วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 28 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2566
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 28 (No.2) May – August 2023 บทความวิจัย

# การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ต่อความกรอบของอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย

# Changes in Relative Humidity on Crispness of Dried Sheet Food Produced by Thai Community

นักสิทธิ์ ปัญโญใหญ่* และ ปิลันธสุทธิ์ สุวรรณเลิศ
Naksit Panyoyai* and Pilunthasut Suwannalert
*คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ศูนย์แม่ริม*
*Faculty of Agricultural Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Mae Rim Campus*

Received : 3 September 2022
Revised : 21 November 2022
Accepted : 3 March 2023

## บทคัดย่อ

ความกรอบเป็นคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่สำคัญของอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย เช่น ข้าวแตน ข้าวเกรียบว่าว ข้าวแคบ หมูแผ่น แผ่นปลากรอบ ความกรอบจึงเกี่ยวข้องกับปัจจัยกายภาพ เช่น ค่าความชื้นสัมพัทธ์ค่าวอเตอร์แอคติวิตี ($a_w$) และค่าความชื้น งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สืบค้นมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอาหารแปรรูปชนิดแผ่นและลักษณะทางโครงสร้างระดับจุลภาคเกี่ยวกับคุณลักษณะความกรอบ และ (2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อความกรอบ โดยการทดสอบความกรอบด้วยวิธีทางกลสองแบบคือการทดสอบเจาะและการทดสอบกดตัวอย่างที่ผ่านการนำไปบ่มในตู้ปรับความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนดร้อยละ 40, ร้อยละ 50, และ ร้อยละ 60 ณ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า อาหารแผ่นแห้งที่พร้อมบริโภคแบ่งเป็นสามกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้าวและแป้ง กลุ่มผลิตภัณฑ์จากสัตว์ และ กลุ่มอื่น ๆ โครงสร้างจุลภาคผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นแผ่นขรุขระ และมีความพรุน ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้โมเลกุลน้ำเข้าไปเกาะกับรูพรุนส่งผลต่อการเพิ่มค่า $a_w$ และความชื้นของตัวอย่าง แต่แรงในการเจาะ(หรือการกด)ลดลง จำนวนพีค รวมทั้งความสูงของพีกลดลงเช่นกัน ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงชัดเจนในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50-60 ดังนั้นการรักษาความกรอบอาหารแผ่นแห้งแต่ละชนิดที่แปรรูปโดยชุมชนควรพิจารณาค่าความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษาที่ส่งผลต่อค่า $a_w$ และค่าความชื้นที่เฉพาะกับผลิตภัณฑ์มาใช้พิจารณาประกอบการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

**คำสำคัญ** : ความกรอบ ; ผลิตภัณฑ์อาหารชุมชนไทย ; ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ; ค่าวอเตอร์แอคติวิตี ; ค่าความชื้น

## Abstract

Crispness is an important organoleptic characteristic of dried sheet food produced by the Thai communities, such as sticky rice crackers, crisp rice cakes, crispy pork, and crispy fish flakes. Crispness is related to physical factors such as relative humidity, water activity, and moisture content. The objectives of this research were (1) to investigate the standard of community food products and study the structural characteristic at the microscale level of crispness and (2) to study the changes in relative humidity on the crispness. Two mechanical tests, penetration and compression, were performed on samples incubated in relative humidity values of 40%, 50%, and 60% at 30 $^{O}$C. It was found that the ready-to-eat dry products were divided into three groups, rice and flour products, animal products, and the other groups. These sheet-like products had rough surfaces and porous structure. Increasing relative humidity caused more water molecules to bind to the pores resulting in the higher water activity and moisture contents, but lower penetration and compression forces. The decreases of number of peaks and peak heights were clearly observed in the range of relative humidity values of 50-60%. Therefore, to maintain the crispness of some dried food products processed by the communities, the specification of relative humidity value affected to water activity value and moisture content should be considered for their quality control.

**Keywords** : crispness ; Thai community food product ; relative humidity ; moisture content ; water activity

***Corresponding author** : **E-mail** : naksit_pan@cmru.ac.th

**บทนำ**

ความกรอบของอาหารจัดเป็นคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสอย่างหนึ่งที่สำคัญต่อผู้บริโภค ความกรอบของอาหารเกิดจากการใช้ประสาทสัมผัสด้วยการกัดด้วยฟันหน้า (incisor) ครั้งแรกลงบนชิ้นอาหารในแนวดิ่งแล้วชิ้นอาหารจะแตกออกเป็นเสี่ยง ๆ กระจายออกในแนบราบโดยทันที ทั้งนี้อาจมีการเกิดเสียงสูงในระหว่างที่ชิ้นอาหารแตกหักก็ได้ หรือความกรอบเกิดจากการใช้แรงบดเคี้ยวอาหารที่กรอบในช่องปากด้วยฟันกราม (molar) การให้นิยามของความกรอบผลิตภัณฑ์อาหารด้วยประสาทสัมผัสจึงมีความแตกต่างกันออกไปเนื่องจากมีคุณลักษณะเนื้อสัมผัสหลายอย่างที่รวมกันแล้วเกิดความกรอบ เช่น ความกรอบสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้กัดแล้วเกิดเสียงที่มีความถี่สูง (Seymour and Ann, 1988) ความกรอบสัมพันธ์กับความแข็งในขณะที่ฟันกัด (Barrett, *et al*., 1994) ความกรอบสัมพันธ์กับโครงสร้างโพรงอากาศ และการเกาะกันเป็นก้อน (Dacremont ,1995) ผลิตภัณฑ์อาหารของต่างประเทศที่มีคุณลักษณะความกรอบเด่นชัด เช่น มันฝรั่งทอดกรอบ ข้าวโพดกรอบ ป๊อปคอร์น ขนมปังกรอบ แครกเกอร์ ธัญพืชอบกรอบ เป็นต้น (Sirileart, 2008)

อาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยที่มีลักษณะบ่งชี้ถึงความกรอบซึ่งเป็นคุณลักษณะที่จำเป็นต่อการยอมรับตัวผลิตภัณฑ์ว่ายังมีคุณภาพเนื้อสัมผัสตามที่ควรจะเป็น เช่น ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าว (ข้าวเกรียบ ข้าวแตน ข้าวพอง) ผลิตภัณฑ์จากสัตว์ (แคปหมู หนังพอง) ผลิตภัณฑ์จากถั่ว (ถั่วทอดแผ่น แผ่นถั่วเน่า) เป็นต้น คุณลักษณะความกรอบเหล่านี้ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งเป็นมาตรฐานกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ผลิตโดยชุมชนเป็นที่น่าเชื่อถือ ยอมรับ และสร้างความมั่นใจในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารที่แปรรูปโดยชุมชน มาตรฐานผลิตภัณฑ์นี้จำนวนหลายรายการได้กำหนดให้ความกรอบเป็นคุณลักษณะที่ใช้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส เช่น ผลิตภัณฑ์ข้าวแตนมีคุณลักษณะที่ต้องการคือ ต้องกรอบอาจแตกหักได้เล็กน้อย เนื้อสัมผัสต้องไม่แข็งกระด้าง (Thailand Industrial Standard Institute, 2019)

การวัดทางกลเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดการไหลได้ หรือ “รีโอโรยี” เป็นหลักการหนึ่งในการวัดความกรอบที่เกิดจากการสูญเสียโครงสร้างจากการใช้แรงกระทำ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เลียนแบบการกัดในปากมนุษย์ (Vickers and Bourne, 2006) โดยเฉพาะการทดสอบด้วยการกด (compression test) เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเพราะคล้ายกับการกัดเคี้ยวอาหาร การทดสอบนี้ให้แรงกดทับตัวอย่างอาหารที่อยู่ระหว่างแผ่นผิวเรียบ 2 แผ่น หรือการใช้หัววัดเจาะลงบนตัวอย่างที่วางบนทรงกระบอกกลวง (Van Heck *et al*., 2007) การทดสอบสามารถทดสอบอาหารเป็นรายชิ้นหรือหลายชิ้นที่วางในช่องใส่ตัวอย่างก็ได้ เมื่อหัววัดเคลื่อนที่ลงมาอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราคงที่ทำให้ตัวอย่างอาหารถูกกดแล้วเกิดการแตกหักมีเสียง รายงานแรงที่มีต่อการเสียสภาพของเซลล์อาหารเป็นจำนวนยอดแหลมในกราฟ (พีค) เช่น การทดสอบความกรอบของเปลือกขนมปัง (Jakubczyk *et al*., 2008) ความกรอบมันฝรั่งทอดกรอบ (Salvador *et al*., 2009) และความกรอบของเผือกแผ่นอบแห้ง (Neanchad *et al*., 2010)

ความชื้นสัมพัทธ์เป็นสถาวะหนึ่งที่เกี่ยวกับความชื้นในอากาศ กล่าวคือ อัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำในอากาศในขณะหนึ่ง ที่อุณหภูมิเฉพาะ ต่อ ไอน้ำสูงสุดที่อากาศ ที่อุณหภูมินั้นสามารถอุ้มโมเลกุลน้ำไว้ได้ การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ 100% อากาศจึงเต็มไปด้วยไอน้ำ และไม่สามารถเก็บกักไอน้ำไว้ได้อีก หากมีน้ำมากกว่านี้จะเกิดการกลั่นตัว

ของไอน้ำเป็นของเหลว การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์รอบชิ้นอาหารที่เก็บรักษาไว้ย่อมส่งผลต่อการดูดซับความชื้นจากไอน้ำในบรรยากาศทำให้ความชื้นของอาหารนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเพราะเกิดการถ่ายเทความชื้นระหว่างชิ้นอาหารกับความชื้นในอากาศ และส่งผลต่อค่า $a_w$ ที่บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งนี้อาหารที่กรอบบางชนิด เช่น มันฝรั่งทอดกรอบ แครกเกอร์ เริ่มสูญเสียความกรอบในช่วงค่า $a_w$ 0.35-0.50 และผลิตภัณฑ์เกิดการสูญเสียความกรอบอย่างสมบูรณ์เมื่อค่า $a_w$ สูงถึง 0.80 ทั้งนี้เกิดจากการที่ความชื้นในบรรยากาศรอบอาหารที่เพิ่มขึ้นในชิ้นอาหาร โมเลกุลน้ำไปเกาะกับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างอาหารนั้น ๆ ด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นผลของลักษณะพลาสติก (plasticization) ทำให้พอมิเมอร์เช่น สตาร์ชและโปรตีนเสียสภาพความเปราะเปลี่ยนเป็นลักษณะหยุ่นและหนืด (Katz and Labuza, 1981; Sauvageot and Blond, 1991) ดังนั้นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ที่เก็บรักษาอาหารแผ่นแห้งจึงได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพด้านความกรอบอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สืบค้นและศึกษาลักษณะทางโครงสร้างระดับจุลภาคของอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยที่มีคุณลักษณะความกรอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน และ (2) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะความกรอบของอาหารแผ่นแห้งดังกล่าว

## วิธีดำเนินการวิจัย

*1. การสืบค้นอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยที่มีคุณลักษณะความกรอบ*

การสืบค้นฐานข้อมูลรายชื่อมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนจากเว็ปไซต์ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Thailand Industrial Standard Institute, 2022) คัดเลือกเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารชุมชนที่กำหนดคุณลักษณะเนื้อสัมผัสความกรอบและมีลักษณะเป็นแผ่น มารายงานวิธีการแปรรูปเฉพาะผลิตภัณฑ์และค่า $a_w$ หรือค่าความชื้นตามที่มาตรฐานกำหนด

*2. การคัดเลือกตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งแปรรูปโดยชุมชนไทยที่มีคุณลักษณะความกรอบ*

อาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยพร้อมบริโภค ได้แก่ ข้าวแตน ($a_w$ 0.42, ความชื้นร้อยละ 1.33, ความหนาเฉลี่ย 7.32 มิลลิเมตร) ข้าวเกรียบกุ้ง ($a_w$ 0.21, ความชื้นร้อยละ 2.88, ความหนาเฉลี่ย 2.07 มิลลิเมตร) ข้าวเกรียบว่าว ($a_w$ 0.45, ความชื้นร้อยละ 3.30, ความหนาเฉลี่ย 2.32 มิลลิเมตร) ข้าวแคบ ($a_w$ 0.32, ความชื้นร้อยละ 4.40, ความหนาเฉลี่ย 1.32 มิลลิเมตร) แผ่นน้ำหนัง ($a_w$ 0.44, ความชื้นร้อยละ 8.03, ความหนาเฉลี่ย 1.08 มิลลิเมตร) และแผ่นถั่วเน่า ($a_w$ 0.33, ความชื้นร้อยละ 4.10, ความหนาเฉลี่ย 1.15 มิลลิเมตร) ตัวอย่างที่นำมาทดสอบผลิตโดยวิสาหกิจชุมชนบ้านสันกอเก็ต อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่และผู้ประกอบการอาหารพื้นบ้านห้วยไซ อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูนที่ได้มาตรฐานการผลิตถูกสุขลักษณะตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 420 พ.ศ. 2563 เรื่อง วิธีการผลิต เครื่องมือเครื่องใช้ในการผลิตและการเก็บรักษาอาหาร (GMP) การได้มาของตัวอย่างเป็นการสุ่มตัวอย่างจากกระบวนการผลิตในชุมชนในช่วงเดือน

เมษายน 2564 โดยสุ่มผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภคแต่ละชนิดที่ผลิตใหม่ได้แต่ละรอบการผลิต รอบละไม่ต่ำกว่า 20 กิโลกรัม สุ่มตัวอย่างให้ได้ประมาณ 2-3 กิโลกรัม โดยพิจารณาตัวอย่างแต่ละชนิดต้องมีลักษณะสมบูรณ์ ชิ้นไม่แตก ไม่มีรูที่เห็นด้วยสายตาปรากฏ การพองตัวของตัวอย่างสม่ำเสมอ น้ำหนักตัวอย่างและความหนาตัวอย่างแต่ละชิ้นใกล้เคียงกัน นำผลิตภัณฑ์มาบรรจุในถุงพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน ถุงละ 100 กรัม จัดวางเรียงตัวอย่างให้เป็นระเบียบเพื่อไม่ให้ตัวอย่างแตกหักก่อนทดสอบ นำตัวอย่างมาเก็บไว้ที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นานไม่เกิน 2 วันจึงเริ่มทำการทดลอง

*3. การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย*

การนำตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยพร้อมบริโภคมาฉาบเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Philips XL30 SEM, England) สภาวะสุญญากาศสูงที่ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ ตำแหน่งจุดขนาด 4.5-5 มิลลิเมตร ณ พื้นผิวของตัวอย่าง ระยะส่อง 10 มิลลิเมตร กำลังขยาย 500 เท่า และ 1,000 เท่า ตามวิธีการของ Panyoyai, Shanks and Kasapis (2017)

*4. ศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะความกรอบของอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย*

