



การศึกษาผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมลากรอบ Study of the Effect of Storage Temperature on the Quality of Khanom La Krob

จิระนันท์ วงศ์วาทัญญู¹ ศันสนีย์ ทิมทอง² และ ศุภักษร มาแสวง^{2*}

Jeeranan Wongwatanyu¹ Sansanee Timtong² and Supuksorn Masavang^{2*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ

²สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

¹Division of Food Technology and Innovation, Faculty of Liberal Arts and Science,
Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province

²Division of Food Technology, Faculty of Home Economics Technology,
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok

*Corresponding Author: supuksorn.m@rmutp.ac.th

Received: January 23, 2024

Revised: March 14, 2024

Accepted: March 15, 2024

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมลากรอบจากบ้านแม่พริ้มสูตรดั้งเดิม จังหวัดนครศีร์ษะราช ทำการวิจัยโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของขนมลาด้านกายภาพและเคมีในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิดสนิทเป็นระยะเวลา 35 วัน และศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอมการดูดซับความชื้น (sorption isotherm) เพื่อประเมินจุดวิกฤตของการเก็บรักษา ผลการวิจัยพบว่าขนมลามีค่า water activity (a_w) ปริมาณความชื้น ความสว่าง (L^*) ค่าดัชนีสีแดง (a^*) ค่าดัชนีสีเหลือง (b^*) ค่าความแข็ง (hardness) และค่าเพอร์ออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น จากกราฟซอร์ปชันไอโซเทอมการดูดซับความชื้นพบว่าความชื้นของขนมลามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของ a_w เพิ่มขึ้น และมีความไวต่อการดูดความชื้นจากบรรยากาศที่ระดับ a_w สูงกว่า 0.70 นอกจากนี้การประเมินจุดวิกฤตของสภาวะในการเก็บรักษาขนมลากรอบในภาชนะที่ปิดสนิทโดยใช้กราฟซอร์ปชันไอโซเทอม พบว่ามีค่าจุดวิกฤตเท่ากับความชื้นร้อยละ 9.51 และค่า a_w เป็น 0.75 ส่วนการเก็บรักษาขนมลากรอบที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 วัน ผลิตภัณฑ์มีค่าความชื้นเท่ากับ 4.35 และ 4.95 และค่า a_w เท่ากับ 0.49 และ 0.59 ตามลำดับ ซึ่งยังคงมีค่าต่ำกว่าค่า ณ จุดวิกฤต ดังนั้นการเก็บรักษาขนมลาในภาชนะที่ปิดสนิทภายใต้สภาวะที่ต่ำกว่าจุดวิกฤตนี้จะช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และยืดอายุการเก็บรักษาได้

คำสำคัญ : ขนมลากรอบ อุณหภูมิการเก็บรักษา ค่าเพอร์ออกไซด์ กราฟซอร์ปชันไอโซเทอม

Abstract

The study investigated the effects of temperature and storage duration on Khanom La Krob products using the original recipe from Baan Mae Phrim, Nakhon Si Thammarat Province. Changes in the physical and chemical attributes of Khanom La Krob were monitored during storage at temperatures of 25 and 35 degrees Celsius in sealed containers for 35 days. Additionally, sorption isotherm analysis was



conducted to determine critical preservation points. The results revealed that water activity (a_w), moisture content, lightness (L^*), redness (a^*), yellowness (b^*), hardness, and peroxide value of Khanom La Krob increased with higher temperatures and longer storage durations. The moisture absorption isotherm demonstrated an increase in moisture absorption with rising a_w levels, indicating that Khanom La Krob was sensitive to moisture absorption from the atmosphere at a_w levels above 0.70. Furthermore, critical storage conditions for Khanom La Krob were evaluated using the moisture absorption isotherm, identifying a humidity value of 9.51% and an a_w value of 0.75 as critical points. When stored at 25 and 35 degrees Celsius for 35 days, Khanom La Krob exhibited moisture values of 4.35 and 4.95, and a_w values of 0.49 and 0.59, respectively, which remained lower than the critical values. Therefore, storing Khanom La Krob in sealed containers under storage conditions below these critical points can help delay changes in product quality and extend shelf life.

Keywords: Khanom La crispy snack, Storage temperature, Peroxide value, Sorption isotherm

1. บทนำ

ขนมลา เป็นขนมหวานพื้นบ้านทางภาคใต้ของประเทศไทย ทำมาจากแป้งข้าวเจ้า เป็นขนมสำคัญหนึ่งในห้าชนิดที่ใช้สำหรับจัดหมับ เพื่อนำไปถวายพระสงฆ์ในงานประเพณีบุญสารทเดือนสิบ ซึ่งเป็นงานบุญประเพณีที่สำคัญของจังหวัดในภาคใต้ เช่น จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดสุราษฎร์ธานี และจังหวัดสงขลา ส่วนผสมหลักของขนมลาคะประกอบด้วย แป้งข้าวเจ้า แป้งมัน และน้ำตาลโตนด ประเภทของขนมลามี 2 ชนิด คือ ลาเซ็ดและลากรอบ ซึ่งขนมลาเซ็ด จะใช้น้ำมันน้อย โรยแป้งให้หนา เมื่อสุกพับเป็นครึ่งวงกลม รูปร่างเหมือนแห ส่วนลากรอบ เกิดจากแนวคิดขนมลาดั้งเดิมหรือขนมลานิม นำมาโรยน้ำตาลแล้วนำไปตากแดด ปัจจุบันมีการทำลากรอบแบบใหม่ โดยเพิ่มแป้งข้าวเจ้าให้มากขึ้น ใช้น้ำมันมากขึ้น เมื่อแป้งสุกแล้วม้วนเป็นแท่งกลมดึงไม้ออกมาเป็นม้วนยาว (Chutchanok, 2020)

ในปัจจุบันได้มีการผลิตขนมลาเพื่อการจำหน่ายซึ่งสามารถหาซื้อได้ตลอดทั้งปี จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นในด้านการผลิต และการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ขนมลา พบว่าขนมลามีปัญหาสำคัญคืออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์สั้นกว่าอาหารแห้งชนิดอื่น โดยทั่วไปขนมลาชนิดแผ่นจะเก็บรักษาได้ประมาณ 1 เดือน เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีกลิ่นหืน ทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคและส่งผลกระทบต่อแผนการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ขนมลา (Thanonkaew & Ruanglay, 2016) ในระหว่างการทอดน้ำมันเกิดการถ่ายเทมวลและความร้อนไปพร้อมกับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงเป็นระยะเวลานานโดยน้ำมันจะส่งผ่านความร้อนไปยังอาหารพร้อมทำปฏิกิริยากับน้ำภายในอาหารและออกซิเจนโดยมีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงมีผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ เกิดขึ้นในน้ำมันเป็นจำนวนมาก เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ทำให้เกิดผลผลิตจากการออกซิเดชันที่ระเหยได้ (Volatile compounds) อนุพันธ์ของตัวถูกออกซิไดส์ที่ระเหยไม่ได้ (Non-volatile compounds) สารกลุ่มไดเมอร์ริก (Dimeric compounds) สารพอลิเมอร์ริก (Polymeric compounds) และสารไซคลิก (Cyclic compounds) ซึ่งสารเหล่านี้ส่งผลต่อคุณภาพของอาหารทอดและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค (Farhoosh & Kenari, 2009) และยังส่งผลให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนและกลิ่นสาบในผลิตภัณฑ์ขนมลา ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการยอมรับของผู้บริโภคเนื่องจากความไม่มั่นใจทั้งในด้านคุณภาพและความปลอดภัยของผู้บริโภค ลักษณะเนื้อสัมผัสสำคัญที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพของอาหารทอด คือ ความกรอบอาหารทอดที่มีคุณภาพดีและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ต่อเมื่อลักษณะเนื้อยังคงแน่นและกรอบ ความกรอบจึงถือเป็นสิ่งที่



