



การผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักและเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งเสริมโพรไบโอติกโดยการ
แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวมะลินิลสุรินทร์



ภรินติย์ สบลม

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักและเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งเสริมโปรไบโอติกโดยการ
แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวมะลินิลสุรินทร์



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักและเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งเสริมโพรไบโอติก
โดยการแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวมะลินิลสุรินทร์"

ของ ภรินิตย์ ลบลม

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐพร วังไฉ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ศศิวิมล จิตรากร)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพร กงบังเกิด)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา รุตรัตนมงคล)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักและเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งเสริมโพรไบโอติกโดยการแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวมะลินิลสุรินทร์
ผู้วิจัย	ภรินดิษฐ์ ลบลม
ประธานที่ปรึกษา	ดร.ศศิวิมล จิตรากร
กรรมการที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพร กงบังเกิด
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	ข้าวมะลินิลสุรินทร์, แป้งหมัก, ขนมจีนแป้งหมัก, พฤติกรรมการไหลแบบรีโอโลยี, จุลินทรีย์โพรไบโอติก, บาซิลลัส โคแอกกูแลน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการหมักเพื่อนำไปใช้ในการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักจากข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักจากข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ในระดับการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง จากนั้นทำการศึกษาการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งโดยกระบวนการอบแห้ง 3 แบบ ได้แก่ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศโดยใช้ความดัน 0.2 บาร์ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศโดยกำหนดรังสีอินฟราเรดที่ 1,700 วัตต์ และความดัน 0.8 บาร์ โดยในแต่ละวิธีการอบแห้งมีการแปรระดับอุณหภูมิในการอบที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และมีการเติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแป้ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนอบแห้งหลังการคั่ว จากนั้นทำการคัดเลือกวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งเสริมโพรไบโอติก จากการทดลองพบว่าหลังผ่านกระบวนการหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์มีปริมาณโปรตีนลดลง ในขณะที่ปริมาณอะมิโลสและปริมาณสตาร์ชทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กำลังการพองตัวและการละลายลดลง แต่มีดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว พบว่าค่าความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทและมะลินิลสุรินทร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการหมัก ส่วนค่าการคั่วหลังผ่านการหมักของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาทมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์มีค่าลดลง

จากการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักจากข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักจากข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ในระดับการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ

30 โดยน้ำหนักแป้ง พบว่าสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของเส้นขนมจีนแป้งหมักมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระดับการทดแทนเพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) และเมื่อระดับการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นขนมจีนแป้งหมักมีค่าความแข็งและค่าการยืดเกาะลดลง ($p < 0.05$) ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของน้ำแป้งก่อนโรยเส้น พบว่าเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นค่าความหนืดของน้ำแป้งก่อนโรยเส้นมีแนวโน้มลดลงในทุกระดับการแทนที่ แสดงการไหลประเภท Non-newtonian และแสดงลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic น้ำแป้งก่อนโรยเส้นมีค่า G' สูงกว่า G'' แสดงให้เห็นว่าน้ำแป้งที่ได้จากการแทนที่ดังกล่าวมีลักษณะความเป็นของแข็งมากกว่าความเป็นของเหลว และเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า G' และ G'' ลดลง จากการประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสของเส้นขนมจีนแบบ 9-points Hedonic scale พบว่าผู้ทดสอบชิมตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแป้งหมักจากคุณภาพของเส้นขนมจีนและลักษณะเนื้อสัมผัส โดยเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ไม่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด รองลงมาได้แก่เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ไม่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ที่ระดับร้อยละ 10 และ 20

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น และ a_w ในเส้นขนมจีนอบแห้งที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ที่ระดับร้อยละ 20 และมีการเติมแซนร้อยล 0.5 โดยผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณความชื้นและค่า a_w อยู่ในช่วงร้อยละ 9.02-9.80 และ 0.35-0.43 ตามลำดับ เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ มีอัตราการคืนตัวสูงสุด โดยอัตราการคืนตัวสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบสูงขึ้น ($p < 0.05$) ซึ่งมีระยะเวลาที่ใช้ในการต้มและปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มต่ำที่สุด โดยมีค่าการดูดซับน้ำของเส้นขนมจีนอบแห้งหลังคืนตัวสูงสุดเมื่อเทียบกับการอบด้วยวิธีการอื่น เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิมีค่าความแข็งและค่าการยืดเกาะเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างเส้นที่ไม่เติมแซนแทนกัม ส่วนเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งสูงสุด ($p < 0.05$) เมื่อเทียบการอบแห้งด้วยวิธีการอื่น ค่าความต้านทานแรงดึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกตัวอย่างเส้นขนมจีนที่อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุด ($p < 0.05$) ส่วนเส้นขนมจีนที่อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส พบปริมาณฟลาโวนอยด์สูงที่สุด ($p < 0.05$) และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุด ($p < 0.05$) เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระวัดด้วยวิธี DPPH*, ABTS*⁺ และ FRAP สูงที่สุด ($p < 0.05$) การ

อบแห้งด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระวัดด้วยวิธี DPPH* และ ABTS*+ สูงที่สุด และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP สูงสุด ($p < 0.05$) สำหรับเส้นขนมจีนจากการอบด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH*, ABTS*+ และ FRAP สูงที่สุด ($p < 0.05$)

จากการเติมโพรไบโอติก *B. coagulans* ในเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ โดยเก็บรักษาเส้นขนมจีนแห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 0, 3, 6 และ 9 วัน พบว่าในวันที่ 0 ปริมาณของสปอร์ *B. coagulans* ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีสปอร์เริ่มต้นเท่ากับ 11.47, 11.41 และ 11.19 log CFU/g ตามลำดับ หลังจากผ่านไป 9 วัน พบอัตราการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ร้อยละ 88.40, 92.29 และ 89.54 ตามลำดับ ซึ่งในการทำแห้งแบบสุญญากาศ (10.14 log CFU/g) มีปริมาณสปอร์ของ *B. coagulans* เหลือรอดสูงที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษากับการชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาแนวโน้มอายุการเก็บรักษาเส้นขนมจีนอบแห้งจนกว่าปริมาณของโพรไบโอติกจะลดลงเหลือ 6 log CFU/g พบว่าเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีอายุการเก็บประมาณ 33, 45 และ 39 วัน ก่อนที่สปอร์ของ *B. coagulans* จะลดลงเหลือ 6 log CFU/g จากการตรวจสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งหลังจากทำการเก็บรักษา พบว่าในวันที่ 0 เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศ (10.11 log CFU/g) มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดสูงสุด ($p < 0.05$) และหลังจากผ่านไป 9 วัน เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน และอบแห้งแบบสุญญากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ในขณะที่ตัวอย่างเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีแนวโน้มลดลง ($p < 0.05$) และเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งทั้ง 3 วิธี ไม่พบการเจริญเติบโตของยีสต์และราหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 9 วัน ค่า a_w และปริมาณความชื้นของขนมจีนแป้งหมักอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแห้งแบบสุญญากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ($p < 0.05$) ส่วนค่า a_w ของเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีค่าเพิ่มขึ้นหลังผ่านการเก็บรักษา ($p < 0.05$)

Title	PRODUCTION OF FERMENTED RICE NOODLE (<i>KHANOMJEEN</i>) AND DRIED FERMENTED RICE NOODLE FORTIFIED WITH PROBIOTIC BY REPLACEMENT THE RICE FLOUR WITH MALI NIL SURIN RICE FLOUR
Author	PIRANIT LOBLOM
Advisor	Sasivimon Chittrakorn, Ph.D.
Co-Advisor	Associate Professor Teeraporn Kongbangkerd, Dr.nat.techn.
Academic Paper	M.S. Thesis in Food Science and Technology - (Type A 2), Naresuan University, 2021
Keywords	Mali Nil Surin rice, Fermented rice flour, Fermented rice noodle, Rheological behaviors, Probiotic, <i>Bacillus coagulans</i>

ABSTRACT

This research was conducted to study the physicochemical properties of fermented rice flours for production of fermented rice noodles. Fermented rice noodles were produced by substitution of fermented Chai Nat flour (FCHI) with fermented Mali Nil Surin flour (FSU) at the level of 0, 10, 20, and 30%. The production of dried fermented rice noodles was performed by using three drying processes including tray drying, vacuum oven drying with operating pressure at 0.2 bar and vacuum infrared drying with Infrared radiation at 1,700 watts and pressure at 0.8 bar. The temperature of each drying method was varied at 50, 60, and 70 °C. Xanthan gum was added at 0.5% to improve the texture properties of dried fermented rice noodles after rehydration. The suitable drying methods were selected to produce dried fermented rice noodles fortified with probiotics. The results indicated that after fermentation process, protein content of Chai Nat and Mali Nil Surin rice flours was decreased, while amount of amylose and total starch content significantly increased ($p < 0.05$). Swelling power and solubility of fermented rice were decreased, while water solubility index increased ($p < 0.05$). Pasting properties measured by RVA showed that peak viscosity values of Chai Nat and Mali Nil Surin

flour increased after fermentation. Retrogradation of rice flour after fermentation of Chai Nat rice variety was increased, while decreased in Mali Nil Surin rice variety.

Bioactive compounds of *Khanom Jeen* obtained by replacing FCHI with FSU were evaluated at the substitution levels of 0, 10, 20, and 30 %. Total phenolic compounds, flavonoids, anthocyanins content, and antioxidant activity of rice noodles were increased after fermentation ($p < 0.05$). Texture characteristics of noodles showed that increasing substitution level of FSU flour had significantly decreased ($p < 0.05$) in hardness and adhesiveness of noodles. The studies on relationship between viscosity and shear rate of rice noodle paste (Before extrusion) revealed that when the shear rate increased, the viscosity of all paste samples tended to decrease, showing rheological behavior of Non-Newtonian type, and exhibiting shear-thinning (Pseudoplastic) characteristics. For rheological properties of rice noodle paste, all paste samples had a higher G' than G'' , indicating that the paste had more solid-like characteristic than liquid-like characteristic and as the substitution level increased, the G' and G'' values decreased. The sensory evaluation of fermented rice noodles indicated that the panelists decided to buy the fermented rice noodle products because of their quality and texture characteristics. The fermented rice noodles without replaced FSU showed the highest overall acceptance followed by the fermented rice noodles replaced with FSU at the level of 10 and 20%, respectively.

The moisture content and a_w of dried fermented rice noodles obtained by replacing FCHI with FSU and added 0.5 % of xanthan gum using tray dryer, vacuum dryer and vacuum infrared dryer at 50, 60, and 70 °C were in the range of 9.02-9.80% (DW) and 0.35-0.43, respectively. For the rehydration ratio analysis, fermented rice noodles dried by using vacuum infrared at three levels of drying temperature had the highest rehydration rate and rehydration ratio was higher as the temperature increased from 50 to 70 °C ($p < 0.05$). The fermented rice noodles obtained from vacuum infrared oven at various temperatures had the lowest cooking time and cooking loss, while the water absorption value was the highest compared to other

drying processes. Hardness and adhesiveness of fermented rice noodles dried by using tray dryer at three temperature levels was higher than those without addition of xanthan gum. The fermented rice noodles dried at 50 °C using vacuum dryer showed the highest hardness value compared to other drying methods. The tensile strength of all dried fermented rice noodles was not significantly different. Rice noodles dried at 70 °C by using vacuum dryer had the highest level of total phenolic content ($p < 0.05$). Fermented rice noodles dried at 50 and 70 °C contained highest amounts of flavonoid content, while dried at 50 °C had highest amounts anthocyanin content ($p < 0.05$). The antioxidant activity measured by DPPH^{*}, ABTS^{**}, and FRAP assays was highest in fermented rice noodle dried by using tray dryer at 50 and 70 °C. Fermented rice noodle dried at 70 °C using vacuum dryer had high antioxidant properties as measured by DPPH^{*} and ABTS^{**} assay, while the highest value measured by FRAP assay was found in sample dried at 50 °C ($p < 0.05$). For vacuum infrared drying, the noodle samples dried at 50 °C contained highest amount of antioxidant activity measured by DPPH^{*}, ABTS^{**}, and FRAP assay.

Addition of probiotic *B. coagulans* to fermented rice noodles dried at 50 °C using tray dryer, vacuum oven dryer and vacuum infrared dryer and kept at room temperature for 0, 3, 6 and 9 days revealed that *B. coagulans* spores were not significantly different on day 0 ($p > 0.05$) with initial spores of 11.47, 11.41, and 11.19 log CFU/g, respectively. After 9 days of storage, survival rates of *B. coagulans* spores were 88.40, 92.29, and 89.54 %, respectively and vacuum dryer (10.14 log CFU/g) showed the highest count of *B. coagulans* spores ($p < 0.05$). The correlation between storage time and survival of *B. coagulans* spores data was performed using a linear regression analysis technique to determine the storage time trend of dried fermented rice noodles until reduction to 6 log CFU/g of spores. The results indicated that dried fermented rice noodles obtained from tray dryer, vacuum oven and vacuum infrared dryer had the storage time of 33, 45, and 39 days, respectively before the *B. coagulans* spores reduced to 6 log CFU/g. The studied of total microbial count of the dried fermented rice noodles after storage indicated that the dried fermented rice noodles obtained from vacuum drying (10.11 log CFU/g) showed highest total

microbial count on day 0. After 9 days of storage, total microbial count of dried fermented rice noodles obtained from tray dryer and vacuum dryer tended to increase ($p < 0.05$), while dried fermented rice noodles obtained from vacuum infrared dryer tended to decrease ($p < 0.05$). Yeast and mold count of fermented rice noodles dried by using different drying processes did not detected after storage for 9 days. The a_w values and moisture content of dried fermented rice noodles from tray dryer and vacuum dryer tended to increase after 9 days of storage, while the a_w of dried fermented rice noodles obtained from vacuum infrared dryer increased ($p < 0.05$).



ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งของ ดร.ศศิวิมล จิตรากร ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร. อีรพร กงบังเกิด กรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ รวมถึงให้กำลังใจในเรื่องงานวิจัย หรือเรื่องในการดำเนินชีวิตประจำวันด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่าง สมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบคุณทุนโครงการวิจัยและพัฒนาภาครัฐร่วมเอกชนในเชิงพาณิชย์ ระดับปริญญาโท ประจำปี 2563 จากสำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ที่ได้ ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและขอขอบคุณบริษัท พราวด์ ออร์แกนิก จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน คณาจารย์ และบุคลากร ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน ตลอดจนการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ให้ที่ใต้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนให้ กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา ครอบครั้ว และบุคคลที่เกี่ยวข้องกับผู้วิจัยที่ให้ กำลังใจและการสนับสนุนในทุกด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

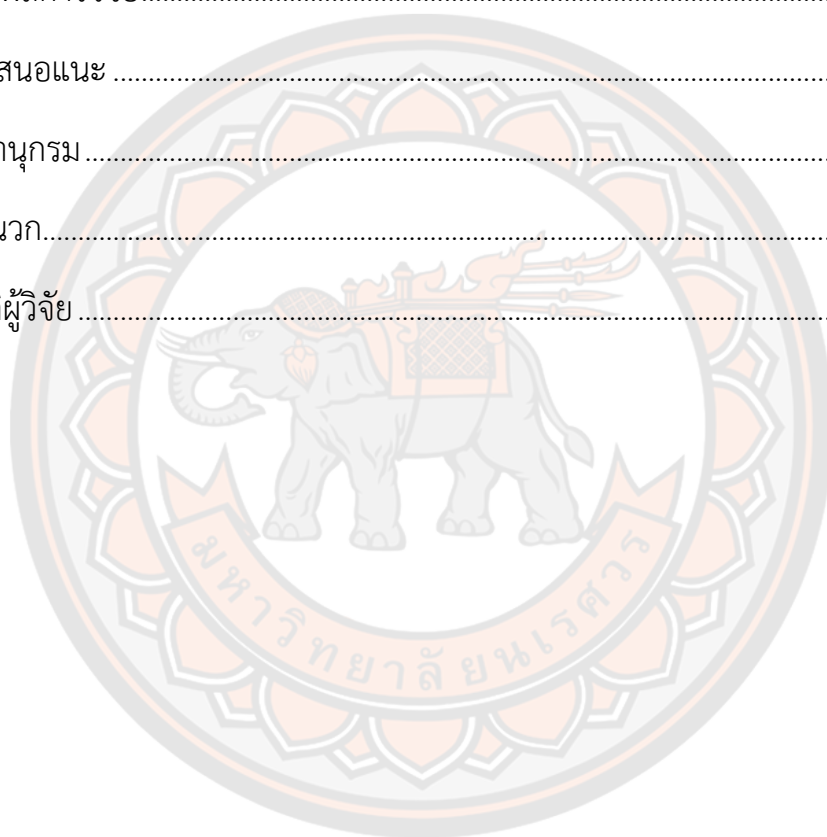
คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มี พระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการและผู้สนใจ ไม่มากก็น้อย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
ประกาศคุุณูปการ.....	ญ
สารบัญ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ข้าว (Rice).....	6
ขนมจีน (Rice Noodles).....	15
ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid).....	24
รีโอโลยี (Rheology).....	26
อนุมูลอิสระ (Free radical).....	29
สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants).....	31
การทำแห้ง (Dehydration).....	45
โพรไบโอติก (Probiotic).....	55

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	60
วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย.....	60
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	60
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี.....	61
สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี	61
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ	62
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา.....	63
สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา.....	63
เครื่องประมวลผลทางสถิติ.....	63
วิธีการดำเนินงานวิจัย	63
ตอนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของข้าวและแป้งหมักจากข้าวพันธุ์ชัยนาท และ ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	65
ตอนที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	68
ตอนที่ 3 การศึกษาการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ได้จากการแทนที่ของ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	72
ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการเสริมโพรไบโอติกลงในเส้นขนมจีนอบแห้ง	75
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	77
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	78
ตอนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของข้าวและแป้งหมักจากข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท และข้าว พันธุ์มะลิสีสุรินทร์.....	78
ตอนที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นขนมจีนแป้งหมักจากการแทนที่แป้ง หมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์.....	88

ตอนที่ 3 การศึกษาการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้งที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ ชยันนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์.....	102
ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการเสริมโพรไบโอติกต่อคุณภาพของเส้นขนมจีนที่ได้จากการ แทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชยันนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์.....	118
บทที่ 5 บทสรุป.....	128
สรุปผลการวิจัย.....	128
ข้อเสนอแนะ	129
บรรณานุกรม.....	131
ภาคผนวก.....	151
ประวัติผู้วิจัย.....	167



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 การจำแนกข้าวตามปริมาณของอะมิโลส.....	6
ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์.....	11
ตาราง 3 ประเภทของสตาร์ชในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการถูกย่อย.....	15
ตาราง 4 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวหักที่ใช้ในการผลิตขนมจีน	17
ตาราง 5 ลักษณะทางกายภาพและปริมาณโปรตีนของขนมจีนแป้งหมักที่ระยะเวลาต่างกัน	18
ตาราง 6 คุณค่าทางโภชนาการของขนมจีนแป้งสดและขนมจีนแป้งหมัก (100 กรัม) ของส่วนที่บริโภค	22
ตาราง 7 อนุโมลอิสระและสารที่เกี่ยวข้อง.....	30
ตาราง 8 ปฏิกริยาของอนุโมลอิสระ.....	31
ตาราง 9 การแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่เมทอกซิล (OCH ₃) ของวงแหวนฟลาวีเลียม	42
ตาราง 10 อัตราส่วนการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์.....	68
ตาราง 11 อัตราส่วนของแป้งหมักและน้ำสำหรับปรับความชื้นแป้งหมัก.....	68
ตาราง 12 อัตราส่วนของแป้งสำหรับตีผสมในการผลิตเส้นขนมจีนเส้นสด	69
ตาราง 13 สภาวะการอบแห้งเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่ของแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	73
ตาราง 14 อัตราส่วนของแป้งสำหรับตีผสมในการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้ง	73

ตาราง 15 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	79
ตาราง 16 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	80
ตาราง 17 ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	82
ตาราง 18 ดัชนีการละลายน้ำ ดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัว และการละลายของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	84
ตาราง 19 ค่า pH และค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	85
ตาราง 20 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความหนืดของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA)	85
ตาราง 21 ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) ค่า pH และค่าสีของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	90
ตาราง 22 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	91
ตาราง 23 ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	92
ตาราง 24 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	101
ตาราง 25 ความชื้น วอเตอร์แอกติวิตี้ (a_w) และค่าสีของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	104

ตาราง 26 อัตราการคืนตัว (Rehydration ratio) และคุณภาพหลังการต้ม (Cooking quality) ของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	108
ตาราง 27 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินทั้งหมดของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน.....	114
ตาราง 28 ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH [•] , ABTS ^{•+} และ FRAP assay ของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	117
ตาราง 29 การรอดชีวิตของสปอร์ <i>B. coagulans</i> ในขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง	119
ตาราง 30 การประมาณการรอดชีวิตของสปอร์ <i>B. coagulans</i> ด้วยสมการเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษากับปริมาณการรอดชีวิตของสปอร์ <i>B. coagulans</i>	121
ตาราง 31 ปริมาณยีสต์และราในเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง.....	125