*4.1 การเตรียมตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งเพื่อศึกษาคุณลักษณะความกรอบ*

อาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยที่พร้อมบริโภคแต่ละชนิดปริมาณ 1 กิโลกรัม (จำนวน 50-70 ชิ้น) ที่เก็บรักษาไว้ในตู้บ่มอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มาเริ่มเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (NUVE TK120, Turkey) ปรับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดัดแปลงสภาวะตามที่ Katz and Labuza (1981) พบว่ามันฝรั่งแผ่นแห้งมีการเปลี่ยนแปลงความกรอบในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 44-75 โดยไม่เปิดแสงสว่าง ปล่อยให้ตัวอย่างแลกเปลี่ยนความชื้นภายในระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ นาน 24 ชั่วโมง สุ่มตัวอย่างที่บ่มในตู้ไปวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (Metler Toledo, USA) และค่า $a_w$ด้วยเครื่องวัดค่า $a_w$ (AquaLab, USA) บันทึกค่าทั้งสองไว้ครั้งที่ 1 บ่มตัวอย่างอีก 24 ชั่วโมง สุ่มทำการวิเคราะห์ความชื้นครั้งที่ 2 ความแตกต่างระหว่างความชื้น ทั้ง 2 ครั้งกำหนดต่ำกว่าร้อยละ 5 จึงถือว่าตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนแปลง หากค่าความชื้นมากกว่าที่กำหนดให้บ่มตัวอย่างต่อไปอีกนาน 24 ชั่วโมงจนกว่าจะได้ค่าทดสอบตามที่ต้องการ บันทึก ค่า$a_w$ สุดท้ายก่อนนำตัวอย่างไปวัดเนื้อสัมผัส ให้ทำการทดลองแบบเดียวกับตัวอย่างเดิมที่บ่มไว้โดยปรับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มเป็นร้อยละ 50 และร้อยละ 60 ให้ทำขั้นตอนแบบเดียวกันนี้กับอาหารแผ่นแห้งทุกชนิดที่ศึกษา โดยจะไม่ทำการบ่มอาหารในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ปนกันเพื่อป้องกันการถ่ายเทความชื้นระหว่างอาหารแต่ละชนิด และในการวัดตัวอย่างจะนำตัวอย่างออกมาวัดค่าต่าง ๆ ทันที ส่วนตัวอย่างที่เหลือจะบ่มไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิจากบรรยากาศภายนอกที่มีผลต่อความกรอบตัวอย่าง

*4.2 การวัดเนื้อสัมผัสตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งเพื่อศึกษาคุณลักษณะความกรอบ*

การวัดตัวอย่างด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro System, UK) โดยกำหนดให้วัดสองรูปแบบได้แก่ แบบที่ 1 การเจาะลงบนตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งที่วางบนแท่นวางที่มีรูตรงกลาง เจาะให้ตัวอย่างทะลุ ด้วยหัววัดขนาด เส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (Figure 1a) และ แบบที่ 2 การกดลงบนตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งที่วางบนฐาน กดลงไปเท่ากับครึ่งหนึ่งความหนาของตัวอย่างด้วยหัววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร (Figure 1b) กำหนดอัตราเร็วก่อนถึงตัวอย่าง อัตราเร็วที่กระทำกับตัวอย่าง และอัตราเร็วหลังกระทำกับตัวอย่างไว้ที่ 0.5, 0.3 และ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ วิเคราะห์ตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งทั้งหมดที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ ตัวอย่างละ 15-20 ซ้ำ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (แกน X เป็นหน่วยวินาที) และ แรง (แกน Y เป็นหน่วยนิวตัน) หาค่าเฉลี่ยแรงสูงสุดในการเจาะ หรือ การกด (นิวตัน) (maximum penetration/compression force) ค่าจำนวนยอดแหลมในเส้นกราฟ (พีค) (peak number) และค่างานในการเจาะ หรือ การกดตัวอย่าง (นิวตัน.วินาที) (work of penetration/compression)

*5. การวิเคราะห์ทางสถิติ*

การวิเคราะห์ทางสถิติใช้โปรแกรมวิเคราะห์ดังนี้ (1) สถิติพรรณนาได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (2) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการทดสอบความแตกต่างด้วยวิธี แอล เอส ดี (Least Significant Difference, LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistix 8 (USA)

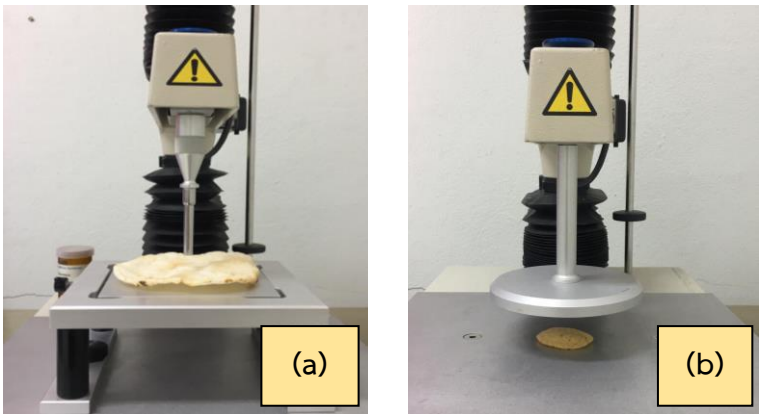


***Figure 1*** Texture analysis of crispy food products produced by Thai community comparison between (a) penetration test (P6) and (b) compression test (P100)

**ผลการวิจัย**

ผลการวิจัยความกรอบของผลิตภัณฑ์อาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย ตามวัตถุประสงค์ 2 ข้อ อธิบายได้ดังนี้ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารแผ่นแห้งแปรรูปโดยชุมชนไทยที่มีคุณลักษณะความกรอบ ผลการสืบค้นพบว่า ผลิตภัณฑ์อาหารชุมชนไทยที่กำหนดคุณลักษณะความกรอบไว้มีจำนวนทั้งสิ้น 42 รายการส่วนใหญ่เป็นอาหารว่าง อาหารขบเคี้ยว จำแนกเป็นกลุ่มได้ 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มข้าวและแป้ง กลุ่มเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์ และ กลุ่มผัก ผลไม้ ถั่ว ในที่นี้ได้คัดเลือกผลิตภัณฑ์อาหาร

แผ่นแห้งผลิตโดยชุมชนที่พร้อมบริโภคมาเป็นตัวแทนศึกษาต่อไปจำนวน 6 รายการ ได้แก่ ข้าวแตน (sticky rice cracker) ข้าวเกรียบกุ้ง (crispy shrimp snack) ข้าวเกรียบว่าว (crisp rice cake) ข้าวแคบ (rice sheet) แผ่นน้ำหนัง (buffalo gel sheet) และ แผ่นถั่วเน่า (fermented soybean sheet) ดังแสดงรายละเอียดใน Table 1 ในด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ซึ่งกำหนดโดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารชุมชนใช้ค่า $a_w$ และความชื้นในการกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการ ทั้งนี้ค่า $a_w$ กำหนดไว้ต่ำกว่า 0.6 ส่วนความชื้นกับผลิตภัณฑ์ เช่น ข้าวเกรียบกุ้งกำหนดความชื้นไว้ต่ำสุดที่ร้อยละ 4 ส่วนข้าวเกรียบว่าวกำหนดความชื้นไว้สูงสุดที่ร้อยละ 15