สำคัญมากเพราะจะนำไปสู่ความพอใจเมื่อได้บริโภคและจะส่งผลให้เกิดการบริโภคในครั้งต่อไป โดยอาหารที่กรอบจะต้องแน่นและแตกง่ายทันที ทำให้ผิวดูปร่างและเกิดเสียงเมื่อเคี้ยว การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านความกรอบของอาหารทอด จะเกิดขึ้นเมื่อปล่อยให้อาหารมีความชื้นเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้อาหารมีเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไป มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารทอดคือความชื้น หากเราต้องการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารทอดให้กรอบได้นาน เราจะต้องเลือกชนิดของบรรจุภัณฑ์ที่สามารถป้องกันการซึมผ่านเข้าออกของไอน้ำได้ดี หรือควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่เหมาะสม เนื่องจากขนมฉาบเป็นอาหารทอดสามารถผลิตและมีจำหน่ายตลอดทั้งปี โดยเฉพาะในเทศกาล จึงเกิดกลิ่นเหม็นหืนง่าย อีกทั้งสภาวะในการเก็บรักษาหรืออุณหภูมิการเก็บรักษาอาจแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมฉาบได้ (Thanonkaew & Ruangklay, 2016)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของขนมฉาบ ในระหว่างการเก็บรักษาโดยการออกแบบสภาวะหรือการจำลองที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส ในภาชนะปิดสนิทเป็นระยะเวลา 35 วัน รวมถึงการศึกษาความสัมพันธ์ของความชื้นและ water activity ของขนมฉาบด้วยกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ (sorption isotherm) เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมฉาบในระหว่างการขนส่งและรอจำหน่ายหรือออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและการวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบ

ผลิตภัณฑ์ขนมฉาบที่ใช้ในการทดลองเป็นผลิตภัณฑ์ที่ซื้อจากขนมฉาบบ้านแม่พริ้มสูตรดั้งเดิม เมืองนคร 86 หมู่ 2 ตำบลหูล่อง อำเภอกาบเชิง จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งผลิตวันที่ 10 มิถุนายน 2566 และมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โปรตีนจากไข่ และคาร์โบไฮเดรตจากแป้งและน้ำตาล จากนั้นทดสอบคุณภาพเบื้องต้นของขนมฉาบ โดยวิเคราะห์ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (AOAC, 2000) ค่า a_w ด้วยเครื่องวัดค่า a_w (Aqua Lab TE4, USA) ค่าสี L^* , a^* , b^* ด้วยเครื่องสี (Chroma meter: KONICA MINOLTA, CR-400, Japan) เนื้อสัมผัส ทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส (TA-Xt2i, Stable Micro Systems, UK) ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value; PV) ด้วยวิธีการไตเตรทแบบไอโอดิเมตริกซ์ (Iodometric titration) ดัดแปลงวิธีจาก AOCS (2003) และตรวจหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์รา ด้วยวิธี Petrifilm™ (3M Company, St. Paul, MN) ดัดแปลงวิธีจาก Bird et al. (2015)

การศึกษาผลของระดับ Water activity (a_w) และอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ขนมฉาบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ 2 ระดับ ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 7, 14, 21, 28, 35 วัน ในตู้อบลมควบคุมสภาวะ (Memmert, ICH110Leco, Germany) และตั้งค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100 และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (Relative Humidity) ที่ร้อยละ 50

จากนั้นนำตัวอย่างขนมฉาบที่เพิ่งผลิตใหม่บรรจุในถ้วยพลาสติกและวางในกล่องพลาสติกที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อควบคุมสภาวะบรรยากาศ แล้วปิดฝาให้สนิทและนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 วัน และทำการตรวจสอบคุณภาพด้านกายภาพและเคมี ทุกๆ 7 วัน (Figure 1)



Figure 1. Khanom La samples were placed in an accelerated chamber to maintain storage temperatures at 25°C and 35°C for 35 days.

2.2 การจำลองสภาวะการเก็บรักษาขนมลาเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมลา

นำผลิตภัณฑ์ขนมลารอบที่ตัดให้มีขนาดยาวประมาณ 1 นิ้ว มาบรรจุใส่ในถ้วยพลาสติกใสชนิด PET ขนาด 7 ออนซ์และเก็บรักษาในกล่องพลาสติกที่ปิดสนิท จำนวน 2 กล่อง จากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และที่ 35 องศาเซลเซียส ในตู้บ่มควบคุมสภาวะ (Accelerated chamber) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 35 วัน โดยสุ่มตรวจสัปดาห์ละ 1 ครั้ง และเก็บตัวอย่างที่เก็บรักษาในระยะเวลาโดยเริ่มจากวันที่ 0 เป็นวันแรกของการทำการทดลอง 7, 14, 21, 28 และ 35 วัน ตามลำดับ แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพ ได้แก่

2.2.1 คุณภาพทางด้านกายภาพ

วัดค่า water activity (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่า water activity (Aqua Lab TE4, USA) ปริมาณความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (AOAC, 2002) ค่าสี L^* , a^* , b^* ของขนมลา ด้วยเครื่องวัดสี (chroma meter: KONICA MINOLTA, CR-400, Japan) และทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส (TA-XT2i, Stable Micro Systems, UK) ใช้วิธีการกด (compression) ด้วยหัวกดทรงกระบอก ขนาด 50 มิลลิเมตร (P50) ตั้งค่าความเร็วของการวัด ได้แก่ ค่า pre-test, test และ post-test ที่ 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที และทำการรายงานผลค่าความแข็ง (hardness) จากค่าเฉลี่ยของการวัดตัวอย่างละ 10 ซ้ำ ของขนมลาที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 7, 14, 21, 28, และ 35 วัน

2.2.2 คุณภาพทางด้านเคมี

นำตัวอย่างขนมลาที่ทำการจำลองสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำการทดลองมาทำการวิเคราะห์หาค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Value; PV) ด้วยวิธีการไตเตรทแบบไอโอดิเมตริกซ์ (Iodometric titration) ดัดแปลงวิธีจาก AOCS (2003) โดยชั่งตัวอย่างขนมลา 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำคลอโรฟอร์ม 50 มิลลิลิตร ทำการเขย่าสารผสม 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำสารละลายที่กรองได้มา 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ 20 มิลลิลิตร เติมน้ำกรดแอสซิติค 30 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารผสมให้เข้ากันแล้วเก็บในที่มืด 30 นาที เมื่อครบเวลานำออกจากที่มืดและเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปไตเตรทกับสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ความเข้มข้น 0.02 นอร์มอล ใช้น้ำแบ่งความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นอินดิเคเตอร์ ทำการไตเตรทจนถึงจุดยุติเมื่อสารละลายไม่มีสี ทำการคำนวณค่าเปอร์ออกไซด์ ดังนี้



$$\text{ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq oxygen/Kg sample)} = \frac{(\text{ปริมาตร Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ ที่ใช้ไทเทรต} \times \text{ความเข้มข้น Na}_2\text{S}_2\text{O}_3) \times 1000}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)}} \dots\dots(1)$$

2.3 การประเมินสถานะการเก็บรักษาวิกฤตด้วย Sorption isotherm

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity และ ค่าความชื้นสมดุล หรือ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Sorption isotherm) ของผลิตภัณฑ์ขนมลา เพื่อหาค่า water activity และ ค่าความชื้นสมดุลวิกฤต สำหรับการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมลาโดยการเตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด ได้แก่ NaOH, MgCl₂, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, NaCl และ KCl ที่อุณหภูมิห้องโดยการชั่งสารเคมีดังกล่าวอย่างละ 100 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นตามตามสัดส่วนที่แสดงใน Table 1 เพื่อใช้จำลองบรรยากาศที่ให้มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.10-0.82 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของผลิตภัณฑ์ในภาชนะปิดสนิท (Menkov & Durakova, 2007)

Table 1. Preparation of saturated salt solutions using the static gravimetric method for monitoring changes in sample properties during storage at 25 °C and 35 °C.