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวและส่วนประกอบของเมล็ดข้าว	8
ภาพ 2 เมล็ดข้าวพันธุ์เจ้ามะลิสีสุรินทร์ ก. เต็มเมล็ด ข. ข้าวหัก	9
ภาพ 3 ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์หุงสุก.....	9
ภาพ 4 ลักษณะรวงและความยาวรวงข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	10
ภาพ 5 เมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดสีของข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์.....	10
ภาพ 6 โครงสร้างอะมิโลส	13
ภาพ 7 โครงสร้างอะมิโลเพคติน.....	14
ภาพ 8 ขั้นตอนการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักจากข้าวหัก.....	23
ภาพ 9 โครงสร้างของแซนแทนกัม (Xanthan gum)	26
ภาพ 10 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว.....	29
ภาพ 11 การเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจน.....	30
ภาพ 12 โครงสร้างทางเคมีพื้นฐานของสารประกอบฟีนอลิก	36
ภาพ 13 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์	38
ภาพ 14 โครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอยด์แต่ละชนิด	39
ภาพ 15 โครงสร้างทางเคมีของฟลาวิลียมไอออน (Flavylum ion; AH ⁺)	40
ภาพ 16 โครงสร้างของแอนโทไซยานิน.....	41
ภาพ 17 โครงสร้างของแอนโทไซยานินในสารละลายความเป็นกรด-ต่างต่างกัน.....	44
ภาพ 18 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้ง	46
ภาพ 19 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง	47

ภาพ 20 พฤติกรรมการอบแห้ง.....	47
ภาพ 21 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้ง	50
ภาพ 22 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Dryer).....	51
ภาพ 23 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่าง ๆ.....	52
ภาพ 24 ตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศ (Vacuum Infrared Dryer).....	52
ภาพ 25 การสั่นสะเทือนของโมเลกุลของน้ำ.....	53
ภาพ 26 <i>Bacillus coagulans</i>	58
ภาพ 27 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	64
ภาพ 28 การเตรียมแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์	67
ภาพ 29 ขั้นตอนการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมัก.....	70
ภาพ 30 ขั้นตอนการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่มีการเติมเชื้อโพรไบโอติก.....	76
ภาพ 31 อะมิโลแกรมของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว	88
ภาพ 32 ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (Adhesiveness) ของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์.....	93
ภาพ 33 ความสัมพันธ์ของความหนืดและอัตราเฉือนของน้ำแป้ง (Fermented rice noodle paste) ก่อนโรยเส้นที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์.....	94
ภาพ 34 ค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) ของน้ำแป้งก่อนโรยเส้นที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 จากการทำให้ frequency sweep test.....	96
ภาพ 35 ปัจจัยในการซื้อผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแป้งหมักจากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์.....	98

ภาพ 36 ลักษณะเด่นในการตัดสินใจชื่อผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแปงหมักจากการแทนที่แปงหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแปงหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์.....99

ภาพ 37 เส้นขนมจีนแปงหมักที่ได้จากการแทนที่แปงหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแปงหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ร้อยละ 20 อบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน..... 103

ภาพ 38 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกันหลังการคั่วตัว..... 111

ภาพ 39 การรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ในขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแปงหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 118

ภาพ 40 การประมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ด้วยสมการเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษากับปริมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* 122

ภาพ 41 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแปงหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 124

ภาพ 42 ค่า a_w ของเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแปงหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกันระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 125

ภาพ 43 ค่าความชื้นของเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแปงหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง..... 127

ภาพ 44 กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกในการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 155

ภาพ 45 กราฟมาตรฐานของคาเทชินในการวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด.. 156

ภาพ 46 กราฟมาตรฐานของโทรลอกซีในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH* 158

ภาพ 47 กราฟมาตรฐานของโพลลอกซีในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ^{•+}	159
ภาพ 48 กราฟมาตรฐานของโพลลอกซีในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP	160
ภาพ 49 ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทและข้าวหักพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	164
ภาพ 50 แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทและแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	164
ภาพ 51 เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	164
ภาพ 52 สปอร์ <i>B. coagulans</i> เลี้ยงบนอาหาร MRS agar เป็นเวลา 7 วัน ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า	165
ภาพ 53 สปอร์ <i>B. coagulans</i> เลี้ยงบนอาหาร MRS agar เป็นเวลา 14 วัน ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า	165
ภาพ 54 สปอร์ <i>B. coagulans</i> เลี้ยงบนอาหาร MRS agar เป็นเวลา 21 วัน ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า	165

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ข้าว (Rice) เป็นพืชเศรษฐกิจที่คนทั่วโลกบริโภคเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะชาวเอเชีย และมีการปลูกเป็นจำนวนมากเพื่อรองรับต่อความต้องการของผู้บริโภคทั้งในประเทศไทย และส่งออกต่างประเทศ ซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเพื่อส่งออกได้เป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ส่งออกข้าวทั้งในรูปแบบเมล็ดและรูปแบบที่เป็นผลิตภัณฑ์จากข้าว (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) เนื่องจากประเทศมีลักษณะทางภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าว ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาข้าวสายพันธุ์ใหม่ ๆ ขึ้นมาหลากหลายสายพันธุ์ เพื่อปรับปรุงพันธุ์ให้ได้ข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วงดำ คุณภาพการหุงต้มดีขึ้น เพิ่มผลผลิต และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ โดยข้าวมีสี (Pigment Rice) มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวขาว (White Rice) ซึ่งข้าวมีสีที่ปลูกในปัจจุบัน ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry) ข้าวหอมนิล (Hom-nin Rice) ข้าวหอมมะลิแดง (Red Brown Rice) และข้าวที่ได้มีการปรับปรุงพันธุ์ใหม่ ได้แก่ ทับทิมชุมแพ มะลินิลสุรินทร์ เป็นต้น (ภัทรารักษ์ แก้วกุล, 2555) ข้าวเจ้าพันธุ์มะลินิลสุรินทร์เป็นข้าวมีสี ไรต์ต่อช่วงแสง มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วงดำ เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดสุรินทร์ ที่ถูกคัดเลือกสายพันธุ์มาปรับปรุงจนได้เป็น “ข้าวเจ้าพันธุ์มะลินิลสุรินทร์” (เมล็ดดำ 2) ได้รับการรับรองพันธุ์จากกรมการข้าวในปี พ.ศ. 2560 เมื่อนำไปหุงสุกจะมีลักษณะเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอม รับประทานดี เนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสต่ำ (ร้อยละ 13.2) อุดมภูมิแป้งสุกต่ำ มีสารกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก และปริมาณแอนโทไซยานินรวมในเมล็ดสูง ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ ขยายเส้นเลือดช่วยลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหัวใจ เส้นเลือดอุดตันในสมอง และโรคอัมพาต รวมถึงด้านการซึมเศร้า และวิตกกังวล (Saiyot et al., 2017)

ขนมจีน (Rice noodle) เป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวที่มีการบริโภคมาตั้งแต่สมัยโบราณ ปัจจุบันมีการบริโภคอย่างแพร่หลายในทุกภูมิภาคของประเทศ โดยเป็นอาหารหลัก อาหารว่าง และอาหารที่รับประทานในงานประเพณีต่าง ๆ ของไทย ผลิตภัณฑ์ขนมจีนสามารถประกอบอาหารได้หลากหลาย และดัดแปลงให้เข้ากับการรับประทานของท้องถิ่นได้ดี มีคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วน ถ้าวรับประทานร่วมกับเครื่องปรุงรสต่าง ๆ เช่น น้ำยา น้ำพริก แกงเขียวหวาน แกงเผ็ด และเครื่องเคียงเช่น หัวปลี ใบแมงลัก ถั่วฝักยาว และมะระ เป็นต้น (เกียรติพงษ์ เจริญจิตต์, 2552) เส้นขนมจีนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ขนมจีนเส้นสดและขนมจีนแห้ง โดยขนมจีนแห้งจะเป็นเส้น

ขนมจีนที่ได้จากการหมักข้าวเจ้า 3-5 วัน เส้นขนมจีนมีสีคล้ำเล็กน้อย เหนียวนุ่มกว่าขนมจีนเส้นสด และมีกลิ่นหมัก และสามารถเก็บไว้ได้นาน ในสมัยโบราณข้าวที่ใช้ในการทำขนมจีนจะเป็นข้าวแข็ง เช่น ข้าวเหลืองประทิว ข้าวเสาไห้ เนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสที่สูง ทำให้เส้นขนมจีนเหนียวไม่และ ส่วนขนมจีนเส้นสดเป็นเส้นขนมจีนที่ทำจากข้าวเจ้าโดยไม่ผ่านกระบวนการหมัก เส้นขนมจีนมีสีขาว นุ่ม มีความเหนียวน้อยและอายุการเก็บรักษาสั้นกว่าเส้นขนมจีนแปงหมัก (จันทร์เชิดฉาย สังเกตฤกษ์, 2554)

ในกระบวนการผลิตเส้นขนมจีน วัตถุดิบหลักที่ใช้จะเป็นข้าวเจ้าที่ผ่านการขัดสีเอาเยื่อหุ้มเมล็ดออก ซึ่งส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดหรือส่วนของรำข้าวมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ วิตามิน และแร่ธาตุต่าง ๆ ในปริมาณที่สูง หากนำข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีหรือข้าวกล้องมาผลิตเป็นเส้นขนมจีนจะช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและช่วยส่งเสริมสุขภาพให้แก่ผู้บริโภคได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำข้าวกล้องพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอยู่สูงมาผลิตเป็นขนมจีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการ เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพและผู้ที่มิมีปัญหาทางด้านสุขภาพ

เส้นขนมจีนแบบสดเป็นอาหารประเภทแป้งที่มีความชื้นสูง มีการเสื่อมเสียอย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการทำแห้ง (Dehydration) เส้นขนมจีน เพื่อลดปริมาณความชื้น ลดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water Activity) และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเส้นขนมจีน โดยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์ นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาตรของเส้น ทำให้มีน้ำหนักเบา ลดพื้นที่ในการขนส่ง และเพิ่มทางเลือกของผลิตภัณฑ์แก่ผู้บริโภค (วิล รังสาดทอง, 2543) การทำแห้งขนมจีน มีหลายชนิด เช่น การตากแดด การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray Dryers) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) และการใช้วิธีแช่แข็ง-คินรูปและอบแห้งในตู้อบลมร้อนแบบถาด เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันมีประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการอบแห้ง เช่น รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) ซึ่งมีความสามารถในการทะลุทะลวงไปยังเนื้อของเส้นขนมจีนได้สูง ทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลน้ำในเส้นขนมจีนเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของเส้นขนมจีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560) นอกจากนี้ยังพบว่าการทำแห้งร่วมกับระบบสุญญากาศสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็วโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำและลดการสัมผัสกับออกซิเจน ซึ่งช่วยคงคุณภาพทางด้านรูปร่าง สี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้ (Artnaseaw, 2010) เช่น การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying) และการอบแห้งอินฟราเรดแบบสุญญากาศ (Vacuum Infrared Drying) เป็นต้น

โพรไบโอติก (Probiotic) เป็นจุลินทรีย์มีชีวิตที่เมื่อร่างกายได้รับในปริมาณที่เพียงพอจะส่งผลที่เป็นประโยชน์ทางด้านสุขภาพ ซึ่งมีความสำคัญต่อระบบทางเดินอาหาร โดยโพรไบโอติกจะช่วยปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ (Host) ช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่ไม่ก่อให้เกิดโรค และยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ก่อโรค ลดความเสี่ยงการเกิดเซลล์มะเร็งในลำไส้ และกระตุ้นการสร้าง

ภูมิคุ้มกัน (Anal & Singh, 2007) โพรไบโอติกที่ใช้กันมากคือ แล็คโตบาซิลลัส (Lactobacillus) บิฟิโดแบคทีเรีย (Bifidobacteria) เอ็นเทอโรค็อกคัส (Enterococcus) และบาซิลลัส (Bacillus) ซึ่งสามารถบริโภคได้ในรูปของอาหารเสริม นมเปรี้ยว โยเกิร์ต พุดดิ้ง น้ำผลไม้ เครื่องดื่มต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับ *Bacillus coagulans* จัดเป็นโพรไบโอติกที่สามารถสร้างกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) ที่ไม่สร้างสารพิษ ไม่เป็นเชื้อก่อโรค ทนต่อสภาวะความเป็นกรดในกระเพาะอาหาร และสปอร์สามารถทนอุณหภูมิได้ 110 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อบริโภคสปอร์ของ *B. coagulans* และผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินอาหารจะสามารถเจริญเติบโตและสร้างกรดแลคติกซึ่งไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค และเนื่องจากสปอร์ *B. coagulans* สามารถทนต่อกรดและความร้อนได้สูง การนำโพรไบโอติกชนิดนี้มาประยุกต์ใช้ในเส้นขนมจีนแป้งหมัก ซึ่งมีกระบวนการหมักเส้นและโรยเส้นลงในน้ำร้อน ทำให้เชื้อโพรไบโอติกนี้ยังคงหลงเหลืออยู่ซึ่งเมื่อนำมาบริโภค ผู้บริโภคจะได้ประโยชน์จากเชื้อโพรไบโอติกที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ

จากข้อมูลข้างต้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าในปัจจุบันสังคมผู้บริโภคส่วนใหญ่กำลังให้ความสนใจในเรื่องของสุขภาพกันมากขึ้นและมีประชากรบางส่วนมีการดำเนินชีวิตที่เร่งรีบ ทำให้มีพฤติกรรม การบริโภคที่ไม่เหมาะสม รับประทานอาหารไม่ครบถ้วนตามหลักโภชนาการ ดังนั้นผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อสุขภาพจึงเข้ามามีบทบาทต่อผู้บริโภคมากขึ้น เป็นทางเลือกในการบริโภคเพื่อส่งเสริมสุขภาพ และลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่าง ๆ ของกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง และเนื่องจากเกษตรกรได้มีการปลูกข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์เพื่อออกขายสู่ท้องตลาดในรูปของข้าวกล้องบรรจุสุญญากาศ ซึ่งมีข้าวหัก ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกะเทาะเปลือกข้าวที่มีมูลค่าต่ำกว่าข้าวเต็มเมล็ดอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำข้าวหักจากข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มาใช้ในการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของข้าวหัก สร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร นอกจากนี้การเสริมโพรไบโอติกลงในเส้นขนมจีนอบแห้งจะช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ผู้ประกอบการสามารถผลิตเป็นเส้นขนมจีนเสริมโพรไบโอติกอบแห้งที่เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ มีคุณภาพและตามมาตรฐาน เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพได้เป็นอย่างดี

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทและข้าวหักพันธุ์มะลิสีสุรินทร์
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักจากข้าวหักพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ในการผลิตเส้นขนมจีน
3. เพื่อศึกษาวิธีการอบแห้งเส้นขนมจีน คุณสมบัติด้านเคมีกายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้ง

4. เพื่อศึกษาอัตราการรอดชีวิตของเชื้อโพรไบโอติกที่เสริมลงในเส้นขนมจีนแปงหมักอบแห้ง

ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคูณสมบัติของข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ที่มีอายุหลังเก็บเกี่ยว 6-7 เดือน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท พรวิวัฒน์ ออร์แกนิก จำกัด และข้าวพันธุ์ชัยนาทเพื่อนำมาผลิตเส้นขนมจีนแปงหมักโดยการแทนที่แป้งด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันและทำการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมมาศึกษาสถานะในการอบแห้งด้วยกระบวนการอบแห้งที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นคัดเลือกเส้นขนมจีนแปงหมักอบแห้งในสถานะที่เหมาะสมมาทำการผลิตเป็นเส้นขนมจีนแปงหมักอบแห้งเสริมโพรไบโอติกด้วยกระบวนการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์และข้าวพันธุ์ชัยนาทถูกนำมาผลิตเป็นแป้งหมักโดยการหมักแบบธรรมชาติร่วมกับตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และทำการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี รวมไปถึงปริมาณอะมิโลส และปริมาณแป้งทั้งหมด ทำการศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวและแป้งหมักจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ หลังจากนั้นทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพประกอบด้วยค่าสีของแป้งหลังผ่านกระบวนการหมัก ได้แก่ ค่า L^* (ค่าความสว่าง), a^* (สีเขียว- สีแดง) และ b^* (สีน้ำเงิน- สีเหลือง) ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index and Water Solubility Index) กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and Solubility) วิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA รายงานเป็นค่า Peak viscosity, Breakdown, Final viscosity, Setback, Pasting temperature และวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของข้าวและแป้งหมักจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์

ตอนที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักจากข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ในการผลิตเส้นขนมจีนแปงหมักด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักแห้ง และทำการศึกษาคูณสมบัติทางด้านเคมี ประกอบด้วยปริมาณความชื้น ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในเส้นขนมจีน วิเคราะห์ทางด้านกายภาพ ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Adhesiveness) วิเคราะห์คุณสมบัติด้านรีโอโลยีด้วยโหมมดการสั่นแบบไดนามิก (Dynamic oscillatory test) เพื่อหาค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G''), Loss tangent ($\tan \delta$) และความหนืดของน้ำแป้งหลังปั่นผสมด้วยเครื่อง Rheometer จากนั้นทำการทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) เพื่อประเมินความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแปงหมักจากการแทนที่แป้ง เพื่อทำการคัดเลือก

อัตราส่วนที่เหมาะสมสู่การศึกษาในขั้นตอนต่อไป ด้วยใช้การทดสอบแบบ 9-points Hedonic scale โดยใช้คะแนนความชอบจาก 1-9 คะแนน (1=ไม่ชอบมากที่สุดและ 9=ชอบมากที่สุด)

ตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะในการอบแห้งเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการคัดเลือกจากตอนที่ 2 มาทำการอบแห้งด้วยกระบวนการอบแห้ง 3 แบบ ได้แก่ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Tray Dryer) การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying oven) และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ (Vacuum Infrared oven) โดยมีการแปรระดับอุณหภูมิเป็น 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งในการผลิตเส้นขนมจีนจะมีการเติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนอบแห้งหลังคั่ว และทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านเคมี ประกอบด้วยปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระในเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้ง วิเคราะห์ทางด้านกายภาพ ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ทำการทดสอบการคืนตัว (Recovery) คุณภาพด้านการหุงต้ม (Cooking quality) ประกอบด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมในการหุงต้ม (Cooking time) ร้อยละของการดูดน้ำ (Cooking yield) ร้อยละของการสูญเสียของแข็งระหว่างการต้ม (Cooking loss) และวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความเหนียว (Adhesiveness) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) เพื่อทำการคัดเลือกเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งมาศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ตอนที่ 4 ศึกษาการเสริมโพรไบโอติกลงในเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ได้จากตอนที่ 3 ได้แก่ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุชันนาด้วยแป้งหมักข้าวพันธุชันนา สุนทรินในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีการอบด้วยตู้อบลมร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำการเตรียมสปอร์ *Bacillus coagulans* และเติมลงในเส้นขนมจีน นำไปอบแห้งที่สภาวะดังกล่าว และทำการศึกษาอัตราการรอดชีวิตของสปอร์ (Survival count) ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total viable count) ปริมาณยีสต์และรา (Yeast and mold) และวิเคราะห์ทางด้านกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ในเส้นขนมจีนอบแห้ง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้าว (Rice)

ข้าว (*Oryza sativa*) เป็นธัญพืชพวกหญ้าที่อยู่ในวงศ์ Gramineae เป็นธัญพืชที่คนทั่วโลกบริโภคเป็นอาหารหลักโดยเฉพาะชาวเอเชียที่บริโภคมากถึงร้อยละ 90 เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต สามารถเจริญเติบโตได้ในลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น จึงทำให้เกิดความหลากหลายของข้าวแพร่กระจายไปทั่วโลก (อรอนงค์ นัยวิกุล และคณะ, 2547) โดยประกาศกระทรวงพาณิชย์เรื่องมาตรฐานสินค้าข้าว พ.ศ. 2559 ได้จำแนกประเภทของข้าวออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. ข้าวขาว (White rice) คือข้าวที่ได้จากการนำข้าวกล้องเจ้าไปขัดเอารำออก
2. ข้าวกล้อง (Cargo rice, Loonzain rice, Brown rice, Husked rice) คือข้าวที่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออกเท่านั้น
3. ข้าวเหนียวขาว (White glutinous rice) คือข้าวที่ได้จากการนำข้าวกล้องเหนียวไปขัดเอารำออก

4. ข้าวเหนียว (Parboiled rice) คือข้าวเจ้าที่ได้ผ่านกระบวนการทำข้าวเหนียวและขัดเอารำออก

นอกจากนี้สถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute; IRRI) ยังมีการจำแนกชนิดของข้าวตามปริมาณของอะมิโลสได้ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ข้าวเจ้าและข้าวเหนียวตามคุณสมบัติของเมล็ดข้าวสุกดังตาราง 1

ตาราง 1 การจำแนกข้าวตามปริมาณของอะมิโลส

ประเภทข้าว	อะมิโลส (%)	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	0.5-5.0	เหนียวมาก
ข้าวเจ้า	อะมิโลสต่ำมาก	นุ่ม-เหนียว
	อะมิโลสต่ำ	นุ่ม-เหนียว
	อะมิโลสกลาง	นุ่ม-เหนียว
	อะมิโลสสูง	ร่วนแข็ง