*Table 1* Definitions and water activity (or moisture content) of some dried sheet foods produced by Thai community

| Dry food products | Definition | Water activity / moisture content standard | Picture |
|---|---|---|---|
| TCPS 36/2019 Sticky rice cracker | The product is obtained by glutinous rice to be steamed. Mix with other ingredients such as fruit juice, coconut milk, sesame seeds, and then make into sheets, and dried using heat from sunlight. Fry the dry product and garnish the ready-to-eat product with seasoning. | $a_w$ < 0.6 | |
| TCPS 107/2011 Crispy shrimp snack | The product is obtained by mixing flour with seasoning. It may contain meat, vegetable or fruit ingredients such as fish, shrimp, pumpkin, taro, and sesame seeds. | mc < 4% | |
| TCPS 1143/2006 Crisp rice cake | The product is obtained by steaming glutinous rice. Ground the cooked rice finely, add sugarcane juice and mix it well. Make it into thin sheets, brush with oil, and mix with egg yolk. Dry it under the sun. The dry sheet is heated till it is fully puffy. | mc < 15% | |

*Table 1* (continued) Definitions and water activity (or moisture content) of some dried sheet foods produced by Thai community

| Dry food products | Definition | Water activity/ moisture content standard | Picture |
|---|---|---|---|
| TCPS 1328/2019 Rice sheet | The product is obtained from glutinous rice. Soak the rice in water, ground thoroughly to form flour paste, add other ingredients such as water, salt, sugar, sesame, chilli, coriander, fruit juice, pumpkin juice. Mix all ingredients, make a thin sheet on cloths. Steam until the sheet is cooked, then dry using heat from the sun. | $a_w < 0.6$ | |
| TCPS 1383/2007 Buffalo gel sheet | The product is obtained by taking dry buffalo hides without hair, soaking the hides in water to soften. Then rinse the hides with clean water. Boil the hides till being a thick gel and make thin sheets. Dry them under sunlight. Coat the gel sheet with vegetable oil, then grill the sheet and top with flavouring agents before consumption. | mc < 10% | |
| TCPS 509/2004 Fermented soybean sheet | The product is made from soybeans by soaking the beans in clean water. Boil the cleaned beans, add some salt and leave them for fermentation. The fermented soybeans produce sticky slime. Grind the beans and make a flat circular sheet. Dry the sheet using heat from the sun. | mc < 13% | |

*Note:* The TCPS stands for Thai Community Product Standard.
The $a_w$ stands for water activity value.
The mc stands for moisture content value.

Figure 2 แสดงภาพถ่ายระดับจุลภาคของพื้นผิวของตัวอย่างอาหารแผ่นแห้ง 6 ชนิด ณ กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า 2(a) ข้าวแตนพื้นผิวมีรอยย่น 2(b) ข้าวเกรียบกุ้งพื้นผิวมีรอยย่นและพบรูพรุน 2(c) ข้าวควบพื้นผิวมีความขรุขระลักษณะเป็นลูกคลื่น 2(d) ข้าวแคบพื้นผิวขรุขระเป็นคลื่น แผ่นข้าวแคบมีความบาง 2(e) แผ่นน้ำหนังมีรอยย่นบางส่วน และ 2(f) แผ่นถั่วเน่าผิวขรุขระมาก เนื้อถั่วเป็นก้อนอนุภาคเกาะติดกันซึ่งลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระเหล่านี้เกิดจากโครงสร้างของสารชีวโมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต คือ แป้งที่ใช้เป็นส่วนผสมในข้าวเกรียบกุ้ง ข้าวเกรียบว่าว ข้าวแตน ข้าวแคบ และแผ่นถั่วเน่า ส่วนโปรตีนเจลาตินเป็นโครงสร้างหลักในแผ่นน้ำหนัง

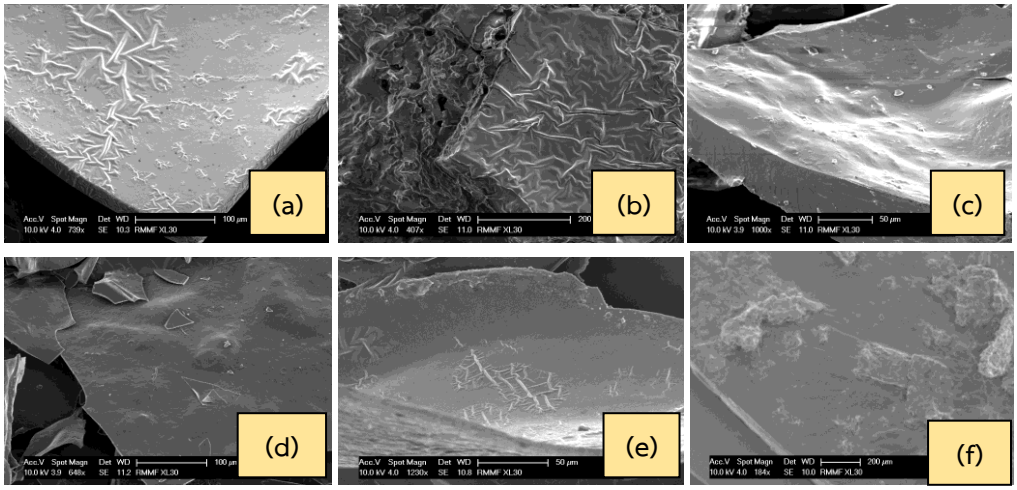


*Figure 2* Surface morphology of (a) sticky rice cracker (b) crispy shrimp snack (c) crisp rice cake (d) rice sheet (e) buffalo gel sheet and (f) fermented soy bean sheet, respectively

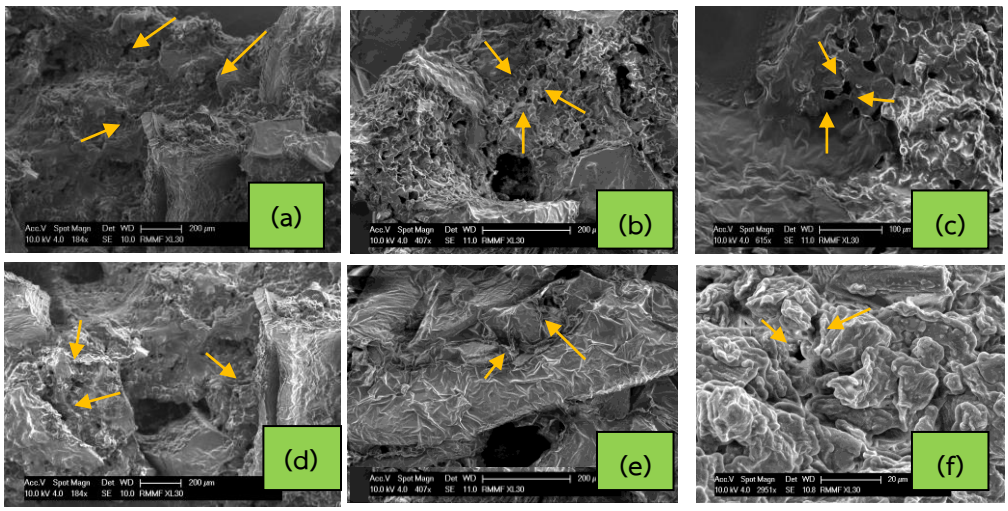


*Figure 3* Porous structure of (a) sticky rice cracker (b) crispy shrimp snack (c) crisp rice cake (d) rice sheet (e) buffalo gel sheet and (f) fermented soy bean sheet, respectively