Saturated salt solutions	Water activity		Water (ml) per 100 g
	25 °C	35 °C	
NaOH	0.065	0.0687	22
MgCl ₂	0.3273	0.3238	12
K ₂ CO ₃	0.438	0.436	45
Mg(NO ₃) ₂	0.5286	0.5133	15
NaCl	0.7532	0.7521	25
KCl	0.8432	0.8353	40

จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ขนมลาบรรจุใส่ในถ้วยพลาสติกชนิด PET ขนาด 7 ออนซ์ และเก็บในกล่องพลาสติกที่ปิดสนิท ที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด เป็นเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สภาวะสมดุล (Figure 2) จากนั้นนำตัวอย่างที่เก็บรักษาในแต่ละระดับของ water activity ต่าง ๆ มาวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างด้วยตู้อบลมร้อน (AOAC, 2002) เพื่อใช้ในการสร้างกราฟของฟลักชันไอโซเทอร์ม (Sorption Isotherm) และรายงานผลค่า a_w และค่าความชื้นสมดุล ณ จุดวิกฤต ของตัวอย่างขนมลาโดยลากเส้นจุดตัด 2 เส้น ตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเส้นกราฟ โดยดัดแปลงตามวิธีของ Burnett et al. (2004)



Figure 2. Khanom La samples were placed in airtight containers at ambient temperature to control water activity for obtaining the sorption isotherm curve of Khanom La.



3. ผลการวิจัย

3.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ขนมลาที่เป็นผลจากอุณหภูมิเก็บรักษา

คุณภาพเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ขนมลารอบที่ใช้ในการศึกษา ได้แสดงใน Table 2 พบว่าผลิตภัณฑ์ขนมลามีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ขนมลา (มผช. 712/2547) โดยผลิตภัณฑ์ขนมลารอบต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก และมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Tapia et al., 2020) ปราศจากกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ มีสีตามธรรมชาติของส่วนประกอบ ซึ่งขนมลามีสีที่มาจากไข่แดงและการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในระหว่างกระบวนการทอด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่า b^* ที่มีค่าเท่ากับ 36.58 ± 0.05 โดยค่า b^* เป็นบวก แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีสีเหลืองที่ชัดเจน ส่วนค่าความแข็ง (hardness) บ่งชี้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีความกรอบ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ขนมลามีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ $1.41 \pm 0.20 \times 10^3$ และไม่พบยีสต์และราในผลิตภัณฑ์ขนมลาหลังการผลิต จะเห็นว่ามีความจุลินทรีย์ทั้งหมดและจำนวนของยีสต์และรา ต่ำกว่า 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และต่ำกว่า 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหลังการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมลารอบยังคงมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ลักษณะของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขนมลาที่ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส มีลักษณะของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงใน Figure 3 จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพด้วยประสาทสัมผัส พบว่าตัวอย่างขนมลาที่เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-35 วัน ผลิตภัณฑ์ขนมลามีความกรอบ สี และกลิ่นไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ตัวอย่างที่เก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียส มีเนื้อสัมผัสกรอบลดลงเล็กน้อย สีเข้มขึ้น และมีกลิ่นหืนเล็กน้อย

Table 2. Properties of the Khanom La products used in the experiment after preparation.

Parameters	Response
Moisture content (% dry basis)	2.31 ± 0.05
Water activity (a_w)	0.31 ± 0.00
Color	
L^*	60.58 ± 0.13
a^*	10.91 ± 0.04
b^*	36.58 ± 0.05
Hardness (N)	5.40 ± 0.54
Total plate count (cfu/g)	$1.41 \pm 0.2 \times 10^3$
Yeast and mold (cfu/g)	Not detected
Peroxide value (mEq/kg)	5.88

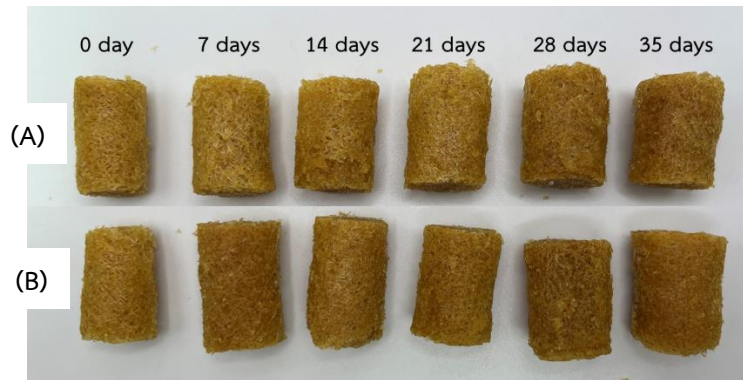


Figure 3. Photos of samples during stored at (A) 25 °C and (B) 35 °C for 35 days

3.2 การเปลี่ยนแปลงค่า water activity (a_w) และปริมาณความชื้น (moisture content) ของผลิตภัณฑ์ขนมลาระหว่างการเก็บรักษา

การสังเกตผลอุณหภูมิ 2 ระดับ คือที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส ต่อค่า a_w และปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ขนมลาในระหว่างการเก็บรักษา 35 วัน แสดงใน Figure 4 พบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณความชื้นและค่า a_w ($p \leq 0.05$) ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และที่ 35 องศาเซลเซียส โดยขนมลาค่าความชื้นเฉลี่ยสูงสุด คือ ร้อยละ 4.35 และ ร้อยละ 4.97 ตามลำดับ ในขณะที่ขนมลาค่า a_w เฉลี่ยสูงสุด คือ 0.4936 และ 0.5917 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้นมีส่วนเร่งการเพิ่มขึ้นของค่า a_w และปริมาณความชื้นของตัวอย่างขนมลา

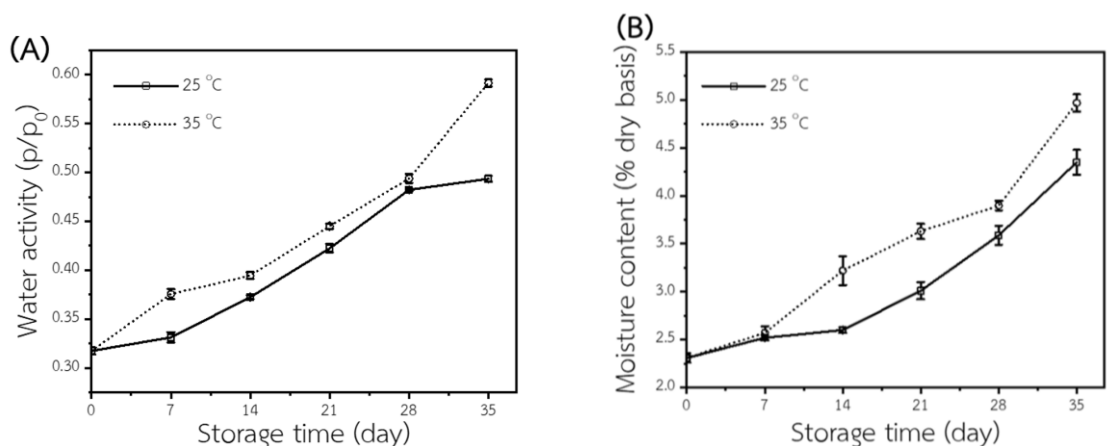


Figure 4. (A) Changes in water activity (a_w) and (B) Moisture content of Khanom La stored at 25 and 35 °C over 35 days

3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าสี (color) ของผลิตภัณฑ์ขนมลาระหว่างการเก็บรักษา