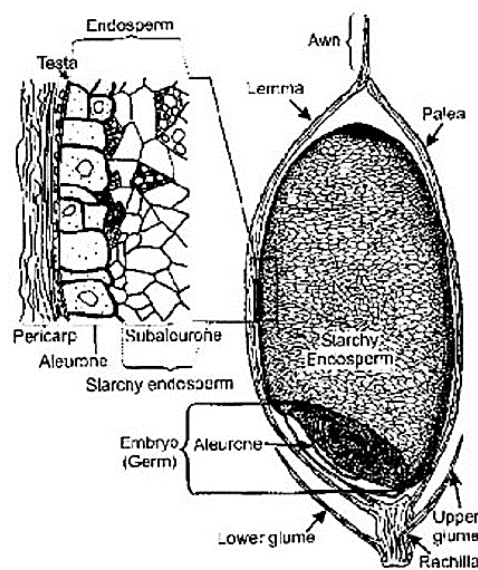
ที่มา: นฤศันส์ วาสิกติลก, 2541

โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ข้าวหรือเมล็ดข้าว (Rice fruit หรือ Rice seed) หมายถึงผล (Fruit) ซึ่งเป็นผลเดี่ยวที่เกิดจากรังไข่อันเดียวในแต่ละดอกย่อยที่รวมกันเป็นดอกช่อ โดยเมล็ดข้าวจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ด เรียกว่า แกลบ (Hull หรือ Husk) เป็นส่วนที่หุ้มอยู่ภายนอก และส่วนเนื้อผลหรือเรียกว่า ข้าวกล้อง (Brown rice) เป็นข้าวที่ยังไม่ผ่านการขัดสี (รักชนก, 2545) ซึ่งสัดส่วนของแกลบและเนื้อผลจะอยู่ที่ร้อยละ 28 และ 72 โดยน้ำหนักตามลำดับ (อรอนงค์ นัยวิกุล และคณะ, 2534)

ข้าวกล้องหรือส่วนที่บริโภคได้ (Brown rice, Dehulled rice, Husked rice หรือ Cargo rice) มีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญดังภาพ 1

1. เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เป็นผิวชั้นนอกของข้าวกล้องหนาประมาณ 10 ไมครอน พัฒนามาจากผนังรังไข่ของดอกข้าว ทำให้เมล็ดข้าวกล้องมีสีต่าง ๆ และมีที่อาหารอยู่ด้านหลังของเมล็ด
2. เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) เป็นชั้นที่มีองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นเซลล์ชั้นเดียวหนาประมาณ 0.5 ไมครอน
3. ชั้นแอลูโรน (Aleurone layer) เป็นชั้นรำละเอียด ภายในเซลล์แอลูโรนมีองค์ประกอบของโปรตีนและไขมัน ในขณะที่ผนังเซลล์จะประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เมื่อบริโภคข้าวกล้องจะให้ความรู้สึกกระด้างกว่าข้าวสาร ซึ่งเซลล์จะมีความหนา 1-7 ชั้น และข้าวเมล็ดสั้นป้อม มักมีจำนวนชั้นแอลูโรนมากกว่าเมล็ดเรียวยาว
4. คัพภะ (Embryo หรือ Germ) เป็นส่วนของจุมูกข้าวที่มีขนาดเล็กอยู่ที่ปลายของเมล็ด ซึ่งจะเจริญเป็นต้นอ่อน ภายในคัพภะประกอบไปด้วยโปรตีน ไขมัน และในส่วนของเยื่อคัพภะยังมีวิตามิน เช่น ไทอะมิน ไนอะซิน และไรโบฟลาวิน เป็นต้น
5. เอนโดสเปิร์ม (Endosperm) คือเนื้อผลหรือข้าวสาร ประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตโดยมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก ลักษณะของเม็ดสตาร์ชเป็นทรงหลายเหลี่ยมขนาด 3-9 ไมโครเมตรอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม และจะมีโปรตีนแทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช (จิตธนา แจ่มจิต, และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2543)



ภาพ 1 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวและส่วนประกอบของเมล็ดข้าว

ที่มา: Champagne, 2004

ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์เป็นพืชในวงศ์หญ้า Poaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Oryza sativa* L. เป็นข้าวเจ้าหอมต่างสีพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดสุรินทร์ ซึ่งเมื่อปี พ.ศ.2546-2549 ศูนย์วิจัยข้าวสุรินทร์ ได้เก็บรวบรวมตัวอย่างข้าวสายพันธุ์มะลินิลดำ (SRNCO3053) ในจังหวัดสุรินทร์มาปลูกคัดเลือกสายพันธุ์บริสุทธิ์แบบรวงต่อแถวทั้งหมด 2 ครั้ง และในปี พ.ศ. 2550-2559 ได้ทำการศึกษาวิจัยตามขั้นตอนการปรับปรุงพันธุ์ จนได้สายพันธุ์มะลินิลดำ SRNCO3053-6-2 ที่กรมการข้าวได้รับรองพันธุ์ตั้งชื่อว่า “ข้าวเจ้าพันธุ์มะลินิลสุรินทร์” (มะลินิลดำ 2) เป็นสายพันธุ์บริสุทธิ์ที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วงดำที่ไวต่อช่วงแสงดังภาพ 2 เมื่อนำไปหุงสุกจะมีลักษณะเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอม รับประทานดี เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสต่ำ (ร้อยละ 13.2) และปริมาณสารหอม 2-acetyl-1-pyrroline ในข้าวกล้อง 2.57 ppm นอกจากพลังงานที่ได้รับจากสารอาหารต่าง ๆ แล้ว สารสกัดจากข้าวกล้องยังมีสารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มสารประกอบฟีนอลในเมล็ดปริมาณสูง (1592.00 mg GAE/100g of sample) และปริมาณแอนโทไซยานิน 5.5 mg/100 g ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระจะออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ ขยายเส้นเลือดช่วยลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหัวใจ เส้นเลือดอุดตันในสมอง และโรคอัมพาต รวมถึงด้านการซึมเศร้า และวิตกกังวล (ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวขอนแก่น, 2562; Saiyot et al., 2017)



ภาพ 2 เมล็ดข้าวพันธุ์เจ้ามะลินิสสุรินทร์ ก. เต็มเมล็ด ข. ข้าวหัก



ภาพ 3 ข้าวพันธุ์มะลินิสสุรินทร์หุงสุก

ลักษณะพฤกษศาสตร์

ข้าวพันธุ์มะลินิสสุรินทร์มีลักษณะพฤกษศาสตร์ ดังนี้

1. ลำต้น มีลักษณะกอแบบ ในระยะออกดอกร้อยละ 50 มีลักษณะกอตั้ง และระยะหลังออกดอก 20 วัน ลำต้นค่อนข้างแข็ง มีความสูงของต้นวัดถึงปลายรวง 122 เซนติเมตร คอรวงค่อนข้างยาว มีจำนวนเมล็ดดีต่อรวง 116 เมล็ด การติดเมล็ดปานกลาง การแตกรวงของเมล็ดปานกลาง และมีระยะพักตัวของเมล็ด 10 สัปดาห์ (Saiyot et al., 2017)

2. ใบ มีสีเขียวอ่อนในระยะแตกกอเต็มที่ แผ่นใบมีขนากบ ที่มุมปลายใบมีลักษณะหลายแบบปนกัน หลังจากระยะออกดอกแล้ว 20 วัน ใบจะมีความกว้างและยาว 1.46 และ 53.90 เซนติเมตร ตามลำดับ ในระยะเก็บเกี่ยวใบจะเขียวและแก่ค่อนข้างช้า สำหรับในระยะแตกกอ ลิ่นใบจะมีสีเขียว ยาว 2.54 มิลลิเมตร รูปร่างมีสองยอด หูใบมีสีเขียว ข้อต่อใบมีสีเขียวอ่อน มุมใบตรงตั้งตรง ยาว 43.26 เซนติเมตร กว้าง 1.75 เซนติเมตร และระยะออกดอกแล้ว 20 วัน ใบจะมีความยาว 53.90 เซนติเมตร กว้าง 1.46 เซนติเมตร

3. ดอก ในระยะออกดอก 20 วัน ลักษณะของรวงข้าวมีความหนาแน่นปานกลาง การยึดของคอรวงข้าวสั้น และความยาวของรวงข้าวในระยะเก็บเกี่ยว 29.8 เซนติเมตร ในระยะเก็บเกี่ยวมีการติดเมล็ดมากกว่าร้อยละ 90 การร่วงของเมล็ดปานกลาง จำนวนรวงข้าวต่อกอ 9 รวง ในระยะออกดอกร้อยละ 50 ยอดเกสรเพศเมียมีสีขาวย สีของปลายยอดดอกมีสีขาวย ความยาวของกลีบรองดอกยาวน้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร สีของกลีบรองดอกมีสีขาวย

4. เมล็ด ในระยะเก็บเกี่ยวเปลือกของเมล็ดเป็นสีเหลือง (สีฟาง) ร่องดำ ขนสั้น เมล็ดไม่มีหาง ข้าวกล้องมีสีม่วงดำ ยอดเมล็ดมีสีขาวย ชนิดของข้าวจัดเป็นข้าวเจ้า การเป็นข้าวท้องไข้ (Chalky grain) ค่อนข้างมาก (ร้อยละ 1.6-2.0) ระยะพักตัวของเมล็ด 8 สัปดาห์ ขนาดของข้าวเปลือกยาว 10.09 มิลลิเมตร กว้าง 2.7 มิลลิเมตร หนา 1.9 มิลลิเมตร ขนาดของข้าวกล้องยาว 7.44 มิลลิเมตร กว้าง 2.01 มิลลิเมตร หนา 1.68 มิลลิเมตร มีรูปร่างเรียวยาว



ภาพ 4 ลักษณะรวงและความยาวรวงข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

ที่มา: Saiyot et al., 2017



ภาพ 5 เมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดสีของข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

ที่มา: Saiyot et al., 2017

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์เป็นข้าวเจ้าที่มีสีม่วงเข้มออกดำ เป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ชนิดแอนโทไซยานิน และมีวิตามินอี ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยลดการอักเสบของเนื้อเยื่อ ช่วยลดการอุดตันของไขมันในเส้นเลือด ช่วยป้องกันโรคเบาหวาน เพิ่มประสิทธิภาพการมองเห็น บำรุงสายตา ป้องกันมะเร็งทรวงอก มะเร็งกระเพาะอาหาร มะเร็งเม็ดเลือดขาว และมีฤทธิ์ต้านอาการซึมเศร้า วิตกกังวล นอกจากนี้ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ยังมีโปรตีนเป็น 2 เท่าของข้าวดอกมะลิ 105 และยังประกอบไปด้วยสารอาหารมากมายเช่น ธาตุเหล็ก สังกะสี ทองแดง โพแทสเซียม แคลเซียม และวิตามินบี (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2556) ดังตาราง 2

ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

องค์ประกอบทางเคมี (ปริมาณต่อ 100 กรัม)		
พลังงาน	361.36	กิโลแคลอรี
ไขมัน	3.4	กรัม
โปรตีน	7.69	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	75	กรัม
น้ำตาล	1.92	กรัม
โซเดียม	2.75	กรัม
วิตามินบี1	0.131	มิลลิกรัม
วิตามินบี2	0.025	มิลลิกรัม
แคลเซียม	14.3	มิลลิกรัม
เหล็ก	1.12	มิลลิกรัม
ใยอาหาร	5.42	กรัม
สารต้านอนุมูลอิสระ	117	มิลลิกรัม
วิตามินอี	0.75	มิลลิกรัม
แอนโทไซยานิน	219.03	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
แกมมาออร์นิทานอล	684.1	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
โอเมก้า3	31.56	มิลลิกรัม
โอเมก้า6	1,039.02	มิลลิกรัม
โอเมก้า9	1,187.09	มิลลิกรัม

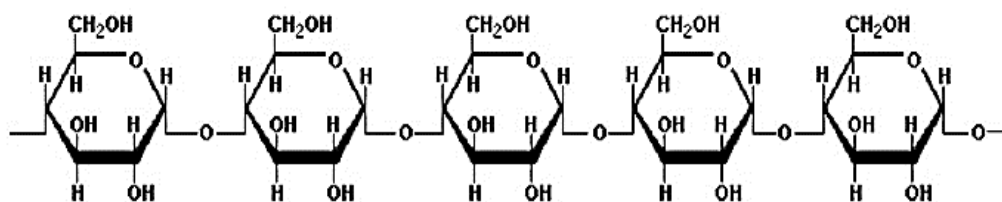
ที่มา: สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2556

สตาร์ช (Starch)

สตาร์ช หมายถึงการนำแป้ง (flour) มาเข้ากระบวนการกำจัดส่วนประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่อยู่รวมกับเม็ดสตาร์ชออกเพื่อทำให้สตาร์ชบริสุทธิ์ เช่น สตาร์ชข้าว (Rice starch) สตาร์ชข้าวสาลี (Wheat starch) สตาร์ชข้าวโพด (Corn starch) (อริญา ลาภโคกสูง, 2555) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชจะประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ที่มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ จัดเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (Reducing end group) โดยสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (Amylose) และอะมิโลเพคติน (Amylopectin) (กล้าณรงค์ ศรีรอด, และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

อะมิโลส (Amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของน้ำตาลกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสประมาณ 200 ถึง 2,000 หน่วย ดังภาพที่ 6 มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุล และค่าระดับขั้นของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization, DP) ที่แตกต่างกัน อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะอยู่คู่กับอะมิโลเพคตินพันกันเป็นเกลียวที่ใจกลางเม็ดสตาร์ช สำหรับอะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะพบที่ขอบของเม็ดสตาร์ช ตำแหน่งของอะมิโลสจะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช โดยอะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous regions) และส่วนผลึก (Crystalline regions) (Hizukuri, 1995) นอกจากนี้อะมิโลสสามารถรวมตัวกับไอโอดีนเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ที่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ เนื่องจากอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารละลายอินทรีย์ โดยมีโครงสร้างหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คล้ายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) เช่น บิวทานอล กรดไขมัน ฟีนอล สารลดแรงตึงผิวหลายชนิด และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งการที่อะมิโลสจะอยู่ในรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลาย อุณหภูมิ และขนาดโมเลกุลของอะมิโลส (อริญา ลาภโคกสูง, 2555)

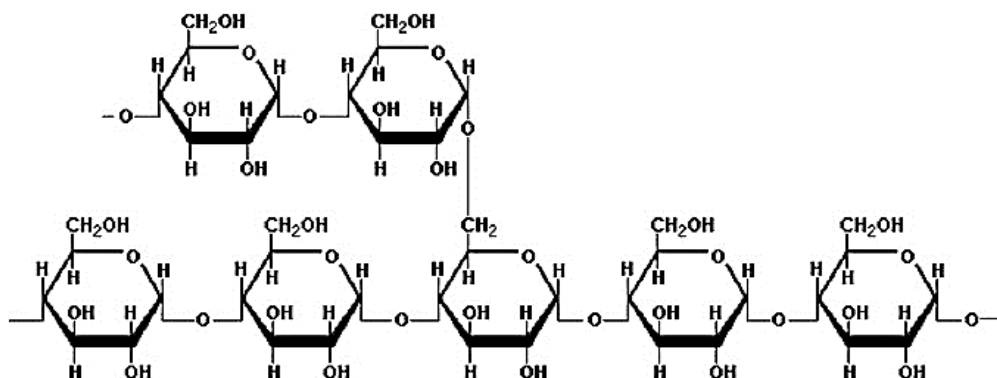


ภาพ 6 โครงสร้างอะมิโลส

ที่มา: Scientific Psychic, n.d.

อะมิโลเพคติน (amylopectin)

อะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของน้ำตาลกลูโคส โครงสร้างจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1,4) glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1,6) glucosidic linkage แสดงดังภาพ 7 อะมิโลเพคตินในสตาร์ชมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง ซึ่งลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพคตินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ สาย A (A-chain) เป็นสายโซ่ที่เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นอีก 2 สาย หรือมากกว่า และสาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ที่เป็นอิสระและถูกแทนที่เพียงจุด C-6 (primary hydroxyl group) ซึ่งในอะมิโลเพคตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น เนื่องจากมีการเชื่อมต่อ A-chain, B-chain และ C-chain ภายในโมเลกุลอะมิโลเพคตินด้วยพันธะ α -(1,6) glycosidic linkage ซึ่งมีสาย C-chain เพียงหนึ่งสายโซ่ต่อโมเลกุล ดังนั้นอัตราส่วนของ A-chain และ B-chain จึงมีความสำคัญ เนื่องจากเป็นการแสดงถึง Degree of Multiple Branching ของโมเลกุล ซึ่งอะมิโลเพคตินหนึ่งโมเลกุลจะมีอัตราส่วนของ A-chain ต่อ B-chain ประมาณ 1.5-2.6:1 (กล้านรงค์ ศรีรอด, และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)



ภาพ 7 โครงสร้างอะมิโลเพคติน

ที่มา: Scientific Psychic, n.d.

ประเภทของสตาร์ช

กระบวนการย่อยอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ช โดยกระบวนการย่อยลำดับแรก คือ ฟันจะทำหน้าที่บดเคี้ยวอาหารย่อยขนาดของชิ้นอาหารให้เล็กลงและคลุกเคล้าชิ้นอาหารที่ถูกบดให้ ขนาดเล็กลงด้วยน้ำลายซึ่งมีเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ที่สามารถย่อยสตาร์ชให้มีขนาด เล็กลงเป็นเด็คซ์ตริน (Dextrin) แต่การย่อยในปากจะเกิดการย่อยเพียงเล็กน้อยในระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น จากนั้นอาหารจะผ่านหลอดอาหารไปยังกระเพาะอาหารซึ่งมีเอนไซม์อะไมเลสอยู่ แต่เอนไซม์ จะไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากในกระเพาะอาหารมีสภาวะที่เป็นกรดสูง แต่จะเกิดกระบวนการ ไฮโดรไลซิส คือการแตกตัวของคาร์โบไฮเดรตทำให้คาร์โบไฮเดรตหรือสตาร์ชมีขนาดโมเลกุลเล็กลง จากนั้นกระบวนการย่อยสตาร์ชที่แท้จริงจะเกิดที่ลำไส้เล็กซึ่งมีสภาพเป็นด่างที่เหมาะสมกับการย่อยสตาร์ชจนสุดท้ายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่สามารถดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ ดังนั้นในเชิง โภชนาการสตาร์ช (Nutritional starch) โดยทั่วไปแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภท ตามอัตราและ ระยะเวลาในการย่อย (Englyst, & Hudson, 1992) ได้แก่ สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (Rapidly digestible starch, RDS) สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้า ๆ (Slowly digestible starch, SDS) และสตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (Resistant starch, RS) (สุนันทา ทองทา, และธนา วิทย์ กุลรัตนรักษ์, 2555) ดังตาราง 3

ตาราง 3 ประเภทของสตาร์ชในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการย่อย

ประเภทของสตาร์ช	แหล่งของสตาร์ช	การย่อยในลำไส้เล็ก
สตาร์ชที่ถูกละลายได้อย่างรวดเร็ว (Rapidly digestible starch: RDS)	อาหารที่มีส่วนประกอบของสตาร์ช เมื่อผ่านการหุงต้มใหม่	สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วไป เป็นน้ำตาลกลูโคสภายใน 20 นาที
สตาร์ชที่ถูกละลายได้อย่างช้า ๆ (Slowly digestible starch, SDS)	สตาร์ชจากธัญพืชดิบ หรือ ผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุก	สามารถย่อยได้อย่างช้า ๆ ไปเป็น น้ำตาลกลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้ เวลาตั้งแต่ 20-110 นาที
สตาร์ชที่ไม่ถูกละลายได้ (Resistant starch, RS)	เมล็ดธัญพืชที่ถูกลบหรือสตาร์ชที่ เกิดการคืนตัว	ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ใน ลำไส้เล็ก

ที่มา: Englyst, & Hudson, 1992

ขนมจีน (Rice Noodles)

ขนมจีน (Rice Noodles; *Khanomjeen*) เป็นอาหารพื้นบ้านที่มีมาตั้งแต่สมัยกรุงศรีอยุธยา จนถึงปัจจุบัน เป็นอาหารหลัก อาหารรับประทานเล่น และอาหารรับประทานในงานประเพณีต่าง ๆ ของไทยที่มีหลักฐานปรากฏว่าขนมจีนเป็นการถนอมอาหารของคนชนชาติมอญโดยการนำข้าวเจ้ามา บดเป็นแป้ง ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า “คนอม” แปลว่าการจับกันเป็นก้อนของแป้งสุก คำว่า “จีน” แปลว่าการทำให้สุก ดังนั้นคำว่า “คนอมจีน” จึงแปลว่าอาหารจากแป้งทำให้สุกรวมกันเป็นก้อน และ ยังมีการเผยแพร่ในกลุ่มคนเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีการเรียกชื่อขนมจีนที่ต่างกันไป ได้แก่ คนเขมร จะเรียกขนมจีนว่า “หนมจีน” คนพม่าเรียกขนมจีนว่า “มอนตี” คนลาวจะเรียกขนมจีนว่า “ข้าวปุ้น” และคนไทยเรียกเพี้ยนจากคำว่า “คนอมจีน” มาเป็น “ขนมจีน” จนถึงปัจจุบัน ขนมจีนเป็นผลิตภัณฑ์ อาหารเส้นที่ได้จากการแปรรูปข้าวเจ้าที่ผ่านการโม่ หรือบดจนเป็นแป้งละเอียด และเหนียวด้วยการ นวดก่อนโรยเส้น ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อน เริ่มจากการหมักข้าวที่ผ่านการล้างให้สะอาดแล้วในภาชนะที่ น้ำไหลผ่านได้สะดวก เช่น ตะกร้า กระบุง โดยจะมีการล้างด้วยน้ำทุกวัน กลับข้าวที่อยู่ด้านล่างขึ้นบน เป็นเวลา 3-5 วัน การหมักหลายวันจะให้กลิ่นรสที่ดี เมื่อหมักจนข้าวเปียกแล้วจึงนำไปบดให้ละเอียด เป็นแป้งด้วยการนำไปตำในครก เมื่อตำจนละเอียดได้ที่แล้ว นำแป้งใส่ถุงผ้ามัดให้แน่นทับด้วยของ หนัก หรือแขวนไว้ให้สะเด็ดน้ำจนได้แป้งที่แห้งหมาด เรียกว่า การทับน้ำ จากนั้นนำแป้งมานวดอีก ครั้งจนเนื้อแป้งเหนียวไม่แตกออกจากกัน เมื่อเนื้อแป้งเข้ากันดีแล้วปั้นเป็นก้อนกลมที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 15 เซนติเมตร นำไปต้มในน้ำเดือดให้ผิวรอบนอกสุกกลิ้งเข้าไปประมาณ 1