ทั้งนี้เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 1,000 เท่า ทุกตัวอย่าง ในภาพ 3(a-f) เห็นโครงสร้างเป็นรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอชัดเจน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้เกิดขึ้นจากการเพิ่มความร้อนให้ตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งจนพองตัวและสุก อาหารแผ่นแห้งที่มีคุณลักษณะกรอบจึงมีโครงสร้างเป็นช่องเซลล์ที่เกิดจากการขยายตัวของน้ำหรือน้ำมันที่ระเหยในขณะให้ความร้อนสูง (Dhital *et al*., 2018) เช่น การทอดข้าวแตน และ ข้าวเกรียบ การปิ้งข้าวแคบ ข้าวควบ แผ่นน้ำผนัง และแผ่นถั่วเน่าบนเตา

การเปลี่ยนแปลงความชื้นในบรรยากาศหรือความชื้นสัมพัทธ์เกี่ยวข้องกับกลไกการดูดซับความชื้นของชิ้นอาหาร โดยเฉพาะชิ้นอาหารที่มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์ การดูดซับไอน้ำทำให้ความชื้นของอาหารแผ่นแห้งเพิ่มมากขึ้นและยังส่งผลต่อค่า $a_w$ ที่แสดงถึงปริมาณน้ำอิสระในอาหารที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ความกรอบของอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย ดัง Table 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ขณะเก็บรักษาอาหารแผ่นแห้งที่พร้อมบริโภค 6 ชนิด พบว่า ทุกตัวอย่างมีค่า $a_w$ เพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ดูดซับเข้ามาจากบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่มากกว่า คุณลักษณะความกรอบที่วัดด้วยแรงเจาะซึ่งเปรียบได้กับการกัดชิ้นอาหารด้วยฟันหน้าจึงมีค่าลดลง เช่นเดียวกับแรงกดที่เปรียบได้กับการบดด้วยฟันกรามมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีผลต่อการลดค่างานในการเจาะ หรือ การกดตัวอย่างอาหารกรอบ เช่น แผ่นถั่วเน่ามีค่างานในการเจาะแผ่นถั่วเน่ามีค่า 2.62 นิวตัน.วินาที ณ ที่สภาวะ $a_w$ 0.52 และความชื้นร้อยละ 4.62 และเมื่อตัวอย่างดูดซับความชื้นจากบรรยากาศจนมี $a_w$ 0.61 ความชื้นร้อยละ 5.09 ค่างานในการเจาะตัวอย่างกลับลดลงเหลือ 2.26 นิวตัน.วินาที (ข้อมูลไม่ได้แสดงทุกตัวอย่าง) โดยเฉพาะการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นในช่วงร้อยละ 40-60 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงกด/แรงเจาะลดลงอย่างมาก เช่น แผ่นน้ำหนังที่เป็นเจลาตินพื้นผิวขรุขระและมีรูพรุนขนาดใหญ่ขรุขระจากหนังกระบือ ใน Figure 3(e) มีแรงกด/แรงเจาะ ลดลง 0.19 นิวตัน และ 2.08 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 50 และแรงเจาะ/แรงกดกลับมีค่าลดลงไปจนเหลือค่า 3.50 นิวตัน และ 6.38 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 60

ความกรอบที่แสดงให้เห็นโดยค่าจำนวนพีคหรือยอดแหลมจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (นิวตัน) กับเวลา (วินาที) (Figure 4a) โดยค่าระดับแรงต่ำสุดที่จะนับเป็นพีคการแตกของตัวอย่างกำหนดไว้ที่ 0.5 นิวตัน จาก Table 3 จำนวนพีกมีแนวโน้มลดลงตามลำดับเมื่อตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งเช่น แผ่นน้ำหนัง ข้าวเกรียบว่าว มีการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 50 จำนวนพีคลดลงร้อยละ 6.25 และ ร้อยละ 14.28 ตามลำดับ เทียบกับสภาวะในการเก็บรักษาจากร้อยละ 40 เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มเป็นร้อยละ 60 จำนวนพีคมีค่าลดลงมากถึงร้อยละ 13.33 และ ร้อยละ 33.33 ตามลำดับ เทียบกับสภาวะในการเก็บรักษาจากร้อยละ 40 ทั้งนี้จำนวนพีคที่ลดลงอย่างต่อเนื่องนี้จึงส่งผลต่อการแตกของรูพรุนในอาหารแผ่นกรอบใน Figure 4(a) โดยการทดสอบด้วยการเจาะหรือการกดตัวอย่างให้ผลการทดลอบความกรอบลดลงมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับจำนวนพีกที่ลดลง ดัง Table 2

นอกจากนี้ แรงกดผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนประกอบหลักเป็นแป้ง เช่น ข้าวแคบ ที่ผ่านการเก็บรักษาที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีพีคหรือยอดแหลมที่สูงกว่าข้าวเกรียบกุ้งที่เก็บไว้ที่สภาวะเดียวกัน

(Figure 4b) นั่นแสดงว่าข้าวแคบมีเนื้อสัมผัสที่แข็งมากกว่าข้าวเกรียบกุ้ง แต่ว่าจำนวนพีกของตัวอย่างข้าวเกรียบกุ้งมีจำนวนมากกว่านั่นคือข้าวเกรียบกุ้งมีความกรอบมากกว่าข้าวแคบ แผ่นน้ำหนัง และแผ่นถั่วเน่าตามลำดับ

***Table 2*** Maximum forces of some selected dry food produced by Thai community with adjusted relative humidity values

| Sample | Penetration force (N) | | | Compression force (N) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | RH 40% | RH 50% | RH 60% | RH 40% | RH 50% | RH 60% |
| 1.Sticky rice cracker | 13.58±0.32 a<br>mc 3.54<br>$a_w$ 0.42 | 12.88±0.18 a<br>mc 4.40<br>$a_w$ 0.52 | 11.05±0.67 b<br>mc 7.75<br>$a_w$ 0.64 | 27.10±0.62 a<br>mc 3.54<br>$a_w$ 0.42 | 15.42±0.18 b<br>mc 4.40<br>$a_w$ 0.52 | 12.46±0.23 c<br>mc 7.75<br>$a_w$ 0.64 |
| 2.Crispy shrimp snack | 8.86±0.32 a<br>mc 4.10<br>$a_w$ 0.40 | 7.86±0.56 a<br>mc 5.22<br>$a_w$ 0.51 | 5.63±0.62 b<br>mc 6.21<br>$a_w$ 0.62 | 13.45±0.68 a<br>mc 4.10<br>$a_w$ 0.40 | 9.83±0.17 b<br>mc 5.22<br>$a_w$ 0.51 | 7.05±0.36 c<br>mc 6.21<br>$a_w$ 0.62 |
| 3.Crisp rice cake | 15.76±0.42 a<br>mc 3.10<br>$a_w$ 0.42 | 13.38±0.33 b<br>mc 3.73<br>$a_w$ 0.55 | 8.18±0.15 c<br>mc 8.01<br>$a_w$ 0.65 | 19.38±0.31 a<br>mc 3.10<br>$a_w$ 0.42 | 17.31±0.25 a<br>mc 3.73<br>$a_w$ 0.55 | 6.22±0.32 b<br>mc 8.01<br>$a_w$ 0.65 |
| 4.Rice sheet | 12.47±0.32 a<br>mc 5.43<br>$a_w$ 0.44 | 10.01±0.42 b<br>mc 6.18<br>$a_w$ 0.52 | 8.35±0.13 c<br>mc 8.51<br>$a_w$ 0.61 | 25.10±0.36 a<br>mc 5.43<br>$a_w$ 0.44 | 23.39±0.13 b<br>mc 6.18<br>$a_w$ 0.52 | 7.49±0.24 c<br>mc 8.51<br>$a_w$ 0.61 |
| 5.Buffalo gel sheet | 10.31±0.66 a<br>mc 8.03<br>$a_w$ 0.42 | 10.29±0.75 ab<br>mc 8.04<br>$a_w$ 0.50 | 9.93±0.10 b<br>mc 9.16<br>$a_w$ 0.63 | 8.15±0.32 a<br>mc 8.03<br>$a_w$ 0.42 | 6.35±0.86 ab<br>mc 8.04<br>$a_w$ 0.50 | 4.04±0.72 b<br>mc 9.16<br>$a_w$ 0.63 |
| 6.Fermented soy bean sheet | 9.36±0.33 a<br>mc 4.23<br>$a_w$ 0.43 | 8.12±0.41 b<br>mc 5.71<br>$a_w$ 0.48 | 7.63±0.20 b<br>mc 8.71<br>$a_w$ 0.62 | 17.17±0.59 a<br>mc 4.23<br>$a_w$ 0.43 | 14.62±0.35 b<br>mc 5.71<br>$a_w$ 0.48 | 9.78±0.44 c<br>mc 8.71<br>$a_w$ 0.62 |