Figure 5 แสดงผลการศึกษาค่าสี (color) ของผลิตภัณฑ์ขนมลาระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บนานขึ้น โดยค่าความสว่างในช่วงวันที่ 28 มีแนวโน้มของค่าความสว่างใกล้เคียงกับค่าของการเก็บรักษาที่ 35 วัน ซึ่งผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวขึ้นทำให้ไม่สามารถบดให้ละเอียดได้ จึงทำให้อาจมีผลต่อการวัดค่าความสว่างได้ในขณะที่ค่าสีแดง (a^*) และ ค่าสี

เหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีอายุการเก็บรักษาของขนมลาเพิ่มมากขึ้น โดยค่า L^* a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์ขนมลามีการเปลี่ยนที่สูงขึ้นเมื่อเก็บรักษาที่ 35 องศาเซลเซียส

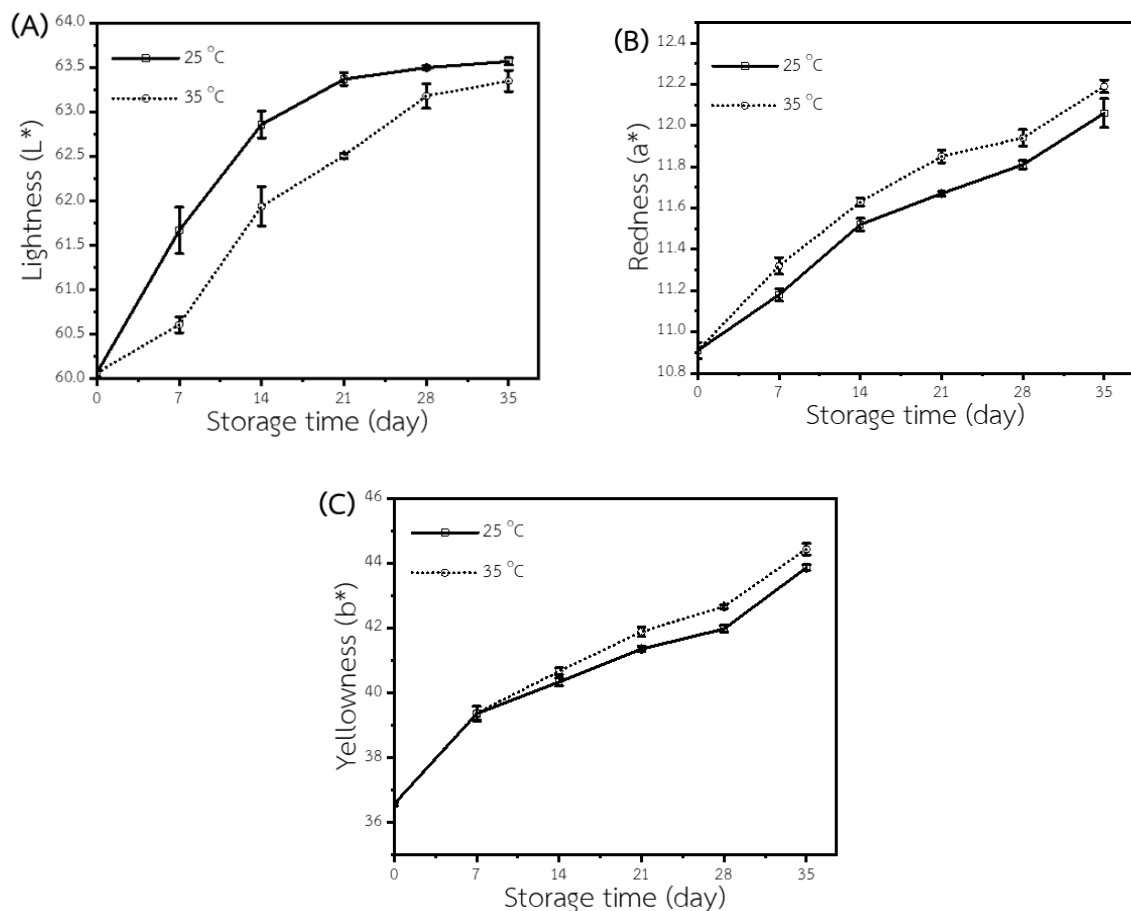


Figure 5. Changes of the color value of Khanom La stored at 25 °C and 35 °C over 35 days:

(A) Lightness (L^*), (B) Redness (a^*) and (C) Yellowness (b^*)

3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง (Hardness) ของผลิตภัณฑ์ขนมลาระหว่างการเก็บรักษา

ค่าความแข็งของขนมลาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นทั้งที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส จนถึงวันที่ 28 และค่าความแข็งจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเก็บรักษาครบ 35 วัน โดยตัวอย่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงมากกว่าตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเล็กน้อย (Figure 6)

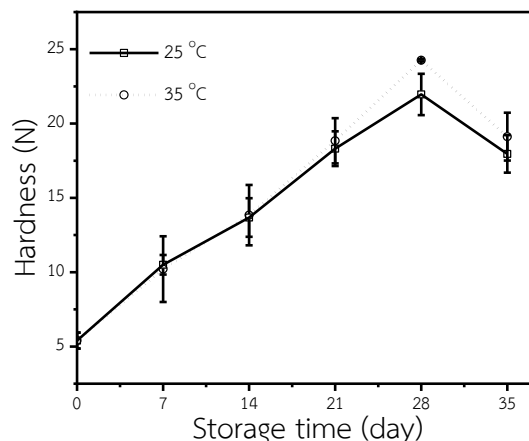


Figure 6. Changes of the hardness of Khanom La stored at 25 °C and 35 °C over 35 days

3.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี (Peroxide value) ของผลิตภัณฑ์ขนมลาระหว่างการเก็บรักษา

ผลิตภัณฑ์ขนมลาถูกเก็บรักษาในสภาวะจำลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมลาระหว่างการเก็บรักษา ทำการสุ่มตัวอย่างแต่ละกล่องมาทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ทุก 7 วัน นานถึง 35 วัน มาทำการวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจาก 0-35 วัน โดยค่าเปอร์ออกไซด์ของตัวอย่างขนมลาที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Figure 7)

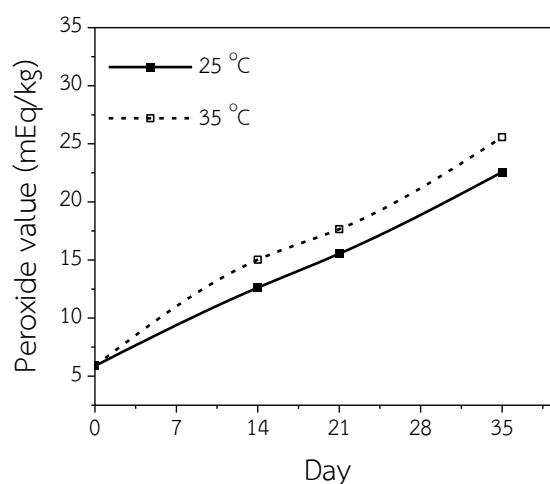


Figure 7. Changes of the peroxide value of Khanom La stored at 25 °C and 35 °C over 35 days

3.6 การศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความชื้นและค่า water activity ด้วยกราฟ sorption isotherm เพื่อหาจุดวิกฤตที่ใช้ในการออกแบบสภาวะการเก็บรักษาของขนมลา

ผลิตภัณฑ์ขนมลาบรรจุใส่ในถ้วยพลาสติกชนิด PET ขนาด 7 ออนซ์ และเก็บในกล่องพลาสติกที่ปิดสนิท ที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด เป็นเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะจำลองค่า a_w ที่ 0.07, 0.33,

