสมสำหรับการผลิตหมูแท่งอบกรอบได้

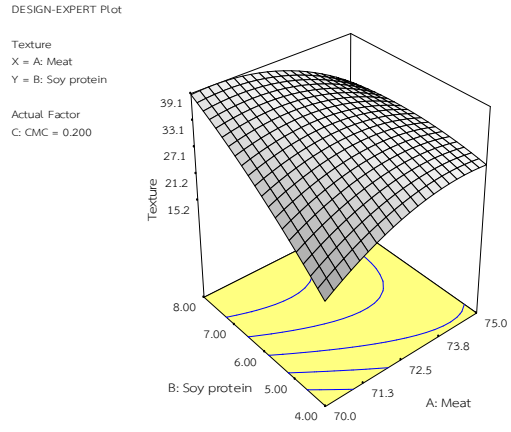

Figure 1 Relation response surface between meat (X_1) soy protein (X_2) and CMC (X_3) on hardness (Y_1) of crispy pork stick product

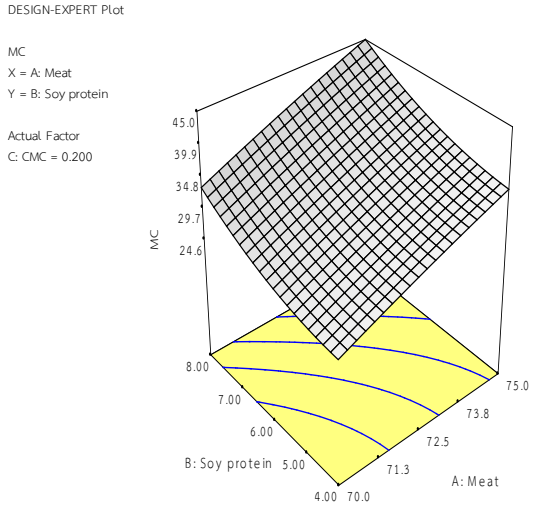

Figure 2 Relation response surface between meat (X_1) soy protein (X_2) and CMC (X_3) on moisture (Y_5) of crispy pork stick product

Table 1 Central composite desi gn andresponse variables of crispy pork stick product

Run no.	Block	Independent variable			Response variables				
					Hunter Lab	Hunter Lab			Moisture
		X_1	X_2	X_3	(Kgf/mm^2)	L* value	a* value	a* value	content(%db)
1	1	70.00	8.00	0.22	3.15±0.60	47.23±0.47	15.28±0.19	29.17±0.48	45.30±0.22
2	1	70.00	4.00	0.18	2.78±0.03	43.27±0.54	14.68±0.10	27.02±0.47	36.16±0.74
3	1	72.50	6.00	0.20	1.17±0.30	42.70±0.19	13.86±0.21	25.23±0.41	34.33±0.53
4	1	75.00	8.00	0.18	2.23±0.07	47.02±0.15	13.02±0.10	27.83±0.28	36.01±0.47
5	1	75.00	4.00	0.22	3.12±0.06	42.09±0.14	14.11±0.12	26.05±0.21	37.13±0.42
6	2	72.50	6.00	0.20	1.16±0.26	50.30±0.19	12.49±0.06	26.47±0.27	31.60±0.75
7	2	68.96	6.00	0.20	1.95±0.43	49.03±0.34	12.51±0.29	27.24±0.45	23.20±0.01
8	2	72.50	3.17	0.20	1.94±0.12	46.80±0.29	11.22±0.06	25.05±0.47	29.15±0.54
9	2	72.50	6.00	0.17	2.25±0.18	45.69±0.74	15.00±0.15	27.78±0.32	33.91±0.62
10	2	76.04	6.00	0.20	2.12±0.39	50.58±0.43	12.77±0.14	27.65±0.42	39.31±0.25
11	2	72.50	6.00	0.23	2.51±0.32	50.68±0.38	11.05±0.11	27.03±0.10	42.02±0.20
12	2	75.50	8.83	0.20	3.00±0.69	55.50±0.47	12.90±0.32	30.33±0.48	41.90±0.95