*Note :*

Mean ± standard deviation, n=15

The difference letters (a,b,c) in the same row of each mechanical test indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

The RH stands for adjusted relative humidity value.

The $a_w$ stands for average water activity value of samples (n=15).

The mc stands for average moisture content value of samples (n=15).

*Table 3* The total numbers of peaks of some selected dry food produced by Thai community with adjusted relative humidity values

| Sample | Penetration (The total number of peaks) | | | Compression (The total number of peaks) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | RH 40% | RH 50% | RH 60% | RH 40% | RH 50% | RH 60% |
| 1.Sticky rice cracker | 24±1.0 a | 18±0.8 b | 11±0.8 c | 29±1.0 a | 7±0.8 b | 7±1.0 b |
| | mc 3.54 | mc 4.40 | mc 7.75 | mc 3.54 | mc 4.40 | mc 7.75 |
| | $a_w$ 0.42 | $a_w$ 0.52 | $a_w$ 0.64 | $a_w$ 0.42 | $a_w$ 0.52 | $a_w$ 0.64 |
| 2.Crispy shrimp | 11±0.8 a | 10±1.0 a | 8±0.8 b | 31±1.0 a | 15±1.0 b | 9±0.5 c |
| snack | mc 4.10 | mc 5.22 | mc 6.21 | mc 4.10 | mc 5.22 | mc 6.21 |
| | $a_w$ 0.38 | $a_w$ 0.51 | $a_w$ 0.62 | $a_w$ 0.38 | $a_w$ 0.51 | $a_w$ 0.62 |
| 3.Crisp rice cake | 28±0.8 a | 24±1.0 b | 16±0.6 c | 21±0.5 a | 22±0.5 a | 10±0.5 b |
| | mc 3.10 | mc 3.73 | mc 8.01 | mc 3.01 | mc 3.73 | mc 8.01 |
| | $a_w$ 0.42 | $a_w$ 0.55 | $a_w$ 0.65 | $a_w$ 0.42 | $a_w$ 0.55 | $a_w$ 0.65 |
| 4.Rice sheet | 19±0.8 a | 17±0.8 b | 10±0.6 c | 27±1.0 a | 9±0.5 b | 6±1.0 c |
| | mc 5.43 | mc 6.18 | mc 8.51 | mc 5.43 | mc 6.18 | mc 8.51 |
| | $a_w$ 0.44 | $a_w$ 0.52 | $a_w$ 0.61 | $a_w$ 0.44 | $a_w$ 0.52 | $a_w$ 0.61 |
| 5.Buffalo gel sheet | 16±1.0 a | 15±0.8 ab | 13±1.0 b | 16±0.6 a | 9±0.8 b | 7±0.5 c |
| | mc 8.03 | mc 8.04 | mc 9.16 | mc 8.03 | mc 8.04 | mc 9.16 |
| | $a_w$ 0.42 | $a_w$ 0.50 | $a_w$ 0.63 | $a_w$ 0.42 | $a_w$ 0.50 | $a_w$ 0.63 |
| 6.Fermented soybean | 16±1.0 a | 13±0.8 b | 7±1.0 c | 8±0.6 a | 7±0.5 b | 7±0.0 b |
| sheet | mc 4.23 | mc 5.71 | mc 8.71 | mc 4.23 | mc 5.71 | mc 8.71 |
| | $a_w$ 0.43 | $a_w$ 0.48 | $a_w$ 0.62 | $a_w$ 0.43 | $a_w$ 0.48 | $a_w$ 0.62 |

*Note :*

Mean ± standard deviation, n=15

The difference letters (a,b,c) in the same row of each mechanical test indicate significant differences ($p \leq 0.05$).

The RH stands for adjusted relative humidity value.

The $a_w$ stands for average water activity value of samples (n=15).

The mc stands for average moisture content value of samples (n=15).

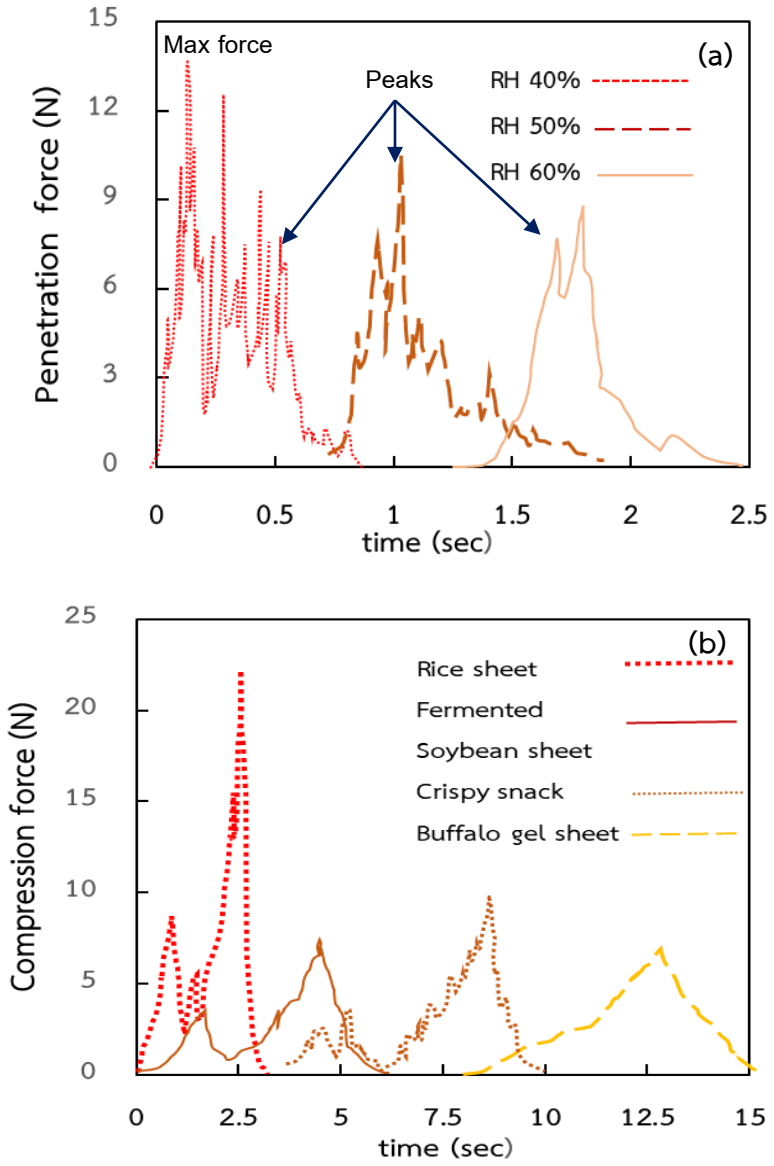


*Figure 4* texture profiles of compression tests on (a) crispy snack stored at different RH conditions, 30$^{O}$C and (b) some dry food products stored at 50% relative humidity, 30$^{O}$C