0.44, 0.53, 0.75 และ 0.84 จากนั้นนำตัวอย่างขนมลามาวិเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างด้วยตู้อบลมร้อน (AOAC, 2002) เพื่อใช้ในการสร้างกราฟซอร์พชันไอโซเทอม (Sorption Isotherm) และรายงานผลค่า a_w และค่าความชื้นสมดุล ณ จุดวิกฤต ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขนมลา เมื่อสังเกตลักษณะภายนอกแล้วพบว่าขนมลาเก็บรักษาที่ระดับ a_w เป็น 0.53 ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะแห้ง กรอบ เปราะแตกหักได้ง่าย เริ่มมีสีเข้มชัดเจนขึ้น ส่วนที่ระดับ a_w เป็น 0.75 ขึ้นไป ขนมลาจะมีลักษณะนิ่ม เหนียว มีสีเข้มขึ้น รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) ของขนมลารอบใน Figure 8 เป็นแบบตัวเจ (J shape) ซึ่งเป็นไอโซเทอมชนิดที่ 3 (Type III) จากการแบ่งประเภทของ Brunauer's classification (Brunauer et al., 1940) ซึ่งเป็นรูปแบบที่มักพบในอาหารที่มีน้ำตาลปริมาณสูง เช่น ผลไม้อบแห้ง (Tsami et al., 1990) แอฟริคอต (Mrad et al., 2012) เป็นต้น จาก Figure 8 จุดวิกฤต (critical point) คือ สภาวะที่มีค่าความชื้นร้อยละ 9.51 และค่า a_w เท่ากับ 0.75

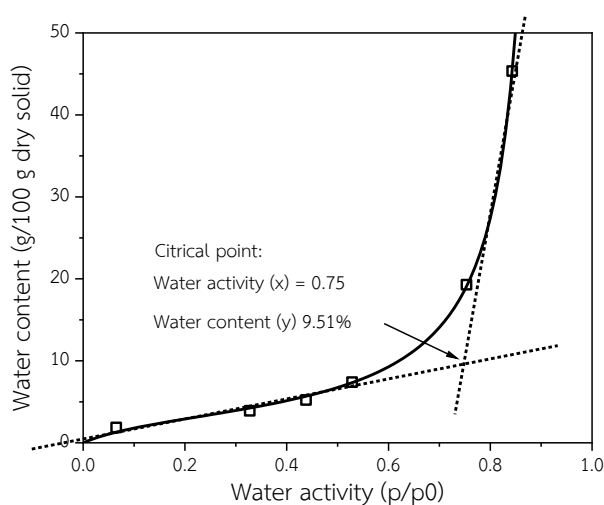


Figure 8. Sorption isotherm of Khanom La at room temperature

รูปร่างลักษณะเฉพาะของไอโซเทอมของการดูดซับขึ้นอยู่กับความหลากหลายและปริมาณรวมขององค์ประกอบของอาหารที่ดูดความชื้นได้ที่มีอยู่ในส่วนผสมที่ต่างกันโดยเฉพาะกลุ่มที่ที่ชอบน้ำ (Falade et al., 2003) ที่สภาวะ a_w ต่ำ น้ำจะถูกดูดซับได้เฉพาะบนพื้นผิวตรงหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) ของน้ำตาลที่เป็นผลึกเท่านั้น Weisser (1985) รายงานว่าสภาวะ a_w ต่ำ มักเกิดการละลายของน้ำตาลได้เล็กน้อย รวมถึงมีการพองตัวของไบโอโพลีเมอร์ (แป้งและโปรตีน) และการมีบริเวณที่จับกับน้ำเพิ่มขึ้นใหม่ที่ผิวของอาหาร เมื่อมีสภาวะ a_w สูง จะมีการละลายของน้ำตาลเกิดขึ้นและน้ำตาลที่เป็นผลึกจะถูกแปลงเป็นน้ำตาลในรูปอสัณฐาน (amorphous) ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างมากหลังจากการเปลี่ยนแปลงนี้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนตำแหน่งดูดซับที่เกิดจากการแตกของโครงสร้างผลึกของน้ำตาล (Ayranci et al., 1990)

4. อภิปรายผลการวิจัย

ลักษณะของตัวอย่างขนมลาที่เปลี่ยนแปลงจากการสังเกตด้วยสายตาโดยตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ตัวอย่างมีการเปลี่ยนที่ชัดเจนกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยตัวขนมลามีสีที่เข้มขึ้น และเนื้อสัมผัสที่มีความกรอบลดลง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้นส่งผลต่อคุณภาพ เพราะอุณหภูมิอาจเร่งการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีหรือปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์อย่างช้า ๆ และมีการเจริญของจุลินทรีย์เกิดขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสีย (Rahman &



Labuza, 1999) จากข้อมูลข้างต้น (Table 1) จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ขนมลากรอบเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ยังมีความชื้นในระดับต่ำ มีค่า a_w อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับอาหารกึ่งแห้ง จึงส่งผลให้อาหารประเภทนี้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีได้ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ปฏิกิริยาสีน้ำตาล และอาจจะเกิดการเจริญของเชื้อราและยีสต์ได้ ดังนั้นควรมีการรักษาให้ผลิตภัณฑ์ขนมลามีค่า a_w ที่ต่ำ เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ (Thanonkaew & Ruanglay, 2016)

ค่า a_w เป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นต่ำ ในขณะที่ a_w ที่สูงกว่า 0.8 ทำให้จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Galić et al., 2009) ค่า a_w เฉลี่ยสูงสุดของขนมลาที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.4936 และ 0.5917 ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วอาหารที่มีค่า a_w ในช่วง 0.4–0.6 มักมีความคงตัวมากในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (Vadukapuram et al., 2014) ลิพิดจะเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันมากที่สุดเมื่อ a_w อยู่ในช่วง 0.3–0.6 นอกจากนี้ ค่า a_w ของตัวอย่างขนมลาที่ทำการศึกษาทั้งหมดที่มีค่าต่ำกว่า 0.75 มั่นใจได้ว่าจะสามารถป้องกันหรือชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ (Ellin, 2007)

ปริมาณความชื้นมีบทบาทสำคัญในการพิจารณาความคงตัวของผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากนี้ยังเห็นได้จาก Figure 2 พบว่าค่าปริมาณความชื้นของขนมลาเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นอาจเป็นผลมาจากการได้รับการดูดซึมน้ำจากอากาศที่อยู่บริเวณผิวของขนมลา โดยโพลีเมอร์อินทรีย์ขององค์ประกอบในขนมลา เช่น แป้ง น้ำตาล และโปรตีน เป็นต้น ตามด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำภายใน และเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มเติม ซึ่งสอดคล้องการผลการศึกษาของ Sharma & Riar (2020) ในคุกกี้ข้าวฟ่าง ซึ่งปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์อาจเนื่องมาจากลักษณะการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้ง สภาพแวดล้อมในการเก็บรักษา (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) รวมถึงลักษณะของวัสดุบรรจุภัณฑ์ (Nagi et al., 2012)

การที่ผลิตภัณฑ์ขนมลามีค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่สูงขึ้น อาจเกิดจากผลิตภัณฑ์ขนมลาประกอบด้วยน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้โมเลกุลของน้ำแยกออกมาและเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของสารประกอบคาร์บอน ได้เป็นสารน้ำตาลแดงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า คาราเมลไรเซชัน (Caramelization) ซึ่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น (Murata, 2021) นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลในน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่อะมิโนอิสระที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ขนมลา ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Kruangam & Intipunya, 2013) นอกจากนี้ระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แต่ละสัปดาห์ส่งผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสี เนื่องจากมีปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่กล่าวมาเกิดขึ้นตลอดเวลาที่ทำการเก็บรักษา (Murata, 2021) โดย Gonzales et al. (2010) ได้รายงานผลอัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในนมผงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม a_w (ช่วง 0.33–0.98) และอุณหภูมิในการเก็บรักษา (37–60 องศาเซลเซียส) ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากการดูดซับน้ำจากปรากฏการณ์ plasticization ของไบโอโพลีเมอร์ ส่งผลให้ค่า glass transition ต่ำลง ซึ่งทำให้โพลีเมอร์เปลี่ยนจาก glassy state ไปเป็น rubbery state โมเลกุลของน้ำและโพลีเมอร์ต่าง ๆ ในอาหารจึงเคลื่อนที่ได้มากขึ้นทำให้อัตราเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น