Data are presented as means ± standard error

Table 2 Regression model of crispy pork stick product

Regress Coefficients	Hardness	Physicochemical properties			Moisture content
		Hunter Lab			
	(Kgf/mm^2)	L* value	a* value	b* value	(%db)
β_0 - Constant	1.18	47.57	13.24	27.24	32.05
β_1 – Meat (%)	0.06	0.10	0.002	-0.22	5.70
β_2 – Soy protein (%)	0.37	2.65	0.60	1.42	4.51
β_3 – CMC (%)	0.09	0.76	-1.40	-0.08	2.87
β_{11}	0.42				0.065
β_{22}	0.64				2.20
β_{33}	0.59				3.42
β_{12}	-0.22		-0.182		0.30
β_{13}	0.50		0.720		2.50
β_{23}	0.21	2.59	0.800		7.78
Model significance	0.0020*	0.2834	0.4546	0.0261*	0.1447
Lack of fit	0.0967	0.8480	0.4710	0.5727	0.3467
R-Squared	0.9996	0.3623	0.5765	0.6663	0.9659
Adj R- Squared	0.9976	0.1231	0.0684	0.5412	0.8123

* Significant at $p<0.05$

Table3 Verification of the equation response actual value and predicted value and root mean square (RMS) of hardness (Y_1) and moisture content (Y_5)

Standard order	Variable			Response					
				Hardness (Y_1)			Moisture content (Y_5)		
	X_1	X_2	X_3	Actual value	Predicted value	Residual	Actual value	Predicted value	Residual
1	75.00	8.00	0.18	2.23	2.24	-0.013	36.00	36.10	-0.0469
2	75.00	4.00	0.22	3.12	3.13	-0.013	37.10	37.20	-0.0469
3	70.00	8.00	0.22	3.15	3.16	-0.013	45.30	45.30	-0.0469
4	70.00	4.00	0.18	2.78	2.79	-0.013	36.20	36.20	-0.0469
5	72.50	6.00	0.20	1.95	1.94	0.013	34.30	34.10	0.1880
6	69.00	6.00	0.20	2.12	2.11	0.013	23.20	23.20	0.0469
7	76.00	6.00	0.20	1.94	1.93	0.013	39.30	39.30	0.0469
8	72.5	3.17	0.20	3.00	2.99	0.013	29.10	29.10	0.0469
9	72.5	8.83	0.20	2.25	2.24	0.013	41.90	41.90	0.0469
10	72.5	6.00	0.17	2.51	2.50	0.013	33.90	33.90	0.0469
11	72.5	6.00	0.23	1.16	1.18	-0.018	42.00	42.00	0.0469
12	72.5	6.00	0.20	1.17	1.18	-0.0083	31.60	31.80	-0.2820
					RMS(%)	0.0030		RMS (%)	0.0038

จากผลการทดลองสามารถทำนายระดับที่เหมาะสมสำหรับการผลิตหมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ จากโปรแกรม Design Expert โดยการนำ ค่าสมการถดถอยแบบพหุมากำหนดปัจจัยตัวแปรต้น ได้แก่ ปริมาณของเนื้อหมู โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลสมีผลต่อตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าความแข็งและปริมาณความชื้น เมื่อนำสมการถดถอยแบบพหุมาหาค่าที่เหมาะสมต่อการพัฒนาสูตรหมูแท่งอบกรอบ โดยกำหนดค่าเป้าหมายด้านเนื้อสัมผัสที่มีค่าความแข็งมากที่สุดและมีปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ต่ำที่สุด พบว่าการใช้เนื้อหมู 70% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 7.57% และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส 0.18% เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตหมูแท่งอบกรอบ

2. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟ

ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟจากตัวอย่าง 100 กรัม พบว่ามีค่าพลังงานทั้งหมด 412 กิโลแคลอรี โดยมีพลังงานจากไขมัน 104 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 11.5 กรัม และไขมันอิ่มตัว 4.25 กรัม โคเลสเตอรอล 79.8 มิลลิกรัม โปรตีน 52.3 กรัม คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 24.8 กรัม ใยอาหาร 0.61 กรัม น้ำตาล 24.2 กรัม โซเดียม 1579 มิลลิกรัม วิตามินบี 1 0.57 มิลลิกรัม วิตามินบี 2 0.03 มิลลิกรัม แคลเซียม 30.4 มิลลิกรัม และเหล็ก 3.56 มิลลิกรัม ตามลำดับ

ผลการประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน ขนาดบรรจุ 30 กรัม โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า ค่าสี L* อยู่ในช่วง 23.43-45.81 ค่าสี a* มีค่าระหว่าง 12.73-15.94 และค่าสี b* ระหว่าง 20.93-32.17 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าสีที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิและเวลาของการเก็บรักษาที่นานขึ้น ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มีค่าระหว่าง 1.54-1.91 Kgf/mm^2 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาและอุณหภูมิของการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น (Table 4)

ค่า water activity (a_w) ของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบในระหว่างการเก็บรักษามีค่าเท่ากับ 0.028-0.381 (Table 4) ซึ่งมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 เป็นระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้และเป็นระดับที่จุลินทรีย์หยุดการสร้างสารพิษตลอดจนถึงการช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อราในผลิตภัณฑ์ (Igo & Schaffner, 2021)

ค่า Thiobarbituric acid-reactive substance (TBARs) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามระยะเวลาการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงของค่า TBARs ในระหว่างการเก็บรักษาเกิดขึ้นจากกลุ่มคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันทำปฏิกิริยากับกรดไทโอบาร์บิทูริก (Thiobarbituric acid) มีผลทำให้ค่า TBARs เพิ่มสูงขึ้น ผลการวัดค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่าในสัปดาห์ที่ 0 ของการเก็บรักษามีค่าเท่ากับ 0.09 มิลลิกรัมมาลอน อัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม เป็น 0.40 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม ในสภาวะของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (Table 4) การเปลี่ยนแปลงค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกันเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ค่า TBARs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่อัตรา (k) เท่ากับ 0.015 0.016 และ 0.021 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัมต่อสัปดาห์ ตามลำดับ (Figure 3)

เมื่อนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า TBARs ของผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบไปหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่า k สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ Arrhenuis โดยผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy, E_0) เท่ากับ 13.68 kJ/mol โดยมีค่า Q_{10} เท่ากับ 1.20 เมื่อทำนายอายุการเก็บโดยใช้ค่า TBARs น้อยกว่า 3 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม โดยที่ค่า TBARs มากกว่า 3 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม บ่งชี้ให้เห็นว่าไขมันที่เป็นองค์ประกอบของอาหารเกิดการเสื่อมสภาพทำให้มีกลิ่นหืนในผลิตภัณฑ์ โดยปกติผู้บริโภคสามารถรับรู้กลิ่นหืนที่ค่า TBARs ระหว่าง 5-20 มิลลิกรัมมาลอนอัลดีไฮด์ต่อกิโลกรัม (สุแพรวพันธ์ โลหะลักษณาเดช และนัฏฐา คเชนทร์ภักดี, 2011) ผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส มีอายุการเก็บรักษาเท่ากับ 20.5 และ 18.5 เดือน ตามลำดับ (Figure 4)