เซนติเมตร นำมานวดอีกครั้งด้วยการโกลกในครก ระหว่างนวดมีการเติมน้ำร้อนเพื่อให้แป้งเหนียว ละเอียดรวมตัวกันดี หลังจากนั้นนำมากรอง และโรยเส้นในน้ำร้อนโดยภาชนะทรงกระบอกเจาะรู หลังจากเส้นลอยขึ้น หรือเส้นสุกใส่หม้อที่มีน้ำเย็น ล้างทำความสะอาด และจับเส้นขนมจีนใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมานี้จะเป็นการทำขนมจีนแป้งหมัก ใช้เวลาในการทำแป้งหลายวัน เพื่อได้กลิ่นรสที่ดี และมีอายุการเก็บรักษานานกว่าขนมจีนแป้งสด ซึ่งขนมจีนแป้งสดทำจากแป้งที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก จึงทำให้ไม่มีกลิ่นหอมเหมือนขนมจีนแป้งหมัก และมีรสชาติที่แตกต่างจากแป้งหมักไปเล็กน้อย (ทวีศักดิ์ เกษปทุม, ม.ป.ป.) ข้าวเจ้าที่เหมาะสมในการทำขนมจีนจะมีปริมาณอะมิโลส (Amylose) สูงประมาณร้อยละ 27-32 เนื่องจากข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำจะทำให้เส้นขนมจีนนิ่ม เส้นขนมจีนเกาะติดเป็นเนื้อเดียวกัน และข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงเกินไป จะได้เส้นขนมจีนที่แข็ง (อรอนงค์ นัยวิกุล และคณะ, 2534)

ชนิดของเส้นขนมจีน

เส้นขนมจีนแบ่งได้เป็น 2 ชนิด (จันทร์เฉติฉาย สังเกตุดิษฐ์, 2554) ได้แก่

1. ขนมจีนแป้งหมัก เป็นที่นิยมทางภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เส้นขนมจีนได้จากการหมักข้าวเจ้าหรือข้าวปลายเป็นเวลา 3-5 วัน เส้นขนมจีนมีสีคล้ำเล็กน้อย เหนียวนุ่มกว่าขนมจีนเส้นสด มีกลิ่นหมัก และสามารถเก็บไว้ได้นาน ข้าวที่ใช้จะเป็นข้าวแข็ง เช่น ข้าวเหลืองประทิว และข้าวเสาไห้ ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสสูง ทำให้เส้นขนมจีนมีความเหนียว แหล่งน้ำที่ใช้จะเป็นน้ำจากแหล่งธรรมชาติ หรือน้ำบาดาล ไม่ควรใช้น้ำประปา จะส่งผลให้เส้นขนมจีนเละ ไม่เป็นเส้น
2. ขนมจีนเส้นสด เป็นเส้นขนมจีนที่ทำจากข้าวเจ้า หรือข้าวปลายที่ผ่านการแช่น้ำหรือล้างน้ำก่อนนำมาไม่แล้วทำขนมจีน ขนมจีนแป้งสดเส้นจะขาว นุ่ม อุ่มน้ำมากกว่า แต่เส้นขนมจีนเส้นสดจะเหนียวน้อยกว่าเส้นขนมจีนแป้งหมัก อายุการเก็บรักษาสั้นกว่า กระบวนการผลิตใช้เวลาสั้นกว่า เนื่องจากไม่ต้องแช่ข้าวและหมักข้าวหลายวัน สำหรับการเลือกซื้อขนมจีนแป้งสดควรเลือกซื้อที่ทำสดใหม่ เส้นไม่ขาด จัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ไม่มีกลิ่นเหม็นแป้ง ไม่มีเมือก และควรนั่งก่อนรับประทาน

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต

1. ข้าว วัตถุดิบที่นำมาใช้ทำขนมจีน คือปลายข้าวเจ้าหรือข้าวหัก การเลือกปลายข้าวในการทำขนมจีนขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว แหล่งที่ปลูก วิธีการปลูก วิธีการสีข้าว อายุการเก็บของข้าว ซึ่งส่งผลต่อสีและเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีน ในการผลิตเส้นขนมจีนนิยมใช้ข้าวที่มีอายุการเก็บไม่ต่ำกว่า 3-4 เดือน แต่ไม่เกิน 1 ปี ซึ่งเรียกว่า “ข้าวเก่า” ถ้าใช้ข้าวที่มีอายุการเก็บมากกว่า 1 ปี เส้นขนมจีนที่ได้จะแข็งกระด้าง ร่วน และไม่มีควมมันวาว แต่ถ้าเป็น “ข้าวใหม่” ที่มีอายุการเก็บต่ำกว่า 3 เดือน เส้นขนมจีนที่ได้จะมีลักษณะนิ่ม เกาะติดกัน และได้เส้นปริมาณน้อยกว่า นอกจากนี้ข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสกระด้าง เกิดสีคล้ำ ขาวขุ่น และด้านไม่มันวาว ข้าวที่นิยมนำมาผลิตเส้นขนมจีน ได้แก่ ข้าวเหลืองอ่อน ข้าวนางพญา ข้าวปิ่นแก้ว และข้าวตะเภาแก้ว ข้าวขาวตาแห้ง

ข้าวเหลือง 11 เป็นต้น ซึ่งข้าวหักที่นิยมใช้ผลิตขนมจีนมีองค์ประกอบทางเคมี (พัชรี โสธนาสมบุรณ์ และคณะ, 2534) ดังตาราง 4

ตาราง 4 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวหักที่ใช้ในการผลิตขนมจีน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)						
ความชื้น	เถ้า	ไฟเบอร์	โปรตีน	ไขมัน	สตาร์ช	อะมิโลส
9.57-14.88	0.26-0.66	0.33-1.79	5.99-8.69	0.04-1.74	87.49-92.66	27.25-33.33

ที่มา: พชรี โสธนาสมบุรณ์ และคณะ, 2534

2. น้ำ น้ำที่ใช้ในการผลิตขนมจีนส่งผลต่อสีของเส้นขนมจีน น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำสะอาดปราศจากสิ่งแขวนลอย มีความกระด้างต่ำ ถ้าเป็นน้ำบาดาลควรสุบพักไว้เพื่อให้ไอออน (Ion) ของเหล็กตกตะกอนก่อนนำมากรองผ่านทราย และผ่านเครื่องกำจัดน้ำกระด้าง สำหรับน้ำประปาไม่ควรมีปริมาณคลอรีนมากเกินไป เพราะจะทำให้เส้นขนมจีนมีกลิ่นที่ผิดปกติ ส่วนน้ำขุ่นจะได้เส้นขนมจีนมีสีคล้ำ (อรอนงค์ นัยวิกุล และคณะ, 2534) น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดเล็กน้อย (pH 6.4) จะทำให้เส้นขนมจีนมีสีเขียวปน และน้ำที่ค่อนข้างเป็นกรด (pH 5.5) ทำให้เส้นขนมจีนมีสีแดงปน (ชนรดี ชูทอง และคณะ, 2559)

3. เกลือ นิยมใช้เกลือเม็ดสีขาว สะอาด ใส่เกลือขณะนึ่งน้ำแป้ง เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักแป้งที่ส่งผลต่อการเกิดรสและกลิ่นเหม็นเปรี้ยว (รัชนก จัสดวงษ์, 2545)

ขั้นตอนการผลิตขนมจีนแป้งหมัก

การผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักมี 9 ขั้นตอน (ชนรดี ชูทอง และคณะ, 2559; ณรงค์ นิยมวิทย์, 2528; วรณัฐ ศรีเกษฎารักษ์ และคณะ, 2542) โดยสรุปขั้นตอนการผลิตดังภาพ 8

1. การหมักข้าว นำปลายข้าวมาล้างให้สะอาดปราศจากฝุ่น และสิ่งเจือปน ใส่ข้าวลงในภาชนะสำหรับหมักข้าวที่น้ำสามารถไหลผ่านได้สะดวกที่ทำด้วยไม้ไผ่สาน เช่น กระบุง ตะกร้า หรือถังไม้ ทำการหมักโดยนำข้าวตั้งทิ้งไว้กลางแดด การหมักกลางแดดทำให้ข้าวมีสีขาว ส่วนการหมักไว้ในที่ร่มข้าวจะมีสีเหลืองอมส้ม ในระหว่างการหมักต้องล้างข้าวทุกวัน กลับข้าวจากด้านล่างขึ้นด้านบน ทำวนซ้ำเป็นเวลา 2 วัน ในการผลิตระดับพื้นบ้านจะหมักข้าวจนเปียกชุ่ม และสามารถนวดได้ด้วยมือ โดยไม่ต้องใช้ไม้ สำหรับการใช้ข้าวปลายในการหมักจะทำให้เปียกชุ่ม เนื่องจากแป้งถูกไฮโดรไลซ์ได้ สารประกอบ Dextrin และ Maltose โดยเอนไซม์อะไมเลสซึ่งอยู่ในแป้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราการ

เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่อการหมัก โดยมีหลักการที่ว่า การเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการหมักต้องเจริญได้ดีมีอัตราสูงกว่าการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย และเกิดกลิ่นรสที่ไม่ต้องการ อาหารหมักต้องต่าง ๆ จึงต้องมีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสม การเจริญของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณโปรตีน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน และเกลือแร่ที่จะได้รับ ซึ่งการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ยังต้องการน้ำ พลังงาน ไนโตรเจน คาร์บอน และเกลืออนินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความต้องการอาหารที่แตกต่างกัน ดังนั้นข้าวที่ผ่านการหมักจะมีลักษณะทางกายภาพและปริมาณโปรตีนของขนมจีนที่แตกต่างกันดังตารางที่ 5 โดยข้าวที่ผ่านการหมักจะมีกลิ่นแรง และสีคล้ำขึ้น เนื่องจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ *Lactobacillus* spp. และ *Streptococcus* spp. และการหมักส่งผลให้เม็ดแป้งดูดน้ำ แยกตัวได้ดีเมื่อสัมผัสกับความชื้น เนื่องจากโปรตีนอยู่รอบเม็ดแป้งสลายตัวไปร้อยละ 2-3 อย่างไรก็ตามถ้ามีการหมักมากเกินไปเส้นขนมจีนที่ได้จะไม่เหนียว เป็นเพราะการทำงานของเอนไซม์ชนิดหนึ่งที่อยู่ในน้ำข้าวทำให้โมเลกุลของแป้งแตกตัวมีขนาดเล็กลง การแตกตัวของเม็ดแป้งมีผลทำให้อะมิโลสหลุดออกมาจับตัวกันเป็นเจลเมื่อได้รับความเย็น ทำให้เส้นขนมจีนมีความเหนียวมากขึ้น และการที่ปริมาณโปรตีนในแป้งต่ำลงมีผลทำให้เจลหรือเส้นขนมจีนที่ได้มีความนุ่ม ไม่กระด้าง

ตาราง 5 ลักษณะทางกายภาพและปริมาณโปรตีนของขนมจีนแป้งหมักที่ระยะเวลาต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการหมัก (วัน)	โปรตีน (ร้อยละ)		
	ขณะหมักข้าว	ขณะทับน้ำแป้ง	เส้นขนมจีน
	สี	กลิ่น	เนื้อสัมผัส
1	ขาว	กลิ่นข้าว	ทึบแสง, เหนียว
2	ขาวปนเหลือง	กลิ่นหมัก	มันวาว, นุ่มกว่า
	โปรตีน (ร้อยละ)		
เวลาที่ใช้ในการหมัก (วัน)	ขณะหมักข้าว	ขณะทับน้ำแป้ง	เส้นขนมจีน
1	5.88	3.68	1.54
2	5.79	3.05	1.46
3	4.98	2.48	1.14

ที่มา: วรนุช ศรีเจษฎารักษ์ และคณะ, 2542

2. การโม้ข้าว เมื่อหมักข้าวจนครบจำนวนวัน หรือจนข้าวเปียกยุ่ยแล้วนำข้าวมาล้างให้สะอาด บดด้วยโม่หิน หรือนำไปยีผ่านผ้าขาวที่ผูกไว้บนปากโอ่ง เติมน้ำลงไปทีละน้อยระหว่างโม่จะช่วยให้การทำงานสะดวกขึ้น ในขณะที่โม่ใส่เกลือประมาณร้อยละ 7 ของน้ำหนักข้าว ถ้าข้าวเก่าจะใช้ประมาณร้อยละ 4 เพื่อป้องกันไม่ให้แ่่งเกิดกระบวนการหมักในขั้นตอนการนอนน้ำแ่่ง

3. การนอนน้ำแ่่ง กรองน้ำแ่่งที่ได้จากการโม่ด้วยผ้าขาวบางใส่ลงในภาชนะ เช่น โอ่ง ปล่อยให้ทิ้งไว้ให้แ่่งตกตะกอนประมาณ 1-2 วัน ดูดน้ำด้านบนออก 2-3 ครั้ง จะช่วยให้แ่่งมีสีขาว และเกิดกลิ่นหมักน้อยลง โดยการดูดน้ำทิ้งทุกวันพร้อมใส่เกลือทุกครั้งทีปล่อยให้เย็น สำหรับข้าวที่ไม่แบบอุตสาหกรรมจะตกตะกอนน้ำแ่่ง 1 คั้น แต่การผลิตระดับพื้นบ้านอาจจะนอนน้ำแ่่งได้ถึง 1 เดือน โดยการเปลี่ยนน้ำทุกวันพร้อมกับใส่เกลือเพิ่มลงไป

4. การทับน้ำแ่่ง การทับน้ำแ่่งเป็นการกำจัดน้ำส่วนเกินออกไป โดยนำน้ำแ่่งที่ได้จากการนอนน้ำแ่่งใส่ถุงผ้าดิบผูกเชือกให้แน่นแล้วทับด้วยของหนักไว้ 1 คั้น แ่่งที่ได้จากการทับน้ำแ่่งจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 42-44 ขึ้นอยู่กับน้ำหนักและเวลาที่ทับ

5. การนึ่งแ่่ง หลังจากทับน้ำแ่่งที่ได้มาปั่นเป็นก้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20-25 เซนติเมตร จากนั้นนำก้อนแ่่งไปต้มหรือนึ่งให้สุกเฉพาะผิวรอบนอกสีลงไปประมาณ 1-2 เซนติเมตร ของก้อนแ่่ง หรือประมาณร้อยละ 27-34 ของแ่่งทั้งหมด ในขั้นตอนนี้นี้จะมีผลต่อความเหนียวของแ่่งขนมจีน ถ้าแ่่งสุกมากเกินไปเส้นขนมจีนจะเหนียวมากทำให้โรยเส้นยาก แต่ถ้าแ่่งสุกน้อยเกินไปเส้นขนมจีนจะขาดง่าย ไม่สามารถจับเป็นเส้นได้

6. การนวดแ่่ง เป็นการนวดผสมแ่่งดิบและแ่่งสุกเข้าด้วยกัน ทำให้เม็ดแ่่งแตกและแ่่งมีความเหนียวมากขึ้น อาจนวดด้วยมือหรือเครื่องนวดเพื่อให้แ่่งเข้ากันดี ถ้าแ่่งแห้งเกินไปสามารถเติมน้ำร้อนลงไปในช่วงตอนนี้ได้ เรียกว่า “การนึ่งแ่่ง” แ่่งที่ผ่านการนวดจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 70-75 เป็นแ่่งที่มีความเหนียวที่เหมาะสม

7. การกรองแ่่ง เนื่องจากการต้มแ่่งให้สุกและจับตัวเป็นก้อนทำให้การนวดไม่สามารถทำให้เม็ดแ่่งแตกออกได้หมด บางส่วนยังเป็นก้อนเล็ก ๆ ปนอยู่ จะต้องกรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อให้แ่่งนั้นมีความละเอียดสม่ำเสมอ โดยนำแ่่งที่นวดแล้วใส่ผ้าขาวบาง รวบชายผ้าเข้าหากันแล้วบีบแ่่งให้ผ่านรูผ้าออกมา ทำให้โรยเส้นขนมจีนได้ง่าย และเส้นขนมจีนเรียบสม่ำเสมอ

8. การโรยเส้นขนมจีน การโรยเส้นทำได้หลายวิธี โดยการผลิตระดับพื้นบ้านจะใช้แ่ว่นหรือฝื่อน แ่ว่นมีลักษณะเป็นโลหะกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 นิ้ว ที่ทำการเจาะรูเต็มผิวหน้าของโลหะ วางแผ่นโลหะกลมตรงกลางผืนผ้าซึ่งเจาะเป็นวงกลมขนาดเดียวกับแผ่นโลหะแล้วเย็บตรึงขอบแผ่นโลหะติดกับผ้า เมื่อใส่แ่่งลงไปในช่วงแล้วต้องรวบชายผ้าเข้าหากัน ใช้อีกมือบีบแ่่งให้ผ่านรูแ่ว่นลงในหม้อน้ำร้อนเป็นวงกลม พยายามรักษาระยะห่างแ่ว่นกับกระทะให้คงที่เพื่อให้ขนาดเส้นเท่ากัน และเส้นไม่ขาด หม้อที่ใช้ในการต้มเส้นขนมจีนต้องมีขนาดใหญ่เพื่อป้องกันการลุดของอุณหภูมิ

อย่างรวดเร็ว และไม่ควรรอยเส้นในปริมาณที่มาก เนื่องจากจะส่งผลทำให้เส้นสุกไม่ทั่วถึง สำหรับเพื่อน นั้นเป็นภาชนะรูปทรงกระบอก ทำด้วยโลหะอาจเป็นสังกะสีหรือเหล็กปลอดสนิมเจาะรูเล็ก ๆ ไว้ที่ก้น มีหู 2 หู สำหรับยึดติดไม้ในขณะที่ทำการบดมีภาชนะอีกใบหนึ่งมีลักษณะคล้ายๆกัน แต่มีขนาดเล็กกว่า เล็กน้อย สามารถหลวมลงในภาชนะแรกได้พอดี ภาชนะใบนี้ไม่เจาะรูแต่ใช้สำหรับกดแป้งที่นวดแล้ว ให้ออกจากภาชนะใบแรก การกดก็ปฏิบัติเช่นเดียวกับการใช้แฉ่ว ในโรงงานขนาดใหญ่ใช้เครื่องมือที่มี ลักษณะเหมือนแฉ่ว แต่ทำด้วยโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 นิ้ว ต่อตรงกับท่อเครื่องปี้ม และถึงเก็บแป้งที่นวดแล้ว เมื่อเดินเครื่องปี้มน้ำแป้งจะถูกอัดผ่านแฉ่วลงในน้ำร้อนเช่นเดียวกับการใช้ แฉ่ว ในขณะที่การโรยเส้นควรรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 90-95 องศาเซลเซียส เมื่อเส้นลอยขึ้นมาตักใส่ น้ำ เย็นแล้วใส่อ่างน้ำเพื่อทำเป็นจับต่อไป ถ้าปล่อยทิ้งไว้เส้นจะสุกเกินไปขาดความคงตัว

9. การจับเส้นขนมจีน เมื่อเส้นสุกแล้วลอยขึ้นให้ตักใส่น้ำเย็นเพื่อหยุดการดูดน้ำของเส้น ขนมจีน เพื่อลดการเปื่อยของเส้น และควรเปลี่ยนน้ำบ่อย ๆ เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำไม่ให้สูงเกินไป วิธีการจับเส้นเริ่มจากเรียงเส้นขนมจีนให้เป็นเส้นซ้อนกันประมาณ 7-8 เส้น ตามขนาดของจับที่ ต้องการ วางเส้นขนมจีนในลักษณะคว่ำมือลงในภาชนะ ทิ้งให้สะเด็ดน้ำเพื่อรอให้เส้นแห้งและหดตัว เส้นจะแข็งและเหนียวขึ้น จับตัวเป็นก้อน เรียกว่า “จับ”

คุณภาพ และคุณค่าทางโภชนาการของเส้นขนมจีน

ขนมจีนแป้งหมัก และแป้งสด (มผช.500, 2547)

1. ลักษณะทั่วไป

ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องจับเรียงหรือทำให้มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน อาจมีเส้น ขาดได้บ้างเล็กน้อย

2. สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้และสม่ำเสมอ

3. กลิ่น

ต้องไม่มีกลิ่นอับหรือกลิ่นเหม็นบูด

4. กลิ่นรส

ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของขนมจีน ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์

5. ลักษณะเนื้อสัมผัส

ต้องนุ่มเหนียว ไม่ละ

6. สิ่งแปลกปลอม

ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด เศษไม้ ชิ้นส่วนหรือสิ่งปนเปื้อนจากสัตว์

7. วัตถุเจือปนอาหาร

หากมีการใช้วัตถุกันเสีย สารฟอกขาว และสารทำให้ขึ้น ให้ออกได้ตามชนิดและปริมาณที่
กฎหมายกำหนด

8. ความเป็นกรด-ด่าง

ขนมจีนแป้งหมัก ต้องอยู่ระหว่าง 3.0 - 4.5 และขนมจีนแป้งสด ต้องอยู่ระหว่าง 4.0-6.0

9. จุลินทรีย์

Total viable count ต้องไม่เกิน 1×10^6 CFU/g, *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* ต้องไม่เกิน 100 CFU/g และ *Escherichia coli* ต้องน้อยกว่า 3 CFU /g