ความแข็ง (hardness) เป็นเกณฑ์หลักในการประเมินคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ขนมลากรอบ เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ขนมลาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นทั้งที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส จนถึงวันที่ 28 และค่าความแข็งลดลงเล็กน้อยเมื่อเก็บรักษาครบ 35 วัน โดยตัวอย่างที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงมากกว่าตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งเมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้นขณะเก็บรักษาอาหารความชื้นต่ำถูกอธิบายโดย Harris & Paleg (1996) โดยเป็นผลจาก partial plasticization ของส่วนผนังของรูพรุนในอาหารที่มีความกรอบ เมื่อได้รับความชื้นจากผิวอาหาร จะสามารถพองตัวและเพิ่มการเชื่อมติด (cohesion) ขนาดของรูอากาศจึงเล็ก



ลง ส่งผลให้โครงสร้างมีความเหนียว (toughness) มากขึ้นด้วยทำให้น้ำมีการกระจายตัวในเนื้ออาหารแห้งได้ยากขึ้น หลังจากเก็บรักษา 35 วัน เป็นเวลานานพอสำหรับขนมลาในการดูดความชื้นเข้าไปในโครงสร้างอาหารส่งผลให้มีความแข็งลดลงได้ โดยทั่วไปค่าความแข็ง (hardness) ของอาหารแห้ง/อาหารความชื้นต่ำ (dehydrated food) ได้รับผลกระทบจากปริมาณความชื้นและค่า a_w และลักษณะทางเคมีกายภาพอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เช่น ปฏิกริยาระหว่างส่วนผสม ของไขมัน น้ำตาล แป้ง เป็นต้น ผลของค่า water activity ต่อความกรอบ (crispness) มีความสำคัญมากกว่าอุณหภูมิการเก็บรักษา (Sharma & Riar, 2020) โดย Carter et al., (2015) ได้รายงานว่าตัวอย่างคุกกี้ที่ค่า a_w ที่ต่ำกว่าค่า a_w ณ จุดวิกฤต จะคงความกรอบและเนื้อสัมผัสที่ดีของผลิตภัณฑ์ไว้ การเคลื่อนที่และการกระจายความชื้น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของส่วนประกอบหลักของอาหาร และปฏิกริยาระหว่างส่วนประกอบนั้นส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอ (heterogeneous) ระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งค่า a_w และปริมาณความชื้นที่สอดคล้องกับการปฏิเสธของผู้บริโภคจะแตกต่างกันไปตามประเภทของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ Hough et al., (2001) รายงานว่าการสูญเสียความกรอบของบิสกิตระหว่างการเก็บรักษาจะเห็นได้ชัดเมื่อค่า a_w อยู่ระหว่าง 0.43 ถึง 0.60 ผลการศึกษาที่คล้ายกันได้ถูกรายงานโดย Panyathitipong et al., (2020) ในขนมลารอบและ Sharma & Riar (2020) ในคุกกี้ข้าวฟ่าง

ผลการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิมีส่วนในการเร่งการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์ออกไซด์ ซึ่งค่าเปอร์ออกไซด์ใช้ในการชี้บ่งคุณภาพของน้ำมันและไขมันได้ การหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นการหืนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Auto-oxidation) ที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นพันธะเพอร์ออกไซด์ (peroxide linkage) เมื่อไขมันและน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ จะทำให้มีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวลดลง (Cheung & Mehta, 2015) จาก Figure 7 ผลการศึกษาเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์ของผลิตภัณฑ์ขนมลาระหว่างการเก็บรักษาที่ 25 และ 35 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อยละ 50 ในตู้สุญญากาศ โดยการตรวจสอบค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value) พบว่าในทั้งสองอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ส่งผลให้ปริมาณค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value) สูงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อขนมลารักษาเป็นเวลานานขึ้นในระหว่าง 0 ถึง 35 วัน การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญต่อคุณภาพของอาหารทอด คือ การเกิดกลิ่นหืน จากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ หรือออกซิเดชัน (Autooxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากออกซิเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่ตำแหน่งพันธะคู่ ทำให้เกิดเป็นเพอร์ออกไซด์ และอาจเกิดออกไซด์ต่อไปเป็นแอลดีไฮด์ คีโตน กรดอินทรีย์ ทำให้เกิดการหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation rancidity) (Cheung & Mehta, 2015) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการติดตามการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถประเมินได้จากการวัดค่า Peroxide value ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเป็นสิ่งสำคัญต่ออายุการเก็บรักษาของขนมลา ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสารเพอร์ออกไซด์ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในตัวอย่างขนมลา ระหว่างการเก็บรักษาที่เกิดจากไขมันที่อยู่ผลิตภัณฑ์สามารถที่จะเกิดออกซิเดชันได้ โดยมีปัจจัยเร่ง คือ ปริมาณน้ำ อุณหภูมิ และออกซิเจน โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดได้เร็วขึ้นหากกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของอาหารเป็นชนิดไม่อิ่มตัว (Thanonkaew & Ruanglay, 2016) อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์ออกไซด์เมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลน้ำสร้างพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเพอร์ออกไซด์ ส่งผลทำให้ไฮโดรเพอร์ออกไซด์คงตัวต่อการสลายตัวและหยุดการทำงานของสารประกอบนี้เพื่อเพิ่มการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์แทน (Baker et al., 2002) นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างขนมลาที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลาครบ 35 วัน ไปวิเคราะห์ปริมาณไขมันทั้งหมด (Total crude fat) ด้วยเครื่อง Soxhlet โดยผลวิเคราะห์ได้ผลดัง Table 3



Table 3. Comparison of crude fat content of Khanom La stored at 25 °C and 35 °C for 35 days

Sample	Crude fat content (%)
Khanom la (before the experiment)	0.79±0.07 ^a
Khanom La (stored at 25 °C for 35 days)	0.46±0.02 ^b
Khanom La (stored at 35 °C for 35 days)	0.41±0.08 ^b

Note: Values were mean ± SD. Values with different letters in the same column were significantly different at $p \leq 0.05$.

จาก Table 3 จะเห็นว่าปริมาณไขมันของผลิตภัณฑ์ขนมลาหลังการผลิตมีค่าสูงกว่าปริมาณไขมันในตัวอย่งขนมลาที่ถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 วัน โดยปกติแล้วการเกิดออกซิเดชันไม่ได้เป็นสาเหตุให้ปริมาณน้ำมันลดลง เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยาที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นพันธะเพอร์ออกไซด์ (Peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ ออกซิเดชันจะเกิดขึ้นเองแบบต่อเนื่องตลอดเวลา เมื่อไขมันและน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ (Wang et al., 2023) ซึ่งทำให้คุณภาพของไขมันและน้ำเปลี่ยนไปโดยที่ปริมาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไขมัน ผลใน Table 3 การที่ปริมาณไขมันลดลงเมื่อทำการเก็บรักษานานขึ้นอาจเป็นเพราะน้ำมันเกิดการซึมออกมาจากตัวผลิตภัณฑ์และติดอยู่กับภาชนะบรรจุ นอกจากนี้เมื่อน้ำมันเกิดการหืนโดยปฏิกิริยานี้ จะทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ไม่จำเป็นต่อร่างกายถูกทำลาย มีผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการของน้ำมันลดลงด้วย และยังทำลายพาวิตามินต่าง ๆ ที่ละลายในไขมันและน้ำมันได้อีกด้วย (Cheung & Mehta, 2015)