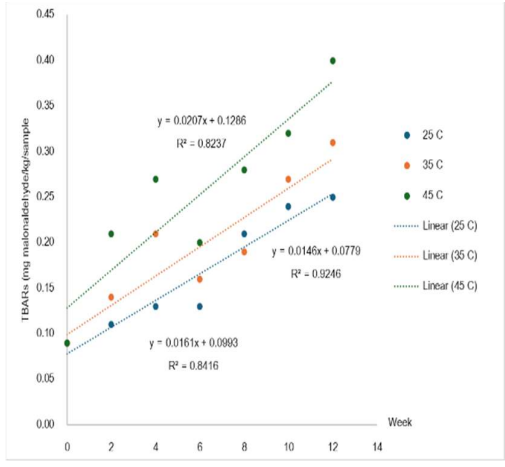

Figure 3 Change in TBARs of crispy pork stick product at 25 35 and 45 ^{o}C

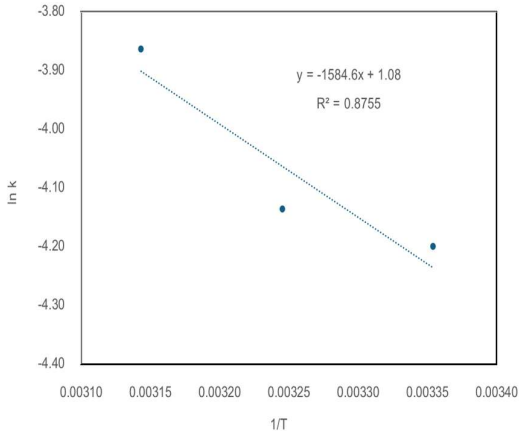

Figure 4 Relationship between ln k and 1/T of TBARs change in crispy pork stick product during storage

Table 4 Physical and chemical propertiesof crispy pork sticksproductat 25 35 and45°Cfor 12 week

Quality	Temperature (°C)	Week 0	4	8	12
L*	25	39.55^{c}±0.37	42.76^{b}±0.51	42.90^{b}±0.52	44.85^{a}±1.75
	35	39.55^{d}±0.37	45.81^{a}±0.46	40.24^{c}±0.47	45.36^{b}±0.41
	45	39.55^{c}±0.37	40.95^{a}±0.48	39.81^{b}±0.05	38.11^{d}±0.31
a*	25	14.65^{a}±0.11	13.83^{c}±0.18	14.38^{b}±0.04	13.64^{c}±0.59
	35	14.65^{a}±0.11	12.73^{d}±0.07	14.45^{b}±0.08	13.32^{c}±0.04
	45	14.65^{b}±0.11	14.99^{a}±0.05	13.84^{d}±0.08	13.99^{c}±0.09
b*	25	25.20^{c}±0.29	24.95^{d}±0.06	26.98^{b}±0.08	30.89^{a}±0.60
	35	25.20^{d}±0.29	25.81^{b}±0.19	25.51^{c}±0.46	32.17^{a}±0.16
	45	25.20^{b}±0.29	23.04^{d}±0.11	24.28^{c}±0.28	28.12^{a}±0.09
a_w	25	0.38^{a}±0.01	0.37^{a}±0.06	0.32^{b}±0.05	0.28^{c}±0.01
	35	0.38^{a}±0.01	0.37^{a}±0.07	0.32^{b}±0.02	0.28^{c}±0.01
	45	0.38^{a}±0.01	0.37^{a}±0.04	0.32^{b}±0.06	0.30^{c}±0.01
TBARs	25	0.09^{c}±0.01	0.13^{b}±0.01	0.21^{a}±0.01	0.25^{a}±0.02
(mg malonaldehyde/ kg	35	0.09^{d}±0.01	0.21^{b}±0.01	0.19^{c}±0.01	0.31^{a}±0.01
sample)	45	0.09^{c}±0.01	0.27^{b}±0.01	0.28^{b}±0.01	0.40^{a}±0.01
Hardness	25	1.54^{b}±0.02	-	1.55^{b}±0.01	1.63^{a}±0.03
(Kgf)	35	1.54^{b}±0.02	-	1.58^{b}±0.08	1.66^{a}±0.04
	45	1.54^{c}±0.02	-	1.88^{b}±0.07	1.90^{a}±0.03