ขนมจีนแห้ง (มผช.140, 2546)

1. ลักษณะทั่วไป

ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องมีขนาดเส้นใกล้เคียงกัน อาจมีเส้นแตกหักได้บ้างเล็กน้อย

2. สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้และสม่ำเสมอ

3. กลิ่น

ต้องไม่มีกลิ่นอับ กลิ่นเหม็นเปรี้ยว

4. กลิ่นรส

ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของขนมจีน ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์

5. ลักษณะเนื้อสัมผัส

เมื่อทำให้สุกแล้ว เส้นต้องนิ่มเหนียว ไม่และ

6. สิ่งแปลกปลอม

ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด เศษไม้

ชิ้นส่วนหรือสิ่งปนจากสัตว์

7. วัตถุเจือปนอาหาร

หากมีการใช้วัตถุกันเสีย สารฟอกขาว และสารทำให้ขึ้น ให้ออกได้ตามชนิดและปริมาณที่
กฎหมายกำหนด

8. ความชื้น

ต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

9. อะฟลาทอกซิน (Aflatoxin)

ต้องไม่เกิน 20 $\mu\text{g}/\text{kg}$

10. จุลินทรีย์

Total viable count ต้องไม่เกิน 1×10^3 CFU/g, Yeast และ Mold ต้องน้อยกว่า 10 CFU/g

คุณค่าทางโภชนาการของนมจืดและนมจืดเข้มข้นต่อเส้นนมจืด 100 กรัม แสดงในตาราง 6

ตาราง 6 คุณค่าทางโภชนาการของนมจืดและนมจืดเข้มข้น (100 กรัม) ของส่วนที่บริโภค

สารอาหารที่ได้รับ	นมจืด	นมจืดเข้มข้น
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	90	77
ความชื้น	77.5	80.7
โปรตีน	1.4	0.9
ไขมัน	tr	0.1
องค์ประกอบโดยประมาณ (กรัม)		
คาร์โบไฮเดรต	21.0	18.2
เยื่อใยหยาบ	0.1	0.1
ใยอาหาร	-	-
เกลือ	0.1	0.1
แคลเซียม	7	7
เกลือแร่ (มิลลิกรัม)		
ฟอสฟอรัส	22	14
เหล็ก	2.3	0.9
วิตามิน (มิลลิกรัม)		
ไทอะมิน	0	tr
ไรโบฟลาวิน	tr	0.02
ไนอะซิน	0.1	0.4

หมายเหตุ: tr หมายถึงเหลืออยู่ในปริมาณน้อยมาก

ที่มา: กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2535; ปราณี วราสวัสดิ์, 2547



ภาพ 8 ขั้นตอนการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักจากข้าวหัก

ที่มา: Jeesuda, & Wannee, 2010

ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid)

ไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารประกอบประเภทโพลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีขนาดใหญ่ เกิดจากพอลิเมอร์โมเลกุลเดี่ยวมาต่อกัน มีคุณสมบัติเป็นโพลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยไฮโดรคอลลอยด์จะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามแหล่งกำเนิด ได้แก่

1. ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสาหร่าย

1.1 แอลจีเนต (Alginate) เป็นเกลือของกรดแอลจินิก (alginic acid) ได้จากการสกัดสาหร่ายสีน้ำตาล (Phaeophyceae)

1.2 วุ้น (Agar) สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (Rhodophyceae)

1.3 คาร์ราจีแนน (Carrageenan) สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (Rhodophyceae)

2. ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากพืช

2.1 เพกทิน (Pectins) เป็นสว่นประกอบอยู่ในผนังเซลล์พืช

2.2 อนุพันธ์เซลลูโลส (Cellulose derivative) เป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากการดัดแปรคุณสมบัติของเซลลูโลสมีหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (carboxymethylcellulose; CMC), เมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose; MC) และไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropylmethylcelluloses; HPMCs) เป็นต้น

2.3 กัมอารบิก (Gum arabic) เป็นยาง (exudate) ของต้นอคาเซีย (Acacia)

2.4 กัมคารายา (Gum Karaya) เป็นยาง (exudate) ของต้น Sterculiaurens

2.5 กาแล็กโทแมนแนน (Galactomannans) สกัดจากเนื้อเมล็ด (endosperms) ของเมล็ดถั่ว (Legume seeds) ที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ โลคัสปินกัม (Locust bean gum; LBG) ได้จากเมล็ดโลคัสปิน (locust bean seeds) และกัวกัม (Guar gum) ได้จากเมล็ดกัว (guar seeds)

2.6 กลูโคแมนแนน (Glucomannans) ที่สำคัญ ได้แก่ คอนยัคแมนแนน (Konjac mannan) สกัดจากหัว (tubers) ของ *Amorphophallus konjac*

3. ไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากจุลินทรีย์

3.1 แซนแทนกัม (Xanthan gum) เป็นกัมที่สังเคราะห์ขึ้นโดยแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris*

3.2 เจลแลนกัม (Gellan gum) เป็นกัมที่สังเคราะห์ขึ้นโดยแบคทีเรีย *Sphingomonas elodea* หรือ *Pseudomonas elodea*

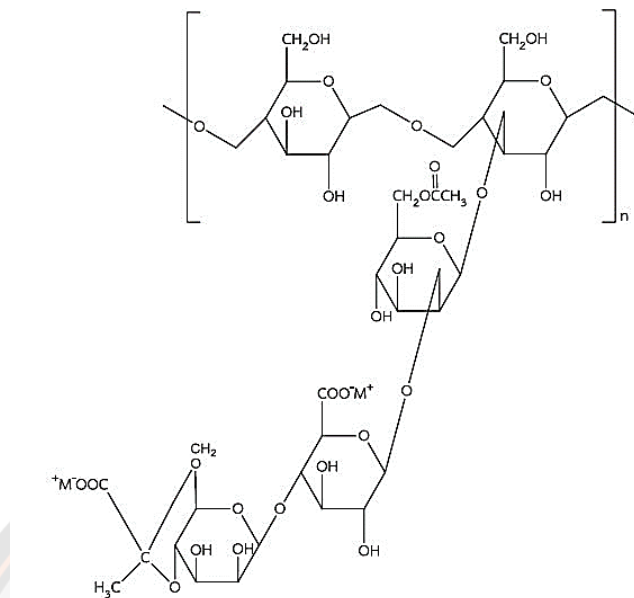
ไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน สามารถทำหน้าที่ได้หลากหลายในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อใช้เป็นสารที่ทำให้ข้นหนืด (Thickening agent), สารที่ทำให้คงตัว (Stabilizing agent), สารที่ทำให้เกิดเจล (Gelling agent), สารที่ทำให้อิมัลชันคงตัว (Emulsifier) หรือใช้ทดแทนไขมันในอาหาร (Fat substitute), ช่วยยับยั้งการเกิดผลึกน้ำแข็งหรือผลึกน้ำตาลใน

ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน, เก็บกักและควบคุมการปล่อยกลิ่นรส (Flavor encapsulation) เป็นต้น ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการเลือกไฮโดรคอลลอยด์ (พัชรพร ศรีชัยนาท, 2561) ได้แก่

1. สมบัติของเนื้อ (Body) ที่ต้องการ เช่น ความหนืด (Viscosity) และรีโอโลยี (Rheology)
2. ลักษณะความรู้สึกเมื่อมีอาหารอยู่ในปาก (Mouth feel) เช่น ลักษณะการลื่นไหล (Slimy), Non-slimy
3. ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ของเจลที่ต้องการ เช่น ความแข็งแรงของเจล (Gel strength)
4. ลักษณะปรากฏที่ต้องการ (Appearance) เช่น ขุ่น (Cloud) และใส (Clear)
5. ความคงตัว (Stability) ต่อกระบวนการผลิต เช่น ความเค็ม
6. ความคงตัวในการเก็บรักษา เช่น การหดตัวของอาหารประเภทเจลเมื่อตั้งทิ้งไว้ (Syneresis) และการแช่เยือกแข็ง (Freeze)

แซนแทน (Xanthan)

แซนแทนหรือแซนแทนกัม (Xanthan หรือ Xanthan gum) เป็นสารสังเคราะห์จากธรรมชาติ สกัดได้จากเมือกผ่านกระบวนการหมักของแบคทีเรียชนิด *Xanthomonas* เช่น *Xanthomonas campestris*, *Xanthomonas pelargonii* เป็นต้น มีคุณสมบัติที่สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ มีความคงตัวต่อความร้อนและ pH และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งโมเลกุลของแซนแทนกัมเป็นแบบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภทเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) โดยโครงสร้างของแซนแทนกัมจะมี เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสายโซ่หลักและมีไตรแซ็กคาไรด์เป็นสายโซ่รอง ประกอบด้วยแมนโทส (Mantose) กรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) และกลูโคส (Glucose) โดยแซนแทนมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) (Xu et al., 2014; Habibi, & Khosravi, 2017) สูตรโมเลกุลของแซนแทนกัมคือ $C_{35}H_{49}O_{29}$ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 933 g/mol และมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา (Branching) สายโซ่หลักของแซนแทนจะประกอบด้วย β -1,4-glucan และทุก ๆ สองตำแหน่งของกลูโคสบนสายโซ่หลักจะต่อกับ α -D-mannose-(2 \rightarrow 1)- β -glucuronic acid-(4 \rightarrow 1)- β -D-mannose (Bilanovic et al., 2016; Kool et al., 2013)



ภาพ 9 โครงสร้างของแซนแทนกัม (Xanthan gum)

ที่มา: Erten et al., 2014

รีโวลยี (Rheology)

รีโวลยีเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล (Flow) และการเสียรูป (Deformation) ของวัสดุภายใต้การกระทำของแรงวัสดุ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) และวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) โดยของแข็งเป็นวัสดุที่มีการเสียรูปร่างแปรผันตามแรงกระทำ (Force) วัสดุประเภทนี้จะมีค่าความเค้นแปรผันตรงกับความเครียด เมื่อไม่มีแรงกระทำวัสดุสามารถคืนรูปกลับมาสู่ร่างเดิมได้ ตัวอย่างของวัสดุประเภทนี้ได้แก่ สปริง เป็นต้น วัสดุประเภทของเหลวเมื่อให้แรงกระทำวัสดุจะเกิดการไหล และเมื่อหยุดให้แรงกระทำวัสดุไม่สามารถคืนกลับสู่รูปเดิมได้ เช่น การให้แรงกระทำกับน้ำเพื่อให้เกิดการไหล เมื่อหยุดให้แรงน้ำจะไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ ส่วนวัสดุที่มีสมบัติวิสโคอิลาสติก นั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติกึ่งของแข็งและของเหลว เมื่อให้แรงกระทำแก่วัสดุประเภทนี้ วัสดุจะเสียรูปเช่นเดียวกับของเหลวแต่เมื่อยกเลิกแรงกระทำจะเกิดการคืนรูปเช่นเดียวกับของแข็ง แต่การคืนรูปไม่สามารถกลับคืนเหมือนเดิม

การทดสอบคุณลักษณะทางรีโอโลยี สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการทดสอบได้ 2 ประเภท คือ

1. การทดสอบประเภท Stationary tests เช่น การทดสอบแบบหมุน (Rotational test) สามารถหาค่าความหนืด ค่า Yield stress ค่า Thixotropy และค่า Normal force เป็นต้น ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการควบคุมคุณภาพอาหาร ประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิต

2. การทดสอบประเภท Dynamic tests เช่น การทดสอบแบบสั่น (Oscillatory test) ค่าตัวแปรของสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameters) ได้แก่ ค่าโมดูลัสสะสม (Storage modulus, G') และค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') ในการทดสอบแบบ Dynamic test จะมีการทดสอบความเหมาะสมของช่วงความถี่ที่ใช้ในการทดลอง โดยให้ค่าความเค้นหรือค่าความเครียดแก่อตัวอย่าง ซึ่งจะเรียกว่า Stress sweep หรือ Strain sweep ถ้าพบว่าค่าโมดูลัสสะสมและค่าโมดูลัสสูญเสียแปรผันตามความถี่ จะเรียกช่วงความถี่นี้ว่า Linear viscoelastic range หรือช่วง LVR (Tabilo, & Barbosa, 2005) โดยศาสตร์ทางรีโอโลยีต้องมีการอาศัยความรู้เบื้องต้นทางฟิสิกส์เกี่ยวกับแรงและพฤติกรรมวัสดุ (แดนชัย เครื่องเงิน, 2558) ดังนี้

2.1 ความเค้น (Stress: σ) หมายถึงค่าแรง (Force: F) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) ต่อพื้นที่ที่แรงนั้นมากระทำบนระนาบ (Area: A) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = F/A$$

หน่วยของความเค้นเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปาสคาล (Pa)

2.2 ความเครียด (Strain: γ) คืออัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไป (ΔL) ต่อความยาวเริ่มต้น (L_0) เมื่อมีการให้ความเค้นต่อวัสดุซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\gamma = \Delta L / L_0$$

2.3 ความหนืด (Viscosity: μ) คือแรงต้านการไหลของของไหล นิยามได้จาก

$$\mu = \tau / \dot{\epsilon}^0$$

เมื่อ μ คือ ความหนืด มีหน่วยเป็น $N \cdot sec / m^2$

τ คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น N / m^2

ϵ^0 คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น sec^{-1} โดย $\epsilon^0 = \epsilon/T$

2.4 โมดูลัส (Modulus) คือค่าคงที่ของวัสดุที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จากกฎของฮุค (Hooke's law) ค่าโมดูลัสเป็นค่าที่บ่งบอกความยืดหยุ่นของวัสดุโดยมีสมการเป็น

$$\sigma = E\gamma$$

เมื่อ E คือ Elastic modulus มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa)

รูปแบบพฤติกรรมไหล

ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 แบบ (สายัณห์ และวิรัตน์, 2549)

1. Newtonian Fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือความเร็วในการกวน เช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น

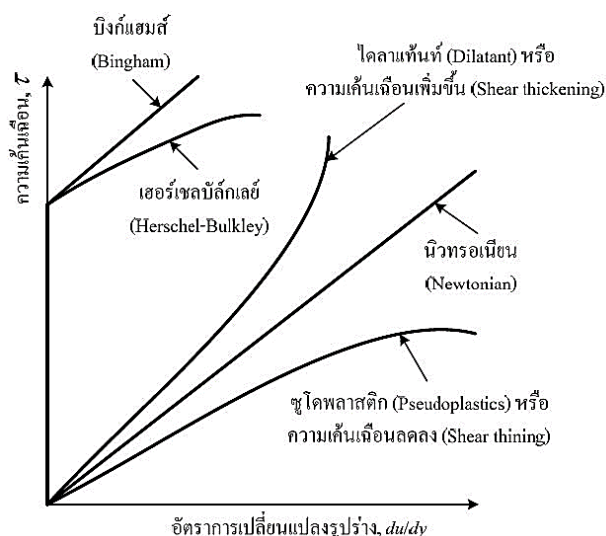
2. Non-Newtonian Fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คืออุณหภูมิหนึ่ง ของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบ

2.1 Pseudoplastic คือ พฤติกรรมของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “shear thinning” เช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ และสารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

2.2 Dilatant คือ พฤติกรรมของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “shear thickening” เช่น น้ำดินชั้น และน้ำแป้ง เป็นต้น

2.3 Bingham Plastic คือ พฤติกรรมของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอจึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบ Newtonian Fluid เช่น ยาสีฟัน และนมช็อกโกแลต เป็นต้น

2.4 Plastic คือ พฤติกรรมของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุด yield stress ถึงจะเริ่มไหลได้ และจะไหลแบบ Pseudoplastic หรือตามโมเดลของ Herschel-Buckley เช่น ซอสมะเขือเทศ สี ดินเหนียว และมายองเนส เป็นต้น



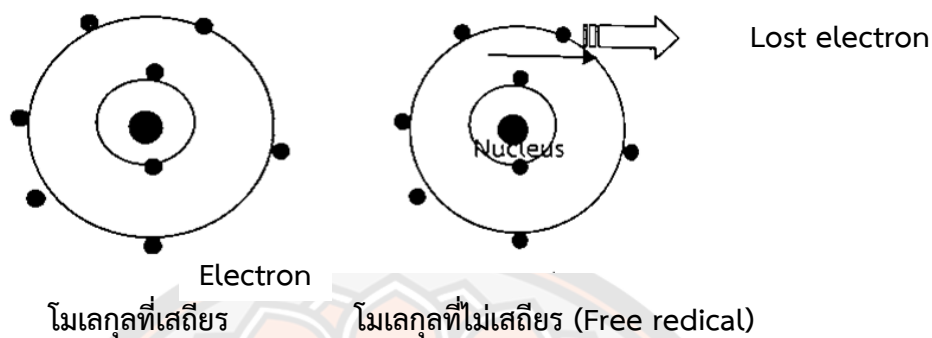
ภาพ 10 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว

ที่มา: ชาญยุทธ์, 2562

อนุมูลอิสระ (Free radical)

อนุมูลอิสระ คืออะตอมโมเลกุลหรือสารประกอบที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ในออร์บิทัลวงนอกสุดที่มีระดับพลังงานสูง อนุมูลอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอนุมูลอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เนื่องจากอิเล็กตรอนเดี่ยวจะไม่เสถียรและพยายามจับคู่กับอิเล็กตรอนเดี่ยวอื่น ดังนั้นอนุมูลอิสระจึงมีคุณสมบัติเฉพาะ คือ มีความไวสูงในการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น ๆ (โอภา วัชรคุปต์, 2549) โดยอนุมูลอิสระเกิดขึ้นเมื่อพันธะระหว่างอะตอมแตกออกและมีอิเล็กตรอนเดี่ยวคงเหลืออยู่ในอะตอมอนุมูล ดังภาพ 11 (อนุชิตา มุ่งงาม, 2555) ซึ่งในการเกิดอนุมูลอิสระเริ่มต้นจากโมเลกุลที่เป็นสารตั้งต้นได้รับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลที่เป็นสารรีดิวซิง (Reducing agent) ความร้อน แสง หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาของเอนไซม์บางชนิดที่กระตุ้นให้สารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นอนุมูลอิสระ โดยทั่วไปโมเลกุลภายในร่างกายจะมีอิเล็กตรอนอยู่วงนอกเป็นเลขคู่ทำให้โมเลกุลนั้นคงตัว แต่หากมีการสูญเสียอิเล็กตรอนหรือรับอิเล็กตรอนมาอีกเพียง 1 ตัว จะส่งผลให้โมเลกุลนั้นไม่คงตัว เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระจึงมีผลทำลายสมดุลของระบบต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น ทำลายหน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้โปรตีนต่าง ๆ ในร่างกายไม่สามารถทำงานได้ปกติ ดึงอิเล็กตรอนจากดีเอ็นเอทำให้ทำลายหรือสูญเสียหน้าที่ เป็นเหตุของการเกิดขึ้นของเซลล์มะเร็ง ก่อให้เกิดอันตรายและความเสียหายต่อร่างกายอันนำไปสู่ภาวะการเกิดพยาธิสภาพของโรคได้ หรือทำให้เซลล์ผิดปกติ เช่น โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคเกี่ยวกับภูมิคุ้มกันผิดปกติ โรคข้ออักเสบ

โรคแก่ก่อนวัย โรคต่อกระดูก โรคอัลไซเมอร์ และโรคพาร์กินสัน เป็นต้น (นวลศรี รักอริยะธรรม, และอัญญา เจนวิถีสุข, 2545)



ภาพ 11 การเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจน

ที่มา: อนุชิตา มุ่งงาม, 2555

ตาราง 7 อนุมูลอิสระและสารที่เกี่ยวข้อง

อนุมูลอิสระ	สารที่เกี่ยวข้อง
Reactive oxygen species (ROS)	
Superoxide, Superoxide anion $O_2^{\bullet -}$	H_2O_2 Ozone O_3
Hydroxyl, $\bullet OH$	Hypobromous acid, HOBr
Hydroperoxyl, HO_2^{\bullet}	Hypochlorous acid, HOCl
Peroxyl, RO_2^{\bullet}	Singlet oxygen ($O_2^1\Delta g$)
Alkoxy, RO^{\bullet}	Organic peroxides, ROOH
Carbonate, $CO_3^{\bullet -}$	Peroxynitrite, ONOO $^-$
Carbon dioxide, $CO_2^{\bullet -}$	Peroxynitrous acid, ONOOH
Reactive nitrogen species (RNS)	
Nitric oxide, NO^{\bullet}	Nitrous acid, HNO_2
Nitrogen dioxide, NO_2^{\bullet} $NO_2^{\bullet -}$	Nitrosyl cation, NO^+ Nitrosyl anion, NO^-

ที่มา: โอภา วัชระคุปต์, 2549

ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง 3 ชนิด (Slater, 1984) ดังนี้

1. การดึงอะตอม (Atom abstraction) ปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องกับการการดึงไฮโดรเจนอะตอมจากสารอื่นโดยอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นกลไกที่เกิดมากที่สุดในช่วง propagation ในปฏิกิริยาลูกโซ่
2. การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transfer) เป็นกลไกที่สำคัญของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในสิ่งมีชีวิต โดยการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากอนุมูลอิสระที่เป็นกลางหรือประจุลบให้โมเลกุลที่ไม่ใช่อนุมูลอิสระ (Non-radical molecule)
3. การเติมอนุมูลอิสระ (Radical addition) เป็นการเติมกลุ่มอนุมูลอิสระเข้าไปในโมเลกุลต่าง ๆ ดังตาราง 8