ผลิตภัณฑ์ขนมลาที่ผลิตใหม่มาบรรจุใส่ในถ้วยพลาสติกและเก็บในกล่องพลาสติกที่ปิดสนิท ที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิด เป็นเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะจำลองค่า a_w ที่ 0.07, 0.33, 0.44, 0.53, 0.75 และ 0.84 จากนั้นนำตัวอย่างขนมลามาวិเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นสมดุลของตัวอย่างด้วยตู้อบลมร้อน (AOAC, 2002) เพื่อใช้ในการสร้างกราฟซอร์ปชันไอโซเทอรัม (Sorption Isotherm) และรายงานผลค่า a_w และค่าความชื้นสมดุล ณ จุดวิกฤตของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ขนมลา เมื่อสังเกตลักษณะภายนอกแล้วพบว่าขนมลาเก็บรักษาที่ระดับ a_w 0.53 เริ่มมีสีเข้มชัดเจนขึ้น และที่ระดับ water activity 0.75 ขึ้นไป ขนมลามีลักษณะนิ่ม เหนียว มีสีเข้มขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นขนมลาจะเกิดการพองตัว เนื้อสัมผัสจะนุ่มขึ้นที่บริเวณผิวโดยรอบของขนมลา ความสามารถในการดูดซับน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่นุ่มบริเวณผิวของอาหารความชื้นต่ำ (Saša et al., 2006) เนื่องจากองค์ประกอบในขนมลาที่ละลายน้ำได้ชนิดหลัก คือน้ำตาล ซึ่งจะดูดซับโมเลกุลของน้ำได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดขึ้นของเหลวที่ผิวด้านนอกของอาหารเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูง (Mollan & Celik, 1995) การที่ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้นเมื่อเก็บรักษาที่ระดับ a_w ที่สูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม a_w อยู่ในช่วง 0.33-0.54 ซึ่งปฏิกิริยาสีน้ำตาลจะเริ่มเกิดขึ้นในโพลิเมอร์ที่มีการดูดซับน้ำ (Immobilized) ในขณะที่ยังอยู่ใน glassy state เริ่มมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำในโพลิเมอร์เพิ่มจนถึง rubbery state ซึ่งปฏิกิริยาสีน้ำตาลจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นด้วย (Bell, 1995)

ลักษณะกราฟซอร์ปชันไอโซเทอรัม (Sorption isotherm) (Figure 2) ของผลิตภัณฑ์ขนมลาซึ่งทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และค่า a_w 0.07-0.84 โดยควบคุมค่า a_w ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัวต่าง ๆ โดยกราฟ Sorption isotherm แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณหรือความชื้นสมดุลในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์หรือค่า a_w สำหรับผลิตภัณฑ์ขนมลาเมื่อถูกเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ระหว่างการเก็บผลิตภัณฑ์ขนมลามีการเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์และอากาศภายในภาชนะปิดเข้าสู่สภาวะสมดุล คือมีค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ขนมลามีค่าใกล้เคียงกับค่า a_w ของสารละลายเกลืออิ่มตัว โดยตรวจสอบได้จากน้ำหนักของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากเก็บไว้ 4 สัปดาห์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากราฟ Sorption isotherm มีการเปลี่ยนแปลงแบ่งออกเป็น 2 ระยะ โดยระยะที่ 1 ในช่วง a_w ต่ำกว่า 0.70 ลักษณะเส้นกราฟของค่าความชื้นในขนมลามีความชันเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของ a_w เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งตัวอย่างขนมลาจะคงความกรอบอยู่ แสดงให้เห็นว่า



ขนมลามีความสามารถในการดูดความชื้นได้น้อย ในขณะที่ระยะที่ 2 ในช่วงที่ a_w มากกว่า 0.70 เส้นกราฟซอร์ปชันไอโซเทอรั่มมีความชันมาก แสดงว่าขนมลามีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก ตัวอย่างขนมลามีเนื้อสัมผัสที่นุ่มเหนียว เริ่มมีกลิ่นหืน และสีของผลิตภัณฑ์เข้มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของคุณภาพของขนมลาที่ถูกเก็บรักษาในสภาวะจำลองที่ระดับ a_w 0.75 เมื่อความชื้นในสภาวะแวดล้อมมีค่าต่ำ จากผลการทดลองนี้กล่าวได้ว่าผลิตภัณฑ์ขนมลารอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะ Sorption isotherm ดังกล่าวเป็นสมบัติของอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูง ดังนั้นอาหารที่ไวต่อการดูดความชื้นเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้ปริมาณความชื้นในอาหารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับรายงานของ Kruangam & Intipunya, (2013) ซึ่งศึกษา Sorption isotherm ของลำไยผงอัดก้อน โดยพบว่าที่ค่า a_w สูงกว่า 0.50 ปริมาณความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งจากรายงานการวิจัยของ Yan et al. (2008) ซึ่งได้ศึกษา Sorption isotherm ของกล้วยผงพบว่าปริมาณความชื้นสมดุลของกล้วยผงจะเพิ่มขึ้น เมื่อระดับค่า a_w สูงขึ้นที่ระดับ 0.58 ลักษณะ Sorption isotherm ประเภทนี้จะเกิดกับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งจัดเป็น Sorption isotherm ประเภทที่ 3 เมื่อจำแนกตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นสมดุลของอาหารที่อุณหภูมิเดียวกัน (Mathlouthi & Rogé, 2003; Sablani et al., 2007) เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของขนมลาที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูงจึงสามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้น

เมื่อทราบลักษณะของซอร์ปชันไอโซเทอรั่มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ขนมลาแล้ว ขั้นตอนนี้จะนำความรู้ดังกล่าวมาหาค่าความชื้นวิกฤต และค่า a_w วิกฤต ของขนมลา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคัดเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ขนมลาต่อไป เนื่องจากรูปแบบไอโซเทอรั่มขนมลารอบเป็นแบบ J shape ซึ่งจะดูดซับความชื้นได้ช้าหากสภาวะแวดล้อมมีความชื้นต่ำแต่จะดูดซับความชื้นอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง ซึ่งลักษณะของการวางขายของขนมลานั้นจะวางขายในสภาวะอากาศปกติไม่มีการควบคุมสภาวะบรรยากาศ ดังนั้นสภาวะอากาศหรือความชื้นจะแปรผันไปในแต่ละวัน หากวันที่อากาศชื้นมากจะส่งผลต่อการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียความกรอบ และคุณภาพไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้ จากผลการทดลอง หากทำการลากเส้นตรงเส้นที่ 1 ทับบนเส้นกราฟไอโซเทอรั่มในช่วง a_w น้อยกว่า 0.70 และลากเส้นตรงเส้นที่ 2 ทับบนเส้นกราฟไอโซเทอรั่มในช่วง a_w มากกว่า 0.70 ซึ่งจุดตัดที่ได้จะเป็นของเส้นตรงทั้งสองเส้นนี้ คือจุดที่ขนมลามีปริมาณความชื้นร้อยละ 9.51 และค่า a_w เท่ากับ 0.75 ถือเป็นค่าความชื้นวิกฤต และค่า a_w วิกฤต ของขนมลา หากต้องการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมลาให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ควรควบคุมสภาวะในการเก็บรักษาหรือคัดเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ขนมลาในสภาวะบรรยากาศที่ระดับ a_w ต่ำกว่า 0.75 หรือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำกว่าร้อยละ 75 เพื่อให้ขนมลามีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าร้อยละ 9.51