Data are presented as means ± standard error

Different superscript (a-d) means significantly different in the same row ($p<0.05$)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การออกแบบสภาวะที่เหมาะสมต่อการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบด้วยไมโครเวฟร่วมกับบริษัท ร้องกวาง กรีนฟู้ด จำกัด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อคุณภาพทางด้านเคมี กายภาพ คือ การใช้เนื้อหมู 70% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 7.57% และคาร์บอกซิเมทธิลเซลลูโลส 0.18% ในด้านคุณค่าทางโภชนการสารอาหารหลักของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยค่าพลังงานทั้งหมด 412 กิโลแคลอรี พลังงานจากไขมัน 104 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 11.5 กรัม และไขมันอิ่มตัว 4.25 กรัม โคเลสเตอรอล 79.8 มิลลิกรัม โปรตีน 52.3 กรัม คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 24.8 กรัมและใยอาหาร 0.61 กรัม ตามลำดับ สำหรับอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์แบบเติมก๊าซไนโตรเจน ขนาดบรรจุ 30 กรัม มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 18.5 เดือน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ควรจัดเก็บผลิตภัณฑ์ให้พ้นแสงและความร้อน เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่เป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืนในผลิตภัณฑ์

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานโครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตให้กับภาคอตสาหกรรม (Talent Mobility) ณ บริษัทร้องกวาง กรีนฟู้ด จำกัด โดยดำเนินงานด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบซึ่งเป็นโจทย์วิจัยที่ทางผู้ประกอบการต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในรูปแบบใหม่ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.) อุทยานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่สนับสนุนงบประมาณและส่งเสริมการปฏิบัติงานเพื่อเพิ่มขีดความสามารถการแข่งขันในภาคการผลิตและบริการในสถานประกอบการ

เอกสารอ้างอิง

นันทา เป็งเนตร์, วิภา ประพินอักษร และดรุณี นาคเสวี. (2563). *การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมูแท่งอบกรอบเชิงพาณิชย์* [รายงานการวิจัย]. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.).

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2557). *เคมีอาหาร*. โอเอส พริ้นติ้ง เฮาส์.

สุแพรวพันธ์ โลหะลักษณาเดช และนัฏฐา คเชนทร์ภักดี. (2011). การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ปูหินนิ่มทอดปรุงรส. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง, 5*(2), 105–110.

André, G., & Shai, B. (1997). Meat batters: Effect of chemical modification on protein recovery and functionality. *Food Research International, 30*(1), 5–11. https://doi.org/10.1016/S0963-9969(95)00022-4

AOAC. (2000). *Official method of analysis of AOAC International* (17th ed.). The Association of Official Analytical Chemists.

Asuming-Bediako, N., Jaspal, M. H., Hallett, K., Bayntun, J., Baker, A., & Sheard, P. R. (2014). Effects of replacing pork backfat with emulsified vegetable oil on fatty acid composition and quality of UK-style sausages. *Meat Science, 96*(1), 187–194. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.06.031

Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology, 12*(4), 214–219. https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968

Hurler, J., Engesland, A., Kermany, B. P., & Škalko-Basnet, N. (2012). Improved texture analysis for hydrogel characterization: Gel cohesiveness, adhesiveness, and hardness. *Journal of Applied Polymer Science, 125*(1), 180–188. https://doi.org/10.1002/app.35414

Igo, M. J., & Schaffner, D. W. (2021). Models for factors influencing pathogen survival in low water activity foods from literature data are highly significant but show large unexplained variance. *Food Microbiology, 98*, 103783.

Julian, M., Li, B., Morris, A., & Martin, E. B. (2004). Generalized partial least squares regression based on the penalized minimum norm projection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 72*(1), 21–26. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.01.026

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). *Applied linear statistical models*. Irwin.

Minyi, H., & Hanne, C. B. (2017). Designing healthier comminuted meat products: Effect of dietary fibers on water distribution and texture of a fat-reduced meat model system. *Meat Science, 133*, 159–165. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.07.001

Monika, G., Valerie, S., & Jochen, W. (2015). Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties. *Food Hydrocolloids, 45*, 236–246. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.021

Petracci, M., Bianchi, M., Mudalal, S., & Cavani, C. (2013). Functional ingredients for poultry meat products. *Trends in Food Science & Technology, 33*(1), 27–39. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.06.004

Wenjiao, F., Yongkui, Z., Yunchuan, C., Junxiu, S., & Yuwen, Y. (2013). TBARS predictive models of pork sausages stored at different temperatures. *Meat Science, 96*(1), 1–4. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.06.