ตาราง 8 ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ

สมการปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ		
1. Atom abstraction	$A^\bullet + RH \longrightarrow AH + R^\bullet$	
	$CH_3CH_2^\bullet + CH_3CH_2^\bullet \longrightarrow CH_3CH_3 + CH_2=CH_2$	
2. electron transfer	$X^\bullet + Y \longrightarrow X + Y^\bullet$	
3. radical addition	$X^\bullet + RCH=CHR \longrightarrow XRCH-CHR^\bullet$	
หรือ	$T^\bullet + T^\bullet \longrightarrow T_2 \text{ (termination)}$	

ที่มา: อนุชิตา มุ่งงาม, 2555

สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants)

สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) ทำหน้าที่ยับยั้งหรือต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือขจัดอนุมูลอิสระ เป็นสารที่มีสมบัติในการยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ ซึ่งในร่างกายของสิ่งมีชีวิตนั้นจะมีระบบป้องกันการถูกทำลายของเซลล์และเนื้อเยื่อจากอนุมูลอิสระอยู่แล้วซึ่งประกอบไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหลากหลายชนิดที่ทำหน้าที่แตกต่างกันไป เช่น เอนไซม์หรือสารประกอบและสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดยังทำหน้าที่ซ่อมแซมเซลล์ต่าง ๆ ที่ถูกทำลายโดยอนุมูลอิสระด้วย โดยปกติร่างกายมนุษย์สามารถผลิตสารต้านอนุมูลอิสระได้เอง แต่อย่างไรก็ตามสารต้านอนุมูลอิสระที่มีในร่างกายอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการในบางครั้งและในแต่ละคน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องได้รับจากภายนอกซึ่งสามารถได้รับจากอาหารโดยเฉพาะผักและผลไม้ที่เป็นแหล่งของวิตามินต่าง ๆ เช่น วิตามินซี (Ascorbic acid) วิตามินเอ (Retinoids) วิตามินอี (Tocopherols และ Tocotrienols) แครอทีนอยด์ (Carotenoids) นอกจากนี้ยังมีสารในกลุ่มโพลีฟีนอล (Polyphenols)

เช่น ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) เป็นต้น (อนุชิตา มุ่งงาม, 2555) โดยทั่วไปสารต้านอนุมูลอิสระแบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ (อัญชนา เจนวิถิ, 2554) ดังนี้

1. Primary antioxidant ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) ทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระในปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน และรวมถึงสารโทโคฟีรอลธรรมชาติและสังเคราะห์ (Natural synthetic tocopherol) aljyl gallate BHA BHT TBHQ และอื่น ๆ ซึ่งสารกลุ่มนี้ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน

2. Oxygen scavenger ได้แก่ กรดแอสคอร์บิกหรือวิตามินซี เป็นต้น สารในกลุ่มนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จึงเป็นการช่วยกำจัดออกซิเจนในระบบปิดได้

3. Secondary antioxidant ได้แก่ Dilauryl thiopropionate และ Thiopropionic acid ทำหน้าที่สลายโมเลกุลของ Lipid hydroperoxide ให้เป็นสารที่มีความเสถียร

4. Enzymic antioxidant ได้แก่ เอนไซม์ต่าง ๆ ซึ่งแบ่งเป็น Primary antioxidant enzyme และ Auxiliary antioxidant enzyme สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่กำจัดออกซิเจนหรืออนุพันธ์ของออกซิเจน โดยเฉพาะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

5. Chelating agent หรือ Sequestant เช่น กรดซิตริกและกรดอะมิโน เป็นต้น สารในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ไปจับกับไอออนของโลหะ เช่น เหล็กและทองแดง ซึ่งไอออนเหล่านี้เป็นไอออนที่ส่งเสริมและเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียร

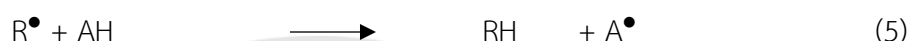
หลักการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ

หลักการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระโดยจะจับกับอนุมูลอิสระ เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนี้

1. การลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น สารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มนี้ตัวอย่างเช่นเอนไซม์แคตาเลส กลูต้าไทโอน และเปอร์ออกซิเดส ซึ่งทำให้เปอร์ออกไซด์แตกตัวและมีปริมาณลดลง โดยการเปลี่ยนไปเป็นแอลกอฮอล์ ดังสมการที่ 1 หรือเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ เปอร์ออกไซด์ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัว ดังสมการที่ 2



2. การยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ สารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มนี้ตัวอย่าง เช่น สารประกอบฟีนอลหรือวงแหวนเอมีน (Aromatic amins) โดยสารประกอบฟีนอลจะให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นแบบลูกโซ่หยุดชะงักไปด้วย ดังสมการที่ 3-5



เมื่ออนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระ (AH) ที่เติมลงไป จะเหลืออนุมูลอิสระของสารต้านอนุมูลอิสระ (A^\bullet) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุมูลอิสระ และจะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบคงตัว ดังสมการที่ 6-7 (ญาติกา โยธา, 2552)



การวัดกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants capacity)

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในธรรมชาติมีหลายชนิด ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญในการทำลายสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์และทำให้เกิดโรคต่าง ๆ อนุมูลที่สำคัญ เช่น Superoxide radical, Hydroxyl radical และสารอัลดีไฮด์ต่าง ๆ ที่เกิดจากกระบวนการ Lipid peroxidation เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการทดสอบความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการยับยั้งอนุมูลอิสระต่าง ๆ เกิดขึ้นหลายวิธี โดยยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. วิธี Ferric Reducing Ability Power (FRAP) Assay

เป็นการวัดความสามารถในการรีดิวซ์โดยใช้สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กเฟอร์ริก Fe^{3+} -TPTZ (ferric tripyridyltriazine) เป็นสารถูกรีดิวซ์ โดยอาศัยหลักการที่สารต้านอนุมูลอิสระให้อิเล็กตรอนกับอนุมูลอิสระ คือ อะตอมของเหล็กใน Fe^{3+} -TPTZ จะถูกรีดิวซ์โดยสารต้านอนุมูลอิสระ ได้สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กเฟอร์รัส Fe^{2+} -TPTZ ที่มีสีน้ำเงิน มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร (Dande et al., 2009) ซึ่งในการคำนวณค่า activity จะได้จากกราฟมาตรฐานของ L-ascorbic acid แสดงค่าเป็น ascorbic acid equivalents (AAE)/mg dry weight (Dande., 2009)

ข้อดี เป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และราคาสารเคมีไม่แพง ทั้งนี้ยังให้ผลดีกับสารประกอบพวกฟีนอล

ข้อเสีย ค่าความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถวัดได้อาจมากกว่าค่าจริง (สมนึก ยิ้มย่อง, 2553)

2. วิธี DPPH radical scavenging

เป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดอนุมูล DPPH[•] ของสารตัวอย่าง (Antioxidant) โดยใช้ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl หรือ DPPH เป็นอนุมูล ซึ่งเป็นสารอินทรีย์มีลักษณะเป็นผลึกสีเข้ม เมื่อละลายด้วยเมทานอล หรือเอทานอล จะได้สารละลายที่มีสีม่วง และเป็นอนุมูลที่เสถียร โดยสารแอนติออกซิแดนท์จะทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูล DPPH[•] จากเดิมสารละลายที่เป็นสีม่วงจะเกิดการฟอกสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเหลือง ทำให้อนุมูล DPPH[•] หดสภาพไป ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร (Dasgupta & De, 2004) ค่าที่วัดได้จะแสดงถึงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระออกมาเป็น ร้อยละการยับยั้ง หรือ scavenging activity (%) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการยับยั้ง} = \frac{(A_{517} \text{ control} - A_{517} \text{ test sample}) \times 100}{(A_{517} \text{ control})}$$

ข้อดี สามารถใช้ในการวัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้กว้าง ทำได้ง่าย

ข้อเสีย DPPH[•] มีความคงตัวสูง ทำให้มีความไวต่ำต่อการทำปฏิกิริยา ซึ่งต่างจากอนุมูลภายในเซลล์ หรือในร่างกายซึ่งมีความไวมากกว่า (อนุชิตา มุ่งงาม, 2555)

3. วิธี Scavenging activity of ABTS radical

เป็นการวัดกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระทางอ้อมโดยอาศัยกลไกการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปรีดิวซ์สารอื่น ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS^{•+} [2,2'-azino-bis-(3-ethylbenz-thiazoline-6-sulphonate radical cation)] ทำการทดลองโดยใช้สาร ABTS [2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] เป็นอนุมูล ด้วยการให้ถูกออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate; K₂H₂O₈) ให้กลายเป็นอนุมูล ABTS^{•+} ที่มีสีฟ้าเขียว มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660, 734 และ 840 นาโนเมตร ส่วนใหญ่นิยมที่ 734 นาโนเมตร ซึ่งฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับความสามารถในการขจัดอนุมูล ABTS^{•+} ของตัวอย่างที่ทดสอบ เช่น ในการเติมสารทดสอบที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระลงไป จะทำให้สีของ ABTS^{•+}

จางลง โดยค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้จะนำไปคำนวณเป็นร้อยละการยับยั้ง (% inhibition) (โอภา วัชรคุปต์, 2549) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการยับยั้ง} = \frac{(A734 \text{ control} - A734 \text{ test sample}) \times 100}{(\text{Absorbance } 734 \text{ control})}$$

ข้อดี สามารถวิเคราะห์ได้ใน pH ช่วงกว้าง ทำได้ง่าย ปฏิกริยาเกิดขึ้นเร็วภายในเวลา 30 นาที และอนุมูล ABTS^{•+} ยังสามารถละลายได้ทั้งในน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์ ทำให้สามารถวิเคราะห์การต้านออกซิเดชันของสารได้อย่างกว้างขวาง

ข้อเสีย การวิเคราะห์แบบ *in vitro* ด้วยวิธีนี้อาจจะไม่แสดงฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่แท้จริงทั้งหมด เนื่องจาก ABTS เป็นสารที่ไม่ได้เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระในร่างกาย (อนุชิตา มุ่งงาม, 2555)

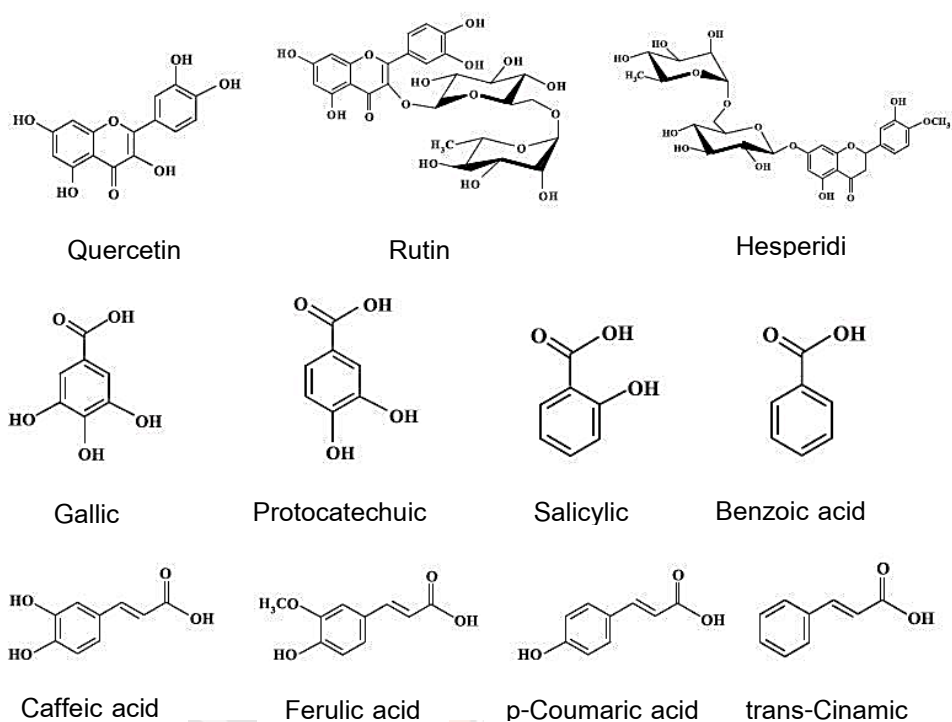
สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds)

สารประกอบฟีนอลิกจัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้รับจากภายนอกและพบได้มากในธรรมชาติอันได้แก่พืชผัก ผลไม้ ชาเขียว ชาดำ ช็อกโกแลต และไวน์แดง เป็นต้น สารต้านอนุมูลอิสระที่พบมากในพืช ได้แก่จำพวกกรดฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์ไปจนถึงโครงสร้างโพลีเมอร์ที่ซับซ้อน เช่น ลิกนิน เมลานิน และแทนนิน เป็นต้น สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญเนื่องจากมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบ ต้านการแพ้ และมีคุณสมบัติในการสลายลิ้มเล็ดรวมไปถึงการเป็นสารต้านการก่อมะเร็ง และลดความดันโลหิต เป็นต้น ซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้แล้วสารประกอบฟีนอลิกในพืชถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและช่วยป้องกันเชื้อโรคหรือแมลงศัตรูที่เข้าไปทำลายเซลล์ต่าง ๆ ของพืช รวมถึงการให้สีสัมผัสกับพืชด้วย และยังเกี่ยวข้องกับคุณภาพของอาหาร เช่น การให้คุณภาพด้านประสาทสัมผัสของผัก ผลไม้ ให้สี กลิ่น และรสชาติ ซึ่งประกอบไปด้วยรสฝาด (Astringency) และรสขม (Bitter) (รวินิภา ศรีมูล, และศิริจันทร์ ตาใจ, 2556)

โครงสร้างทางเคมีและประเภทของสารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิกที่พบในธรรมชาติมีหลายประเภท มีลักษณะและสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันไป สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารที่มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) ซึ่งอาจมีจำนวนหนึ่งวง หรือมากกว่า เช่นเดียวกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group; OH) จะมีอย่างน้อยหนึ่งหมู่ หรือมากกว่า จึงจัดเป็นอนุพันธ์ของฟีนอล เรียกรวม ๆ ว่า “สารประกอบฟีนอล”

หรือ “สารประกอบฟีนอลิก” หรือ “สารโพลีฟีนอล” คุณสมบัติทั่วไปของสารประกอบฟีนอลิก คือ ละลายในน้ำได้เล็กน้อยและสามารถละลายได้ดีในสารอินทรีย์ ซึ่งพืชแต่ละชนิดมีสารประกอบฟีนอลิก ที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปสารประกอบฟีนอลิกถูกแบ่งกว้าง ๆ ได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ กรดฟีนอลิก (Phenolic acid) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) สติลเบินส์ (Stilbenes) คูมารินส์ (Coumarins) และ แทนนิน (Tannins) ซึ่งกลุ่มใหญ่ที่สุดที่พบในพืช คือ สารประกอบพวกฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) (อนุชิตา มุ่งงาม, 2555)



ภาพ 12 โครงสร้างทางเคมีพื้นฐานของสารประกอบฟีนอลิก

ที่มา: Wang et al., 2019

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิก

กลไกในการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกนั้นมีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งฤทธิ์ในการละลายน้ำและฤทธิ์ในไขมัน โดยกลไกหลักในการออกฤทธิ์ของสารกลุ่มนี้มี 3 กลไก ดังนี้

1. เป็นสารคีเลต (Chelating agent) โดยเฉพาะสารโพลีฟีนอลที่มีโครงสร้างเป็นออร์โธไดไฮดรอกซีฟีนอลิก ทำหน้าที่จับกับพันธะไอออนิกกับโลหะหนัก เช่น ทองแดง และเหล็ก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระ รวมทั้งปฏิกิริยาลูกลูโซ

2. เป็นสารต้านอนุมูลอิสระโดยหยุดปฏิกิริยาลูกลูโซ (Chain breaking antioxidant) ในการยับยั้งหรือการขจัดอนุมูลอิสระ เช่น Lipid alkoxyl และ Peroxyl radicals เป็นต้น โดยทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลเหล่านี้ หลังจากที่ถูกออกซิไดซ์แล้วจะได้อนุมูลของฟลาโวนอยด์ และอนุมูลที่ได้นี้มีความเสถียรมากกว่า เนื่องจากโครงสร้างของฟลาโวนอยด์มีการ Delocalize ของอิเล็กตรอนตลอดเวลา ดังนั้นการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของฟลาโวนอยด์ที่มีโครงสร้างที่เกิดการ Delocalize ของอิเล็กตรอนจะมีฤทธิ์ดีกว่า

3. สารประกอบฟีนอลิกสามารถทำหน้าที่ช่วยให้วิตามินอีคืนสภาพ (Vitamin E regeneration) โดยไปรีดิวซ์อนุมูล α -tocopheryl หรืออนุมูลในรูปอื่น ๆ ของวิตามินอีให้กลับไปเป็นโทโคเฟอรอลที่สามารถทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระได้ดั้งเดิม (ปรีชา บุญจุง, 2549)

ประโยชน์ของสารประกอบฟีนอลิก

จากการรายงานของ เนตรนภา เมยกลาง, และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย (2557) ได้สรุปบทบาทสำคัญของสารประกอบ ฟีนอลิกไว้ดังนี้

1. ป้องกันการเกิดเนื้องอก ที่อาจจะพัฒนาเป็นมะเร็งด้วยคุณสมบัติต่อต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิก

2. ป้องกันโรคหัวใจและเส้นโลหิตแตกในสมอง เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิก ช่วยลดระดับแอลดีแอลคอเลสเตอรอล (Low density lipoprotein; LDL cholesterol) และไตรกลีเซอไรด์ แต่ช่วยเพิ่มระดับเอชดีแอลคอเลสเตอรอล (High density lipoprotein; HDL cholesterol) ซึ่งเป็นคอเลสเตอรอลที่ช่วยกำจัดเกล็ดเลือด (Platelet) ที่เกาะตามผนังเส้นเลือดใหญ่

3. ลดความดันโลหิต สาเหตุที่เกิดความดันโลหิตสูงเพราะไตหลังเอนไซม์ที่มีชื่อว่า Angiotension conveting enzyme (ACE) โดยสารประกอบฟีนอลิกจะไปช่วยยับยั้งการหลั่งเอนไซม์ดังกล่าว

4. ลดระดับน้ำตาลในเลือด สารประกอบฟีนอลิกสามารถช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ที่ทำหน้าที่เร่งการย่อยโมเลกุลจากแป้งไปเป็นน้ำตาล

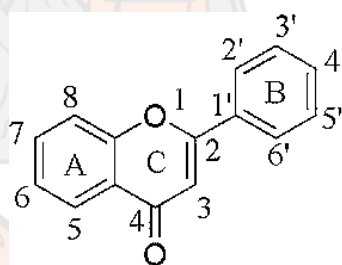
5. ต่อด้านอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในสมอง โดยสารประกอบฟีนอลิกอาจช่วยป้องกันโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease) โดยรวมกับโลหะที่กระตุ้นให้เกิดการสะสม Amyloid beta

peptide ได้แก่ เหล็ก ทองแดง และสังกะสี นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลิกยังอาจช่วยป้องกันโรคพาร์กินสัน (Parkinson's disease) ได้ด้วย แต่ยังต้องการข้อมูลที่ลึกมาสนับสนุน

6. ช่วยต่อต้านเชื้อแบคทีเรียและไวรัส
7. ช่วยลดอาการอักเสบต่าง ๆ
8. ช่วยชะลอความเสื่อมตามอายุของเซลล์ในร่างกาย เพราะสารประกอบฟีนอลิกมีคุณสมบัติต่อต้านอนุมูลอิสระ (ญาติกา โยธา, 2552)

ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid)

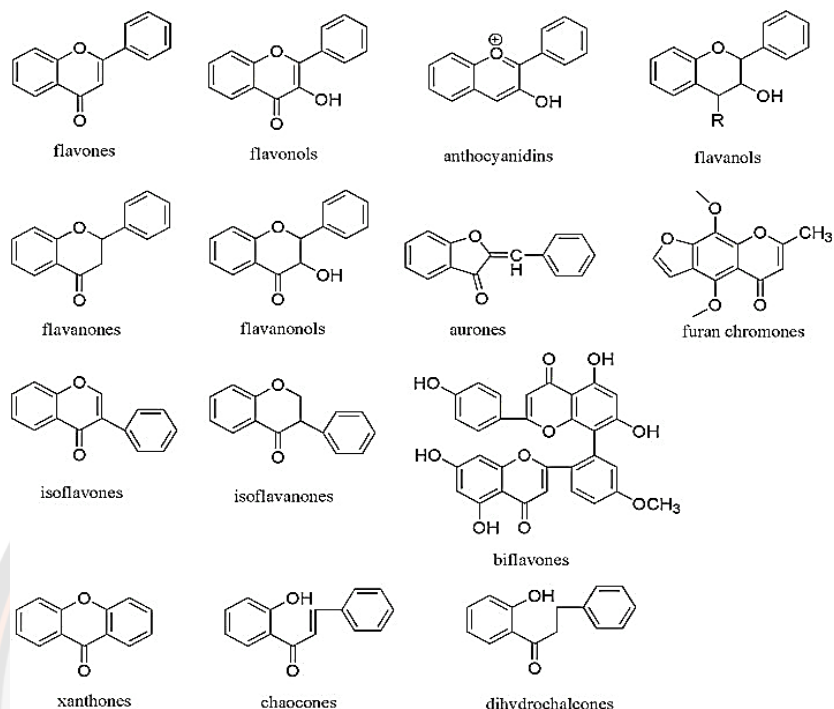
สารฟลาโวนอยด์เป็นสารสำคัญของกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก พบได้ทั่วไปในทุกส่วนของพืช ไม่ว่าจะเป็นใบ ราก เนื้อไม้ เปลือก ต้น ดอก ผล หรือเมล็ด มีสูตรโครงสร้างเคมีพื้นฐานเป็นฟลาเวน (Flavan) หรือ 2-ฟีนิลเบนโซไพแรน (2-phenylbenzopyran) ประกอบด้วยคาร์บอน 15 อะตอม เรียงกันเป็นระบบ $C_6-C_3-C_6$ โดยมีวงเบนซีน 2 วงจับกันด้วยคาร์บอน 3 อะตอม ซึ่งอาจจัดเรียงเกิดเป็นวงที่ 3 ทำให้โครงสร้างและที่ได้เหมือนโครงสร้างหลักของวิตามินอีที่เป็นโครงสร้างแบบโครแมน (Chroman) หรือเบนโซไพแรน (Benzopyran) (ปรีชา บุญจุง, 2549) ดังภาพ 13 และ 14