แต่อย่างไรก็ตามอาหารที่มีองค์ประกอบของน้ำตาล โดยเฉพาะกรณีของขนมลามักจะมีปัญหาด้านเนื้อสัมผัสที่นิ่มเหนียว การเกาะติดกัน หรือการเหม็นหืนระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากขนมลารอบมีความสามารถในการดูดซับความชื้นจากบรรยากาศได้ดี ส่งผลต่อการเสื่อมเสียคุณภาพด้านอื่น ๆ ได้ ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้ซึ่งได้ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับความชื้นของขนมลา และผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเคมี และกายภาพในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการเลือกบรรจุภัณฑ์ และควบคุมการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ขนมลาต่อไป

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษามีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมลารอบมีคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาณความชื้น ค่า a_w ค่าสี (L^* , a^* , b^*) และค่าเปอร์ออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ซอร์ปชันไอโซเทอรั่มการดูดซับความชื้น (Sorption isotherm) ของผลิตภัณฑ์ขนมลารอบสามารถนำมาใช้ในการประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เบื้องต้นได้ จากผลการวิจัยนี้สภาวะที่



ควรเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมลากรอบในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาวะจำลองที่ใกล้เคียงกับสภาพอากาศของประเทศไทย อีกทั้งการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมลา ณ สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตของผลิตภัณฑ์คือ ที่ระดับ a_w เท่ากับ 0.75 และค่าความชื้นวิกฤตที่ร้อยละ 9.51 ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวแม้จะส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้น ค่า a_w ค่าสี (L^* , a^* , b^*) และค่าเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่การเก็บรักษาในระยะเวลา 35 วัน ผลิตภัณฑ์ยังคงมีคุณภาพที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย และโปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนข้อมูลการสร้างเครือข่ายความร่วมมือการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- American Oil Chemists' Society (AOCS). (2003). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society. 4thed. Firestone.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2002). Official methods of analysis of AOAC international. 18thed. The United States of America.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). Official methods of analysis of AOAC international. 17thed. The United States of America.
- Ayranci, E., Ayranci, G., & Dogantan, Z. (1990). Moisture sorption isotherms of dried apricot, fig and raisin at 20 C and 36 C. Journal of food science, 55(6), 1591-1593.
- Baker, GL., Sims, CA., Gorbett, DA., Sanders, TH., & O'keefe, SF. (2002). Storage water activity effect on oxidation and sensory properties of high-oleic peanuts. Journal of food science, 67(5), 1600-1603.
- Bell, LN. (1995). Kinetics of non-enzymatic browning in amorphous solid systems: distinguishing the effects of water activity and the glass transition. Food Research International, 28(6), 591-597.
- Bird, P., Flannery, J., Crowley, E., Agin, J., Goins, D., & Jechorek, R. (2015). Evaluation of the 3M™ Petrifilm™ rapid yeast and mold count plate for the enumeration of yeast and mold in food: Collaborative study, first action 2014.05. Journal of AOAC International, 98(3), 767-783.
- Burnett, DJ., Thielmann, F., & Booth, J. (2004). Determining the critical relative humidity for moisture-induced phase transitions. International journal of pharmaceuticals, 287(1-2), 123-133.
- Carter, BP., Galloway, MT., Campbell, GS., & Carter, AH. (2015). The critical water activity from dynamic dewpoint isotherms as an indicator of crispness in low moisture cookies, J. Food Meas. Charact, 9(2015), 463-470.
- Cheung, PCK., & Mehta, BM. (2015). Handbook of food chemistry (Vol. 11). Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Chutchanok, B. (2020). Thai dessert tradition aspect. Journal of Thai Food Culture, 2(1), 1-13. (in Thai)
- Ellin, DM. (2007). Microbial food spoilage-Losses and control strategies. United States of America: Food Research Institute, University of Wisconsin-Madison.
- Falade, KO., Adetunji, Al., & Aworh, OC. (2003). Adsorption isotherm and heat of sorption of fresh-and osmo-oven dried plantain slices. European Food Research and Technology, 217, 230-234.
- Farhoosh, R., & Esmaeilzadeh Kenari, R. (2009). Anti-rancidity effects of sesame and rice bran oils on canola oil during deep frying. Journal of the American Oil Chemists' Society, 86(6), 539-544.



- Galić, K., Ćurić, D., & Gabrić, D. (2009). Shelf life of packaged bakery goods-A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 49(5), 405-426.
- Gonzales, AP., Naranjo, GB., Leiva, GE., & Malec, LS. (2010). Maillard reaction kinetics in milk powder: Effect of water activity at mild temperatures. *International Dairy Journal*, 20(1), 40-45.
- Harris, M., & Peleg, M. (1996). Patterns of textural changes in brittle cellular cereal foods caused by moisture sorption. *Cereal chemistry (USA)*, 73(2), 225-231.
- Hough, G., Buera, MDP., Chirife, J., & Moro, O. (2001). Sensory texture of commercial biscuits as a function of water activity. *Journal of texture studies*, 32(1), 57-74.
- Kruangam, S., & Intipunya, P. (2013). A study of sorption isotherm and quality changes during storage of powdered longan cube. *Food and Applied Bioscience Journal*, 1(2), 102-111. (in Thai)
- Mathlouthi, M., & Rogé, B. (2003). Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. *Food chemistry*, 82(1), 61-71.
- Mollan, MJ., & Celik, M. (1995). The effects of humidity and storage time on the behavior of maltodextrins for direct compression. *International journal of pharmaceutics*, 114(1), 23-32.
- Mrad, ND., Bonazzi, C., Boudhrioua, N., Kechaou, N., & Courtois, F. (2012). Influence of sugar composition on water sorption isotherms and on glass transition in apricots. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 403-411.
- Murata, M. (2021). Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction. *Glycoconjugate Journal*, 38, 283-292.
- Nagi, HPS., Kaur, J., Dar, BN., & Sharma, S. (2012). Effect of storage period and packaging on the shelf life of cereal bran incorporated biscuits. *American Journal of Food Technology*, 7(5), 301-310.
- Panyathitipong, W., Tempiam, S., Suttha, W., Chomshome, N., & Masavang, S. (2022). Effect of Storage Conditions on Qualities and Water Sorption Isotherm of Khanom La. *Trends in Sciences*, 19(8), 3466-3466.
- Rahman, MS., & Labuza, TP. (1999). Water activity and food preservation [Online]. Retrieved August 1, 2023, from: https://moisturecontrol.weebly.com/uploads/5/3/5/3/53532707/book_ch2-_water_activity_and_food_preservation.pdf
- Sablani, SS., Kasapis, S., & Rahman, MS. (2007). Evaluating water activity and glass transition concepts for food stability. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 266-271.
- Saša, B., Odon, P., Stane, S., & Julijana, K. (2006). Analysis of surface properties of cellulose ethers and drug release from their matrix tablets. *European journal of pharmaceutical sciences*, 27(4), 375-383.
- Sharma, S., & Riar, CS. (2020). Effect of storage period and packaging materials on textural, phenolic, antioxidant properties of cookies made from raw and germinated minor millet blends flour. *Annals: Food Science and Technology*, 21(1), 74-85.
- Tapia, MS., Alzamora, SM., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. *Water activity in foods: Fundamentals and applications*, 323-355.
- Thanonkaew, A., & Ruangklay, P. (2016). Effect of frying oil on quality changes of khanom la during storage at room temperature. *Journal of Rajamangala University of Technology Srivijaya*, 8(2), 203-218. (in Thai)
- Vadukapuram, N., Hall, C., Tulbek, M., & Niehaus, M. (2014). Physicochemical properties of flaxseed fortified extruded bean snack. *International journal of food science*, 2014, 478018.
- Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H., & Wei, F. (2023). Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*.
- Weisser, H. (1985). Influence of temperature on sorption equilibria. Dordrecht, Boston, Lancaster: Martinus Nijhoff Publishers.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, MJ., & Oliveira, FA. (2008). Sorption isotherms and moisture sorption hysteresis of intermediate moisture content banana. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 342-348.