**วิจารณ์ผลการวิจัย**

ความกรอบเป็นคุณลักษณะที่ต้องการของอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย การศึกษานี้เลือกผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นพร้อมบริโภคมาศึกษา จำนวน 6 รายการ ได้แก่ ข้าวแตน ข้าวเกรียบกุ้ง ข้าวเกรียบว่าว ข้าวแคบ แผ่นน้ำหนัง และ แผ่นถั่วเน่า โดยข้าวแตน ข้าวเกรียบว่าว ข้าวแคบ ข้าวเกรียบกุ้งมีวัตถุดิบหลักเป็นแป้ง แผ่นน้ำหนังมีวัตถุดิบหลักเป็นเจลาตินจากหนังกระบือ ส่วนแผ่นถั่วเน่ามีวัตถุดิบเป็นถั่วเหลืองสุก คุณภาพด้านค่า $a_w$ ของผลิตภัณฑ์และความชื้นที่กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของตัวอย่างสอดคล้องกับ Table 1 ข้าวแตนและข้าวเกรียบกุ้งมีค่า $a_w$ ต่ำกว่า 0.6 ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า $a_w$ ต่ำที่สุด และสูงที่สุด คือ ข้าวเกรียบกุ้งมีค่า 0.22 และ ข้าวแตนมีค่า 0.53 ตามลำดับ ส่วนข้าวเกรียบกุ้ง แผ่นน้ำหนัง แผ่นถั่วเน่า และข้าวเกรียบว่าว มีค่าความชื้น 2.88, 8.03, 4.10, และ 3.30 ซึ่งน้อยกว่าความชื้นกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนดร้อยละ 4, 10, 13 และ 15 ตามลำดับ

ความกรอบของอาหารแผ่นแห้งที่ผลิตโดยชุมชนไทยมีโครงสร้างระดับจุลภาคที่เกิดจากสารชีวโมเลกุลใหญ่ เช่น สตาร์ช โปรตีน ซึ่งจัดเป็นของแข็งอสัณฐาน (amorphous solid) ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนเมื่อขึ้นรูปให้มีลักษณะแบนเป็นแผ่นแล้วทำให้แห้ง โดยอาหารแผ่นแห้งดังกล่าวมีพื้นผิวไม่เรียบ เกิดการพับย่น เพราะการจัดเรียงโครงสร้างของสารโมเลกุลใหญ่ไม่เป็นระเบียบและไม่มีความเป็นผลึก (crystallinity) ทำให้ผิวของวัสดุขรุขระและบางตำแหน่งมีรูพรุนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ในระหว่างการแปรรูปองค์ประกอบทางเคมี เช่น โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่มีการจัดเรียงโครงสร้างพอลิเมอร์สายยาวที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เนื้อสัมผัสมีความหยุ่นหนืดจึงมีสถานะโครงสร้างคล้ายยาง (rubbery state) ยกตัวอย่าง การเกิดเจลแป้งและการเกิดเจลโปรตีนในระหว่างผ่านความร้อน โครงสร้างเกิดการขยายตัว และเมื่อเจลถูกทำให้แห้ง สูญเสียความชื้นโครงสร้างอสัณฐานจึงเปลี่ยนสถานะให้คล้ายแก้ว (glassy state) ทำให้เกิดลักษณะโครงสร้างที่มีลักษณะพื้นผิวที่มีขอบคม มีมุมแหลม และมีความพรุนเพื่อให้ผลิตภัณฑ์พองและกรอบ (Roos *et al.,* 1998) โครงสร้างในระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์มีรูพรุน มีลักษณะเปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกแรงกระทำเช่นแรงเจาะหรือแรงกด (Michael *et al*., 2013; Raudaut *et al*., 2022) ซึ่งโครงสร้างรูพรุนนี้เป็นพื้นที่เก็บกักความชื้นจากบรรยากาศภายนอกซึ่งปรับสภาวะโดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ (หรือค่า $a_w$) ให้โมเลกุลน้ำเข้าไปเกาะจึงทำให้ส่งผลต่อความกรอบที่มีค่าลดลง ทั้งนี้มีรายงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าความชื้นที่ถูกกักเก็บในรูพรุนภายในเหล่านี้ทำให้โครงสร้างของรูพรุนมีความหนามากขึ้น ลดเหลี่ยมมุมของรูพรุนและทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์เกิดการอ่อนตัวลงเมื่อเก็บตัวอย่างขนมปังกรอบไว้ที่ค่า $a_w$ 0.56 (Jakubczyk *et al*., 2008) สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสจากการทดสอบทางกลศาสตร์ที่มีค่าพารามิเตอร์ความกรอบ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดให้ค่า $a_w$ ของผลิตภัณฑ์มีค่าไม่เกิน 0.6 ซึ่งเป็นมาตรฐานกำหนดต่ำสุดในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่ว่าความกรอบของอาหารแผ่นแห้งที่พร้อมบริโภค ได้แก่ ข้าวแตน ข้าวเกรียบกุ้ง ข้าวเกรียบว่าว ข้าวแคบ แผ่นน้ำหนัง และแผ่นถั่วเน่าหากความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาส่งผลกระทบต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์ในช่วงค่า $a_w$ ต่ำกว่ า 0.6 คือในช่วง 0.4-0.5 เท่านั้น การศึกษาก่อนหน้านี้ของ Katz and Labuza (1981) ที่รายงานว่าแครกเกอร์ ป๊อปคอร์น มีค่าแรงในการกดตัวอย่างร้อยละ 75 ที่เพิ่มขึ้น เมื่อค่า $a_w$ 0.1 เพิ่มเป็น 0.4 และ

Jakubczyk *et al.* (2008) รายงานค่างานทำให้ตัวอย่างขนมปังกรอบที่ค่า $a_w$ ต่ำในช่วง 0-0.4 แตกออกเป็นชิ้นเล็กว่าต้องให้งานและเวลาน้อยกว่าค่า $a_w$ ของตัวอย่างที่มีค่า $a_w$ มากกว่านี้ (0.5-0.7) นอกจากนี้ต้องให้งานและเวลาทำลายตัวอย่างมากขึ้น จำนวนพีกที่เกิดขึ้นในขณะที่เจาะเผือกแห้งที่มีความชื้นแตกต่างกันแสดงถึงผลของความชื้นในโครงสร้างรูพรุนที่ลดลงกลับทำให้จำนวนพีกมีแนวโน้มลดลง (Neanchad *et al.*, 2010) ซึ่ง Katz and Labuza (1981) ได้เชื่อมโยงการวัดเนื้อสัมผัสด้วยแรงกลที่สัมพันธ์กับการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่ลดงลงจากระดับความกรอบมาก ($a_w$ 0.1) เป็นกรอบปานกลาง ($a_w$ 0.2) เป็นกรอบเล็กน้อย ($a_w$ 0.5) และไม่กรอบ ($a_w$ >0.6) ทั้งนี้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความกรอบพบว่า อาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยที่มีส่วนผสมของแป้ง ได้แก่ ข้าวเกรียบกุ้ง ข้าวแคบ ข้าวแตน ข้าวเกรียบว่าวมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ ส่งผลต่อค่า $a_w$ จึงทำให้สูญเสียความกรอบเร็วกว่า แผ่นน้ำหนังและ แผ่นถั่วเน่า ตามลำดับ ซึ่งการสูญเสียความกรอบนี้ยังเกิดขึ้นเร็วกว่าค่า $a_w$ ที่กำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอีกด้วย

การทดสอบทางกลอาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทยสามารถใช้การทดสอบทั้งการเจาะหรือการกด หากผลิตภัณฑ์มีผิวสัมผัสไม่เรียบให้ใช้การเจาะลงบนพื้นที่ตัวอย่างแทนการกด นอกจากนี้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับความเร็วในการกดให้ช้าที่ 0.3 มิลลิเมตรต่อวินาที (Katz and Labuza, 1981) จนถึงเร็วขึ้น 1 มิลลิเมตรต่อวินาที (Salvador *et al*, 2009) และใช้วิธีการวัดตัวอย่างอย่างน้อย 9 ซ้ำ เพื่อลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้น้อยกว่า 1 (Jakubczyk *et al*. 2008) ซึ่งกรณีของตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบแต่ละตัวอย่างจำนวน 15 ซ้ำขึ้นไปและใช้ค่าส่วนเบี่ยนเบนมาตรฐานมากำหนดให้ความคลาดเคลื่อนการวัดซ้ำลดลง หรือ การลดจำนวนซ้ำลงด้วยการใช้หลักสถิติ IQR (the interquartile range) จากผลต่างของควอไทล์ที่ 3 และควอไทล์ที่ 1 เพื่อขจัดค่าสงสัยที่วัดได้แตกต่างอย่างมากจากซ้ำอื่น ๆ ที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้ข้อมูลการทดสอบที่มีความสม่ำเสมอ

## สรุปผลการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความกรอบของอาหารแผ่นแห้งที่ผลิตโดยชุมชนไทยแสดงได้ด้วยวิธีวัดทางกลศาสตร์ การทดสอบด้วยแรงเจาะหรือแรงกดทับตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งรายงานด้วยค่าพารามิเตอร์ได้แก่ แรงกดสูงสุด จำนวนพีกและงานในการเจาะหรือกดทับ การเพิ่มค่าความชื้นสัมพัทธ์ทำให้ตัวอย่างอาหารแผ่นแห้งมีการดูดซับความชื้นและค่า $a_w$ เพิ่มขึ้นจนทำให้องค์ประกอบทางเคมีในอาหารเกิดปรากฏการณ์ความเป็นพลาสติก ซึ่งอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์นี้ทำให้ความกรอบผลิตภัณฑ์อาหารแผ่นแห้งโดยส่วนใหญ่ลดลง ดังนั้น ความเข้าใจพฤติกรรมการดูดซับความชื้นจะนำไปใช้ควบคุมสภาวะเฉพาะในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแผ่นแห้ง ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ให้คงที่ด้วยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ สภาวะการขนส่ง และกำหนดอายุเก็บรักษาเพื่อช่วยคงคุณภาพลักษณะความกรอบผลิตภัณฑ์อาหารแผ่นแห้งที่แปรรูปโดยชุมชนไทย รวมทั้งประยุกต์วิธีการวัดและวิธีการทดสอบความกรอบนี้ไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารแผ่นแห้งในระดับอุตสาหกรรมอาหารได้

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนการศึกษาจากโครงการพัฒนาแหล่งเรียนรู้วัฒนธรรมเกษตรตามปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

**References**

Barrett, A. H., Cardello, A. V., Lesher, L. L. and Taub, I. A. (1994). Cellularity, mechanical failure, and textural perception of corn meal extrudates. *Journal of Texture Studies*, *25*, 77–95.

Dacremont, C. (1995). Spectral composition of eating sounds generated by crispy, crunchy and crackly foods. *Journal of Texture Studies*, *26*, 27–43.

Dhital, S., Baier, S. K., Gidley, M. J. and Stokes, J. R. (2018). Microstructural properties of potato chips. *Food Structure, 16,* 17-26.

Jakubczyk, E., Marzec, A. and Lewiki, P. P. (2008). Relationship between water activity of crisp bread and its mechanical properties and structure. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, *58*(1), 45-51.

Katz, E. E. and Labuza, T. P. (1981). Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products. *Journal of Food Science, 46,* 403-409.

Michael, H. T., Charles I. O., Audrey E. T., John G. P., Sudarsan M., Shiowshuh S., Cheng-Kung L., Nicholas L., Mariana R. P. and Peter H. C., (2013) Critical evaluation of crispy and crunchy textures: *A Review. International Journal of Food Properties, 16*(5), 949-963.

Panyoyai, N., Shanks, R. A. and Kasapis, S. (2017). Tocopheryl acetate release from microcapsules of waxy maize starch. *Carbohydrate Polymers*, *167*(27), 27-35.

Raudaut, G., Dacremont, C., Pamies, P. V., Colas, B. and Le Meste, M. (2002). Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Science and Technology*, *13,* 217-227.

Roos, Y. H., Roininen, K., Jouppila, K. and Tourila, H. (1998). Glass transition and water plasticization on crispness of a snack food extrudate. *International Journal of Food Properties, 1*(2), 163-180.

Salvador, A., Varela, P., Sanz, T. and Fiszman, S. M. (2009). Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis. *LWT-Food Science and Technology, 42*, 763-767.

Sauvageot F. and Blond G. (1991). Effect of water activity on crispness of breakfast cereals. *Journal Texture Studies, 22*, 423-442.

Seymour, S. K. and Ann, D. D. H. (1988). Crispness and crunchiness of selected low moisture foods. *Journal of Texture Studies*, *19*, 79–95.

Sirileart, T. (2008). Evaluation of texture characteristics in food. *Journal of Food Technology Siam University*, *3*(1), 6-13. (in Thai).

Neanchad, S., Soponronnarit, S. and Jamratloedluk. J. (2010). Microstructure and textural characteristics of taro chips undergoing different drying conditions. *Agricultural Science Journal, 41*(3/1) (Supplement), 325-328. (in Thai).

Thailand Industrial Standard Institute. (2022). *Thai Community Product Standard.* Bangkok, Ministry of Industrial. (in Thai).

Thailand Industrial Standard Institute. (2004). *Thai Community Product Standard, Fermented soybean sheet (TISI 509/2004).* Bangkok, Ministry of Industrial. (in Thai).

Thailand Industrial Standard Institute. (2006). *Thai Community Product Standard, Khao Khaep Waw (TISI 1143/2006).* Bangkok, Ministry of Industrial. (in Thai).

Thailand Industrial Standard Institute. (2007). *Thai Community Product Standard, Nam Nang (TISI 1383/2007).* Bangkok, Ministry of Industrial. (in Thai).

Thailand Industrial Standard Institute. (2011). *Thai Community Product Standard, Khao Griab (TISI 107/2011).* Bangkok, Ministry of Industrial. (in Thai).

Thailand Industrial Standard Institute. (2019a). *Thai Community Product Standard, Khao Taen (TISI 36/2019).* Bangkok, Ministry of Industrial. (in Thai).

Thailand Industrial Standard Institute. (2019b). *Thai Community Product Standard, Khao Khaep (TISI 1328/2019).* Bangkok, Ministry of Industrial. (in Thai).

Van Heck, E., Allaf, K. and Bouvier, J. M. (2007). Texture and structure of crispy-puffed food products part II: Mechanical properties in puncture. *Journal of Texture Studies, 29*(6), 617-632.

Vickers, Z. M. and Bourne, M. (2006). Crispness in foods: A review. *Journal of Food Science, 45*(5), 1153-1157.