ภาพ 13 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์

ที่มา: Wang et al., 2018

ประเภทของฟลาโวนอยด์



ภาพ 14 โครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอยด์แต่ละชนิด

ที่มา: Wang et al., 2018

ฟลาโวนอยด์สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ๆ ได้อีกหลายกลุ่มตามความแตกต่างของสูตรโครงสร้าง ฟลาโวนอยด์ที่พบในธรรมชาติมักอยู่ในรูปไกลโคไซด์ คือมีน้ำตาลเข้ามาจับในโมเลกุล ทำให้สามารถละลายน้ำได้ดี แต่ถ้าหากหมู่ไฮดรอกซิลของฟลาโวนอยด์ถูกเติมด้วยหมู่เมทิลได้เป็นเมทอกซิล (CH_3O) จะทำให้ฟลาโวนอยด์ละลายได้ในไขมัน ตัวอย่างฟลาโวนอยด์ที่พบในธรรมชาติที่นิยมบริโภคทั่วไป เช่น

1. ฟลาโวน (Flavones) หรือ 2-ฟีนิลเบนโซไพโรน (2-phenylBenzopyrone) ในโมเลกุลมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ฟลาโวนเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี ตัวอย่างเช่น อะจิปินิน (Agipenin) ลูเตโอลิน (Luteolin) และไตรเซติน (Tricetin)
2. ฟลาโวนอล (Flavonols) เกิดจากการที่สารประกอบฟลาโวนมีการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3 ตัวอย่างของฟลาโวนอล ได้แก่ เคอร์ซีติน (Quercetin หรือ 3, 5, 7, 3', 4' pentahydroxyflavone) แคมพ์ฟีรอล (Kaempferol) และไมริซีติน (Myricetin)

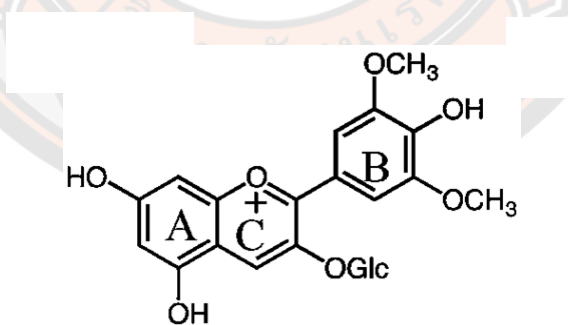
อะไกลโคโคนที่เป็นอนุพันธ์ของฟลาโวนและฟลาโวนอลที่ทราบโครงสร้างมีอีกประมาณ 60 ชนิด ซึ่งจะแตกต่างกันที่หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เมทอกซิล

3. ฟลาวาโนน (Flavanones) มีสูตรโครงสร้างคล้ายฟลาโวนแต่พันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 เป็นพันธะเดี่ยว ฟลาวาโนนเป็นฟลาโวนอยด์ที่พบในผลไม้ตระกูลส้ม ตัวอย่างของไกลโคไซด์ เช่น เฮสเพอริดีน (Hesperidin) และนารินจิน (Naringin) ที่พีเอชเป็นด่าง (pH 12) วงแหวนที่อยู่ภายในโมเลกุลของเฮสเพอริดีนจะเปิดออกได้เป็นซาลโคน (Chalcone) เหมือนการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ซาลโคนจะให้สีเหลืองถึงสีน้ำตาล

4. ฟลาวาโนนอล (Flavanonols) มีสูตรโครงสร้างคล้ายฟลาโวนแต่มีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3

5. ไอโซฟลาโวน (Isoflavones) มีสูตรโครงสร้างเช่นเดียวกับฟลาโวน แต่วงแหวนฟีนิลอยู่ที่ตำแหน่ง 3 เป็น 3-ฟีนิลเบนโซไพโรน (3-phenylbenzopyrone) (ปรีชา บุญจุง, 2549)

6. แอนโทไซยานินและแอนโทไซยานิดิน (Anthocyanins and Anthocyanidins) เป็นรงควัตถุ (Pigment) ที่ละลายน้ำได้และให้สีส้มต่าง ๆ ในผัก ผลไม้ และดอกไม้ มีตั้งแต่สีน้ำเงิน สีม่วง สีชมพูไปจนถึงสีแดงสด เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีสีแดงที่ pH ต่ำ ให้สีน้ำเงินที่สภาวะเป็นกลางและไม่มีสีที่ pH สูง โดยมีโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานเป็น Flavylium ion หรือ 2-phenylbenzopyrylium ดังภาพที่ 15 พบได้ในพืชทั่วไป เช่น Cyanidin, Peonidin, Delphinidin, Petunidin และ Malvidin เป็นต้น (อนุชิตา มุ่งงาม, 2555)

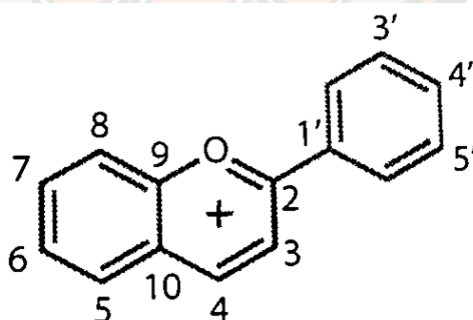


ภาพ 15 โครงสร้างทางเคมีของฟลาวิเลียมไอออน (Flavylium ion; AH⁺)

ที่มา: Nuno, & Fernando, 2016

การเกิดและโครงสร้างของแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินประกอบด้วยส่วนของอะไกลโคน (Alycone) น้ำตาล (Sugar) และหมู่เอซิล (Acyl group) (Anderson, & Markham, 2006) ซึ่งถ้าไม่มีกรดเป็นองค์ประกอบ เรียกว่า นอนอะซิเลตเทตแอนโทไซยานิน (Non acylated anthocyanin) แต่ถ้ามีกรดเป็นองค์ประกอบจะเรียกว่า อะซิเลตเทตแอนโทไซยานิน (Acylated anthocyanin) โดยเกิดการเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ของกรดกับน้ำตาล กรดที่เกิดพันธะเอสเทอร์กับน้ำตาล เช่น กรดคาแฟอิก (Caffeic acid) กรดคูมาริก (Coumaric acid) และกรดเฟอร์รูริก (Ferulic acid) เป็นต้น การเกิดเอซิเลชัน (Acylation) ในโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะทำให้มีความคงตัวดีขึ้น (อรุษา เขาวนลิขิต, 2554) ในปัจจุบันมีการค้นพบแอนโทไซยานินมากกว่า 300 ชนิด จากสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์กว่า 7,000 ชนิด แม้ว่าแอนโทไซยานินจะมีด้วยกันหลายชนิดแต่ทุกชนิดจะมีโครงสร้างหลักเป็นสารชนิดเดียวกันที่เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (Anthocyanidins) ที่มีคาร์บอน 15 อะตอมอยู่ภายในโมเลกุล แต่ละชนิดจะมีสีส้ม และคุณสมบัติแตกต่างกันไป โดยมีโครงสร้างแบบ C6-C3-C6 ซึ่งเป็นไกลโคไซด์ (Glycoside) ของ 2-phenylbenzopyrylium หรือ Flavylium cation แอนโทไซยานิดินสามารถเกิดได้ประมาณ 20 ชนิด แต่มีอยู่ 6 ชนิดที่พบได้บ่อยในพืชคือ Pelargonidin (Pg) คิดเป็น 18% Cyanidin (Cy) คิดเป็น 30% Delphinidin (Dp) คิดเป็น 22% และ Peonidin (Pn), Petunidin (Pt) และ Malvidin (Mv) คิดเป็น 20% (Anderson and Markham, 2006) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแอนโทไซยานินแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันดังภาพ 16 และตาราง 9 ตามลำดับ ทำให้เกิดสีของแอนโทไซยานิดินที่ต่างกัน การเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลจะทำให้เกิดสีฟ้า (Bluish shade) ส่วนการเพิ่มจำนวนของหมู่ เมทอกซิลจะทำให้เกิดสีแดง (Redness) (Mazza, 2007)



ภาพ 16 โครงสร้างของแอนโทไซยานิดิน

ตาราง 9 การแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่เมทอกซิล (OCH₃) ของวงแหวนฟลาโวลีเนียม

แอนโทไซยานิดิน	การแทนที่						
	3	5	6	7	3'	4'	5'
Pelargonidin (Pg)	OH	OH	H	OH	H	OH	H
Cyanidin (Cy)	OH	OH	H	OH	H	OH	H
Delphinidin (Dp)	OH	OH	H	OH	OH	OH	OH
Peonidin (Pn)	OH	OH	H	OH	OMe	OH	H
Petunidin (Pt)	OH	OH	H	OH	OMe	OH	OH
Malvidin (Mv)	OH	OH	H	OH	OMe	OH	OMe

ที่มา: Skaar, 2012

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีทำให้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง (Nam et al., 2006) สามารถตรวจวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น การวัดความสามารถในการยับยั้งอนุมูลเพอร์รอกซิล ได้แก่ ORAC (Oxygen radical absorbance capacity) การวัดความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระสารอินทรีย์ ได้แก่ DPPH[•] การวัดความสามารถในการรีดิวซ์โลหะ ได้แก่ FRAP เป็นต้น (Miguel, 2011) ซึ่งความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระของแอนโทไซยานินจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐานของแอนโทไซยานิน และจำนวนหรือตำแหน่งของไฮดรอกซิล เมทอกซิลที่อยู่รอบวงแหวน รวมไปถึงหมู่ของน้ำตาลที่จับ และพีเอช เช่น แอนโทไซยานินที่มีไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3' และ 4' (3',4'-dihydroxy group) สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะให้อยู่ในรูปที่เสถียรได้รวดเร็ว และมี pH เท่ากับ 2-4 ซึ่งแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปของ Flavylium cations สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะเช่นเดียวกัน (Sarma et al., 1997) นอกจากนี้จำนวนและตำแหน่งของเมทอกซิลยังมีผลต่อความคงตัวและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นรวมถึงความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระของแอนโทไซยานินอีกด้วย และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระของแอนโทไซยานินบางชนิด พบว่าแอนโทไซยานินชนิด Malvidin-3-glucoside และ Petunidin-3-glucoside มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแอนโทไซยานินชนิด Cyanidin-3-rutinoside และ Delphinidin-3-glucoside (Kahkonen, & Heinonen, 2003; Muselik et al., 2007; Miguel, 2011)

ประโยชน์ของแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานินเป็นสารให้สีธรรมชาติโดยให้สีที่แตกต่างกันตามโครงสร้าง จึงทำให้ออกฤทธิ์ที่ต่างกัน เช่น เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ช่วยต้านอนุมูลอิสระ ลดการอักเสบ เนื่องจากแอนโทไซยานินมีผลช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และกระดูกอ่อน จึงทำให้ลดการเกิดของอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของความผิดปกติในร่างกาย (Changlian et al., 2006) นอกจากนี้แอนโทไซยานินจะมีฤทธิ์ในด้านอนุมูลอิสระสูง (Yang, & Zhai, 2010) แล้วยังมีสรรพคุณทางยารักษาโรคของมนุษย์ เช่น ช่วยลดโอกาสการเกิดมะเร็ง ช่วยต่อต้านไวรัส เสริมภูมิคุ้มกันในร่างกายให้ดีขึ้น และมีฤทธิ์ช่วยสมานแผล (Hagiwara et al., 2001; Zhao et al., 2009) ลดความผิดปกติของไต และลดภาวะแทรกซ้อนทางระบบประสาทเนื่องจากโรคเบาหวาน (Li et al., 2011) ลดคอเลสเตอรอลในเลือดโดยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ช่วยในการขยายหลอดเลือดและกระตุ้นการไหลเวียนของเลือด (Francis, 2002) เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อสี และความเสถียรของแอนโทไซยานิน

ปัจจัยที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแอนโทไซยานิน ได้แก่ โครงสร้าง อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง แสง ออกซิเจน และการรวมตัวกับสารอื่นดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. โครงสร้าง

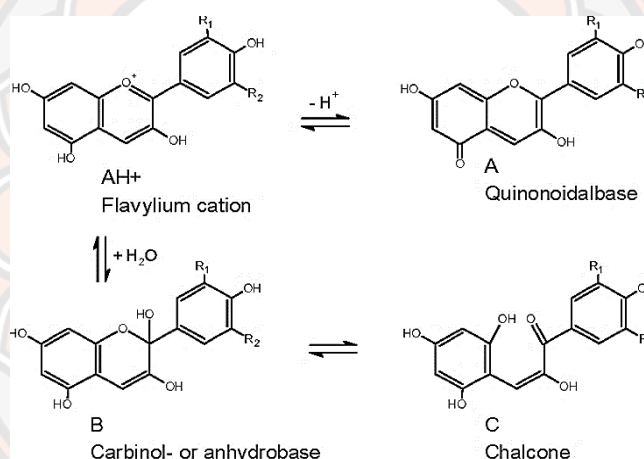
ความเสถียรของแอนโทไซยานินขึ้นอยู่กับธรรมชาติของจำนวนของหมู่น้ำตาลที่ใกล้กับฟลาโวลีียมไอออน และจำนวนของกรดที่เชื่อมต่อกับไกลโคซิลิก และเกี่ยวข้องกับจำนวนและตำแหน่งในการแทนที่ฟลาโวลีียมไอออนของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เมทอกซิล เช่น 3-deoxy anthocyanins ที่มีสีเหลือง เนื่องจากเกิดการดีไฮดรอกซิเลชัน (Dehydroxylation) ของคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ทำให้มีความเสถียรมากกว่า 3-hydroxy anthocyanins ที่มีสีแดงและมีความเสถียรต่ำกว่ามาก (Mercadante, & Bobbio, 2008) นอกจากนี้ในการเพิ่มจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลจะส่งผลให้ความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น และเกิดการเปลี่ยนสีจากสีส้มไปเป็นสีน้ำเงิน-แดง แต่การแทนที่ด้วยหมู่เมทอกซิลจะให้ผลตรงข้ามกัน หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จัดว่ามีความสำคัญ เพราะเป็นจุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีส้มและสีแดง (Sikorski, 2007)

2. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อความเสถียรของแอนโทไซยานิน เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราของแอนโทไซยานินลดลง (Rein, 2005) เนื่องจากการเปิดออกของวงแหวน Pyrylium ในโครงสร้างของแอนโทไซยานิน จึงทำให้ถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซาลโคเน (Chalcone) ซึ่งมีสีเหลืองสดไปจนถึงสีส้ม นอกจากนี้ในการสลายตัวของอะไกลโคเน เป็นขั้นแรกของการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ซึ่งอาจเกิดการสลายตัว เกิดเป็นอนุพันธ์คูมารินหรือเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polimerization) และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ (Patras et al., 2010)

3. ความเป็นกรด-ด่าง

โครงสร้างของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงตามความเป็นกรด-ด่างได้ 4 รูปแบบ คือ Quinonoidal, Flavylium cation, Carbinol หรือ Pseudobase และ cChalcone ดังภาพ 17 เมื่อความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของสีและความเข้มข้นของ Flavylium cation ลดลง ส่งผลให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินเปลี่ยนจากสีแดงในสารละลายที่เป็นกรดไปเป็น Carbinol ซึ่งไม่มีสี และเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นอีกทำให้ Carbinol เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Chalcone ซึ่งไม่มีสี ส่งผลให้เกิดการเปิดออกของวงแหวน (Rien, 2005) สำหรับแอนโทไซยานินที่อยู่ในสารละลายที่มีสมบัติเป็นเบสอ่อน มีความเป็นกรด-ด่างประมาณ 9 แอนโทไซยานินจะให้สีม่วงเข้ม ออกดำ และที่ความเป็นกรด-ด่างมากกว่าหรือเท่ากับ 11 แอนโทไซยานินมีโครงสร้างเป็นแบบ Blue quinoidal ซึ่งมีสีน้ำเงิน (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553)



ภาพ 17 โครงสร้างของแอนโทไซยานินในสารละลายความเป็นกรด-ด่างต่างกัน

ที่มา: Semantic Scholar, 2005

4. แสง

แสงมีผลต่อการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ซึ่งการสลายตัวของแอนโทไซยานินจะเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับแสง ส่งผลให้อิออนเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 5 ในโมเลกุล ทำให้โครงสร้างแอนโทไซยานินเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้แสงยังเป็นตัวเร่งการสลายตัวของแอนโทไซยานินเนื่องจากความร้อน (ยุพาพร ผลาขจรศักดิ์, 2547)

5. ออกซิเจน

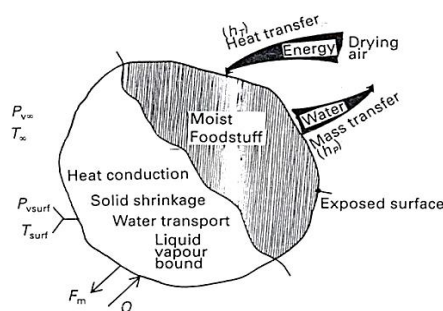
ออกซิเจนมีผลต่อความเสถียรของแอนโทไซยานิน ซึ่งเมื่อก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้พันธะคู่ของวงแหวน Porylium หายไป ส่งผลให้แอนโทไซยานินไม่มีสี และเกิดเป็นอนุพันธ์ของ คูมาริน (กนกรส คงหอม, 2547)

6. การรวมตัวกับสารอื่น

การเกิดปฏิกิริยาของแอนโทไซยานินกับสารประกอบอื่นที่ไม่มีสี ส่งผลให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น โดยสามารถเกิดได้ 4 รูปแบบ คือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแอนโทไซยานินกับสารอื่น (Intermolecular copicmentation) โดยพันธะเคมีที่เกิดขึ้นเป็นพันธะไฮโดรเจน เช่น ฟลาโวนอยด์ อัลคาลอยด์ กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ นิวคลีโอไทด์ และโพลีแซคคาไรด์ การเกิดปฏิกิริยาขึ้นภายในโมเลกุลของแอนโทไซยานิน (Intramolecular copicmentation) โดยพันธะโควาเลนต์ระหว่างส่วนที่เป็นแอนโทไซยานินติดกับกรดอินทรีย์ การเกิดปฏิกิริยาของแอนโทไซยานินกับไอออนของโลหะ (Metal copicmentation) และการเกิดปฏิกิริยาของแอนโทไซยานินด้วยกันในสถานะที่มีความเข้มข้นของแอนโทไซยานินสูง (Self association) ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของแอนโทไซยานินที่อยู่ในรูปของ Flavylium cation และเพิ่มความเสถียรของ Flavylium cation ให้มีสีแดงเข้มขึ้น (Rein, 2005; Castaneda-Ovando et al., 2009)

การทำแห้ง (Dehydration)

การอบแห้งเป็นการลดความชื้นหรือน้ำที่อยู่ในอาหารด้วยการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังอาหาร และการถ่ายเทมวลจากอาหารไปยังอากาศโดยเกิดขึ้นพร้อมกันดังภาพ 18 เพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหยของเหลวภายในอาหาร (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560) เพื่อลดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water Activity; a_w) ซึ่งมีผลต่ออายุการเก็บรักษาของอาหาร การยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และเอนไซม์ นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาตร มีน้ำหนักเบา ลดพื้นที่ในการขนส่ง และเพิ่มทางเลือกของผลิตภัณฑ์แก่ผู้บริโภค (วิไล รังสาดทอง, 2543)

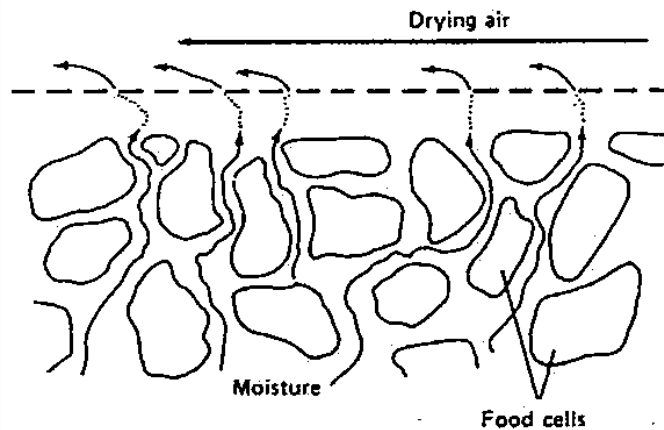


ภาพ 18 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้ง

ที่มา: ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560

กลไกในการทำแห้งอาหาร

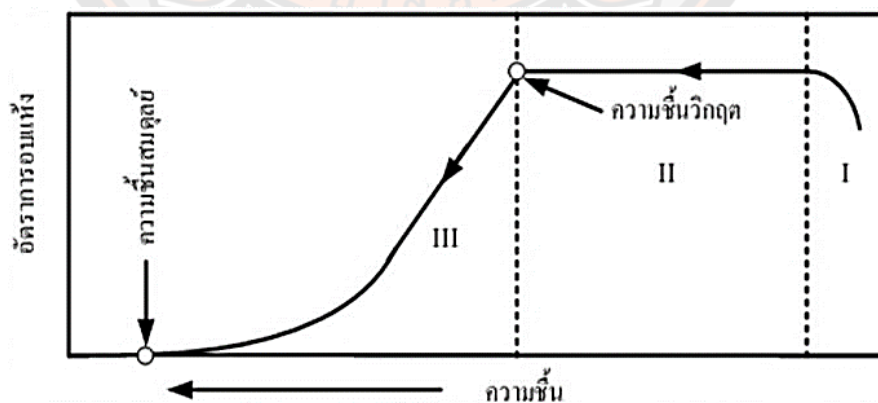
การทำแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นโดยการถ่ายเทความร้อนยังขึ้นอาหารที่ขึ้น เพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหยโดยที่ของเหลวภายในขึ้นอาหารจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวหน้า อาหารเนื่องจากความแตกต่างของไอน้ำในขึ้นอาหารกับอากาศร้อนที่มีความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) และความดันไอ (Partial pressure of vapor) แตกต่างกัน ซึ่งในช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างขึ้นอาหารกับอากาศ จะเกิดขึ้นที่รอบผิวของขึ้นอาหารเท่านั้น ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังขึ้นอาหารโดยการนำความร้อน ผ่านชั้นฟิล์มของอากาศไปยังผิวของอาหาร และเมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดลงมากจะเกิดการถ่ายเท ความร้อนและการถ่ายเทมวลภายในขึ้นอาหารด้วย โดยน้ำที่อยู่ภายในขึ้นอาหารจะเคลื่อนที่มายังผิว ของอาหารในรูปของเหลวหรือไอน้ำ และเกิดการระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศดังภาพที่ 19 ในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในขึ้นอาหารมายังผิวหน้าของอาหารจะช้ากว่าการพาความชื้นจากผิว อาหารไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงที่อุณหภูมิและความชื้นคงที่ เมื่อความชื้นของอาหาร ลดลงจนถึงจุดที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของอาหารจะเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ และ ความดันไอน้ำของน้ำในขึ้นอาหารจะเท่ากับความดันไอของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหย ออกจากขึ้นอาหารได้ เรียกความชื้นในขณะนั้นว่าความชื้นสมดุล ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณน้ำใน อาหารโดยเปรียบเทียบกับมวลขึ้นและแห้งอาหาร สามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ ความชื้น มาตรฐานเปียก และควาพชื้นมาตรฐานแห้ง (อิศเรศ วรธนทร, 2554)



ภาพ 19 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง

ที่มา: วิไล รังสาดทอง, 2543

การอบแห้งอาหารที่มีลักษณะมีรูพรุนส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ซึ่งความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย โดยมีปัจจัยที่สำคัญต่อการอบแห้งคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งในการอบแห้งจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560) ดังภาพ 20



ภาพ 20 พฤติกรรมการอบแห้ง

ที่มา: Brooker et al., 1974

1. ช่วงการเพิ่มขึ้นของความร้อน (Heat up period) ในช่วงแรกจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่ผิวของอาหารที่เปียกขึ้นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิแก่ชิ้นอาหารโดยลมร้อน ซึ่งจะเกิดความสัมพันธ์ระหว่างผิวอาหารกับอากาศ โดยอุณหภูมิของอาหารจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน เวลาที่อุณหภูมิอาหารเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจะเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ

2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period) ยังเป็นช่วงที่เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่บริเวณผิวอาหารที่มีน้ำเกาะอยู่ น้ำจะถูกนำออกด้วยการระเหย โดยอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวอาหารของการอบแห้ง ซึ่งเมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสมดุลกับอัตราการถ่ายเทมวลทำให้อุณหภูมิของผิวอาหารคงที่จนใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period) เป็นช่วงที่น้ำภายในอาหารเคลื่อนที่สู่ผิวนอกอาหารช้าลง ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical Moisture Content) ในการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลในช่วงนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวและภายในชิ้นอาหาร โดยน้ำภายในอาหารจะเคลื่อนที่มายังผิวและถูกระเหยออกไป เมื่อดำเนินการอบแห้งต่อไปอุณหภูมิของอาหารจะสูงขึ้น และสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก

ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

อาหารทั่วไปที่อบแห้งด้วยความร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะมีปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการทำแห้ง (วิเชียร ดวงสีเสน, 2555) ได้แก่

1. ลักษณะทางธรรมชาติของอาหาร ถ้าลักษณะทางธรรมชาติของอาหารไม่เอื้อต่อการเคลื่อนที่ของน้ำภายในอาหาร หรือไม่เหมาะสมต่อการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในชิ้นอาหาร จะส่งผลต่ออัตราการทำแห้ง ในขณะที่อาหารที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน จะทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ออกมายังผิวอาหารได้ง่าย อัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้น ดังนั้นลักษณะทางธรรมชาติของอาหารจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อการอบแห้งอาหาร

2. ขนาดและรูปร่างของอาหาร อัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นเมื่อขนาดและรูปร่างของอาหารมีพื้นที่ต่อปริมาตรมาก ช่วยเพิ่มให้การส่งผ่านความร้อนทั่วชิ้นอาหารมากขึ้น น้ำระเหยออกจากอาหารได้สูงขึ้น ทำให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพที่ดี

3. ปริมาณและการจัดเรียงของอาหาร ถ้าอาหารมีปริมาณที่มาก และถูกจัดเรียงหลายชั้นซ้อนกันมากเกินไปต่อถาด ส่งผลให้อาหารได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ บริเวณตรงกลางจะมีอัตราการอบแห้งช้ากว่า เนื่องจากได้รับความไม่ทั่วถึง

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน อัตราการทำแห้งเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างชิ้นอาหารกับลมร้อน ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสู่ร่างกายในชิ้นอาหารได้ดี และเกิดการระเหยได้เร็วขึ้น แต่จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของอุณหภูมิต่ออาหารด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน การเคลื่อนที่ของน้ำภายในชิ้นอาหาร และการระเหยของน้ำจะมีประสิทธิภาพต่ำ เมื่อความชื้นของลมร้อน หรืออากาศร้อนมีค่าสูง

6. ความดันของบรรยากาศ อาหารบางชนิดจะเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน จึงมีการลดความดันของบรรยากาศจากหนึ่งชั้นบรรยากาศให้ต่ำลงเพื่อลดจุดเดือดของน้ำ จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

7. ความเร็วลมร้อน อัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นเมื่อความเร็วลมมีค่ามาก ส่งผลให้น้ำภายในชิ้นอาหารเกิดการระเหยมากยิ่งขึ้น

8. คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของอาหาร ในการอบแห้งควรมีการคำนึงถึงความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน สำหรับคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นและสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองชิ้นอาหาร

อย่างไรก็ตามในการทำแห้งอาหารทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพทางด้านการบริโภคและคุณค่าทางโภชนาการอาหาร โดยกระบวนการทำแห้งที่นิยมใช้การตากแดดในที่โล่ง อาศัยการพาความร้อนจากธรรมชาติ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการปนเปื้อนของฝุ่นละออง และสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพ ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานจากแหล่งต่าง ๆ เช่น พลังงานความร้อน คลื่นไมโครเวฟ และรังสีอินฟราเรด เป็นต้น เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพได้มาตรฐานมากขึ้น สามารถส่งออกและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ซึ่งในการอบแห้งแต่ละวิธีจะมีอัตราการทำแห้งเร็วช้าที่แตกต่างกัน เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องจากระบบไม่ยุ่งยาก ต้นทุนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ใช้แหล่งความร้อนจากรังสีอินฟราเรด รังสีจะแผ่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้ออาหาร ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นจนเกิดเป็นความร้อนภายในอาหาร ทำให้ความชื้นในอาหารแพร่ไปยังผิวของอาหารโดยที่ผลิตภัณฑ์อาหารยังมีคุณภาพดีอยู่ นอกจากนี้ยังช่วยให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ (ณัฐพล กระจำง, และณรงค์ อึ้งกิมบัว, 2559)

เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Hot air tray dryer)

เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดนิยมใช้สำหรับการผลิตอาหารในปริมาณต่ำ หรือสำหรับใช้ในโรงงานต้นแบบ เครื่องอบชนิดนี้ใช้เงินลงทุนและค่าดูแลรักษาที่ต่ำและควบคุมดูแลยาก ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนคือเครื่องให้ความร้อน (Heater) ใบพัดสำหรับเป่าลมร้อนให้กระจายทั่วชิ้นอาหาร และทางระบายไอน้ำเพื่อระเหยออกสู่ภายนอก (อิศเรศ วรรณทร, 2554) และถาดเดี่ยว ๆ ที่มีช่องตาข่ายอยู่ด้านล่างและขับเคลื่อนด้วยฉนวนในแต่ละถาดจะบรรจุอาหารชิ้นบาง ๆ ขนาด 2-6 เซนติเมตร ดังภาพ 21 ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบพาความร้อน (Convective drying) ใบพัดจะทำการเป่าลมร้อนไปยังชิ้นอาหารที่ความเร็วลม 0.5-5 เมตร/วินาที/เมตร² ของพื้นที่ผิวของถาด (วิไล รังสาดทอง, 2543) ความร้อนจากอากาศจะถูกถ่ายเท

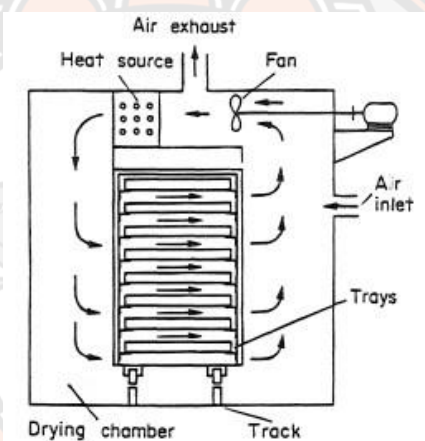
ไปยังอาหาร น้ำในอาหารก็จะทำการถ่ายเทมวลไปยังอากาศทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่น้ำภายในชิ้นอาหารจะเคลื่อนที่สู่ผิวอาหารและระเหยไปในที่สุด เมื่อความดันไอน้ำที่ผิวอาหารเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศจะส่งผลให้การถ่ายเทมวลหยุดลง ซึ่งในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในชิ้นอาหารออกมาสู่ผิวนั้นเกิดขึ้นได้หลายแบบ (แสนสุรีย์ เชื้ออังกาบ, และอุบลรัตน์ โพธิกนิษฐ์, 2559) เช่น

การแพร่ (Diffusion)

การไหลภายในท่อเล็กในโครงสร้างของวัตถุ (Capillary flow)

การไหลจากความดันออสโมติก (Osmotic pressure)

การไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravitation flow)



ภาพ 21 กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างการอบแห้ง

ที่มา: ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560

การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying)

การอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นกระบวนการอบแห้งวิธีหนึ่งที่มีอัตราการอบแห้งสูง คล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบธรรมดาทั่วไป แต่ชั้นโลหะที่วางอาหารเป็นตัวนำความร้อน ขณะทำงานอากาศภายในเครื่องอบแห้งจะถูกดูดออกไปจนภายในเครื่องกลายเป็นสุญญากาศ ซึ่งเป็นการทำแห้งที่ทำงานภายใต้สภาวะที่ความดันอากาศต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ทำให้น้ำในอาหารระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลง (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, และนิธิยา รัตนานพนธ์, 2553) เมื่ออบผลิตภัณฑ์ในสภาวะสุญญากาศและให้ความร้อน ทำให้ผลต่างความดันระหว่างความดันไอน้ำในผลิตภัณฑ์กับสุญญากาศที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้น้ำในอาหารระเหยกลายเป็นไอออกมา

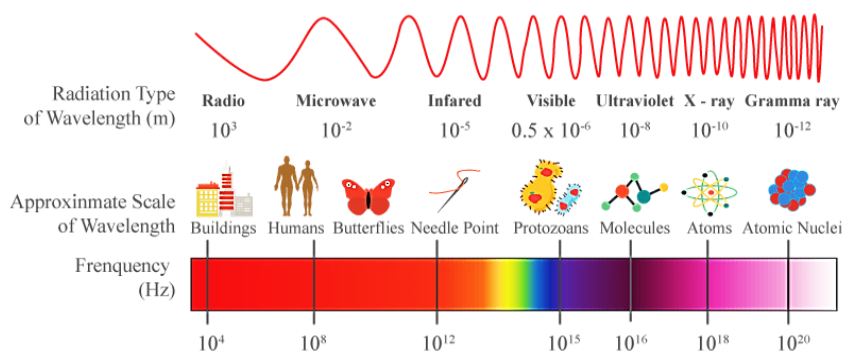
และเนื่องจากอุณหภูมิระเหยจะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นสุญญากาศ ลดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง การอบแห้งแบบสุญญากาศจึงเหมาะสมกับอาหารที่เสื่อมสภาพง่ายต่อความร้อน (lenergyguru, 2015) ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งวิธีนี้จึงมีคุณภาพดี ในด้านของสี กลิ่น รสชาติ และรูปร่างของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะมีความเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป นอกจากนี้ยังคงคุณค่าทางโภชนาการอาหารไว้ได้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่ำ ปริมาณออกซิเจนน้อย และใช้เวลาในการทำแห้งเร็ว (Alibas, 2007)



ภาพ 22 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Dryer)

การอบแห้งอินฟราเรดแบบสุญญากาศ (Vacuum Infrared Drying)

อินฟราเรด (Infrared) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75–1,000 μm ดังภาพ 23 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นรังสีความร้อน แบ่งย่อยความยาวคลื่นออกเป็น 3 ขนาด คือ รังสีอินฟราเรดระยะใกล้ (Near Infrared, NIR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.72–2 microns (3,870–1,180 องศาเซลเซียส) รังสีอินฟราเรดระยะกลาง (Middle Infrared, MIR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 2 ถึง 4 microns (1,180–450 องศาเซลเซียส) และรังสีอินฟราเรดระยะไกล (Far Infrared, FIR) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4–1,000 microns (<450 องศาเซลเซียส) (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560) เมื่อรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบและแพร่กระจายผ่านวัสดุจะทำให้เกิดการสูญเสียของรังสี เนื่องจากคุณสมบัติของคลื่นและบางส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุ โดยพลังงานจากรังสีอินฟราเรดที่ทะลุไปยังวัสดุเกิดการแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนทำให้วัสดุร้อน จากนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จากรังสีอินฟราเรดจะถูกถ่ายเทความร้อนจากภายในวัสดุมายังที่ผิวและออกสู่อากาศแวดล้อม (Reddy, 2006)



ภาพ 23 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่าง ๆ

ที่มา: นราภรณ์ ตั้งหทัยทิพย์, 2561

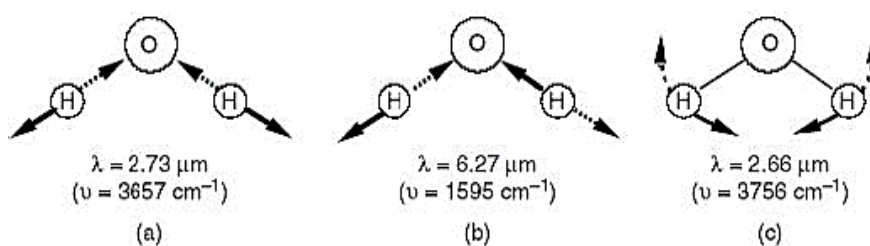


ภาพ 24 ตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศ (Vacuum Infrared Dryer)

ในกรณีของกระบวนการแปรรูปอาหาร นิยมใช้ขจัดความชื้นแบบอินฟราเรดระยะไกลมากกว่าขจัดความชื้นแบบอินฟราเรดระยะใกล้ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สูงที่จะทะลุทะลวงผ่านอาหารและเป็นพลังงานที่สามารถดูดกลืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งโดยทั่วไปอาหารประกอบด้วยน้ำและสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ลักษณะการดูดกลืนอินฟราเรดของวัสดุเหล่านั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลของน้ำประกอบด้วย 3 ลักษณะ คือ

1. การสั่นสะเทือนยืดหยุ่นแบบสมมาตร (Symmetrical Stretching Vibration)
2. การสั่นสะเทือนยืดหยุ่นแบบไม่สมมาตร (Antisymmetric Stretching Vibration)
3. การสั่นสะเทือนเปลี่ยนรูปร่างแบบสมมาตร (Symmetrical Deformation Vibration)

ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากพลังงานของรังสีอินฟราเรดในสัดส่วนของความถี่เป็นประสิทธิภาพของการดูดกลืนในวัสดุ ดังภาพ 25 ดังนั้นอาหารจะดูดกลืนพลังงานของรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นที่สูงกว่า $2.5 \mu\text{m}$ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกลไกการสั่นสะเทือนขนาดโมเลกุล ซึ่งสามารถทำให้เกิดความร้อน (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560)



ภาพ 25 การสั่นสะเทือนของโมเลกุลของน้ำ

ที่มา: กุณทิกา เวชกลาง, ภราดร หนูทอง, และเพลงพิน เพียรภูมิพงศ์, 2560

อย่างไรก็ตามแม้รังสีอินฟราเรดไกลจะสามารถทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพจนเกิดเป็นความร้อนทำให้เกิดการทำแห้ง ในการนำระบบสุญญากาศเข้าร่วมกับอินฟราเรด จะช่วยให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในด้านของระยะเวลาในการทำแห้ง ระยะเวลาในการเกิดความร้อนเร็วขึ้น และมีปริมาณออกซิเจนน้อย ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของคุณค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดได้

การคืนรูป หรือการดูดน้ำกลับคืน (Rehydration)

อาหารที่ผ่านการอบแห้งแล้วนำคืนรูป น้ำจะไม่สามารถเข้าไปแทนที่ในอาหารได้เหมือนกับการก่อนอบแห้ง เนื่องจากการดูดน้ำกลับคืนไม่ใช่ปฏิกิริยาย้อนกลับของการทำแห้ง ผลของการทำแห้งทำให้ระดับการดูดน้ำกลับคืนของสตาร์ชลดลง ผงแป้งจะลumpy ได้น้อย และการเสียดสภาพของโปรตีนทำให้ลดการดูดน้ำกลับ ซึ่งอัตราเร็วและปริมาณของน้ำที่ดูดกลับคืนเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของอาหารได้ (Fellows, 2003)

อรอนงค์ นัยวิกุล และคณะ (2535) ศึกษาการทำขนมจีนแห้งที่สำเร็จรูปที่ทำจากแป้งข้าวพรีเจลาติไนซ์ผสมกับแป้งข้าวเจ้าและน้ำในอัตราส่วน 15:85:140 โดยใช้วิธีทำแห้ง 2 วิธี คือ แบบอบแห้งในตู้อบแบบถาด และวิธีแช่แข็งและอบแห้งในตู้อบแบบถาดหลังจากทำการคืนรูป ผลปรากฏว่าขนมจีนที่ได้จากการอบแห้งแบบแรกมีลักษณะเส้นที่ค่อนข้างแข็ง แห้งสม่ำเสมอ เส้นมีสีเหลืองนวล

และมีกลิ่นแบ่งเล็กน้อย สำหรับเส้นขนมจีนที่ได้จากการอบแห้งแบบที่สอง จะได้เส้นขนมจีนที่มีลักษณะเส้นค่อนข้างเปราะ แข็งสม่ำเสมอ มีสีขาวขุ่น และมีกลิ่นแบ่งเล็กน้อย เส้นขนมจีนอบแห้งทั้ง 2 แบบมีความชื้นต่ำหลังอบแห้ง โดยเส้นขนมจีนแบบแรกจะมีความชื้นร้อยละ 5.40 แบบที่สองร้อยละ 6.76 และเมื่อเก็บในถุงพอลิเอทิลีนพบว่าเส้นขนมจีนแห้งจากทั้ง 2 วิธีดูดซึมความชื้นเพิ่มขึ้นจนเส้นขนมจีนมีความชื้นคงที่ที่ร้อยละ 8 สำหรับการคืนรูปในน้ำเดือดเพื่อบริโภคพบว่า ขนมจีนที่ได้จากการทำแห้งแบบแรกใช้เวลาในการคืนรูป 10 นาที ในขณะที่เส้นขนมจีนจากการทำแห้งแบบที่สองใช้เวลา 7 นาที นอกจากนี้เมื่อนำเส้นที่ผ่านการคืนรูปทั้ง 2 แบบมาทดสอบการยอมรับจากผู้บริโภคพบว่า ผลของการทดสอบชิมไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

พันทมาศ จุ่มครอง และคณะ (2556) ศึกษาการอบแห้งกระชายดำด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ภาวะความดันสมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับแหล่งความร้อนคงที่เท่ากับ 15 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่าความดันมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยเมื่อลดความดันลงจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

ภราดร หนูทอง และคณะ (2560) ศึกษาคุณภาพของขนมจีนอบแห้งจากกระบวนการอบแห้งขนมจีนด้วยอินฟราเรดและลมร้อน ประกอบด้วยการทำแห้ง 4 กระบวนการ ได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งแบบสองขั้นตอน และการอบแห้งแบบหยุดพัก โดยการอบแห้งทั้งรังสีอินฟราเรดตั้งแต่ 200-600 วัตต์ และอุณหภูมิอบแห้งตั้งแต่ 40-60 องศาเซลเซียส เพื่ออบแห้งจนเหลือความชื้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักแห้ง พบว่าเส้นขนมจีนค่าความแตกต่างของสีรวม (ΔE^*) และค่าบ่งชี้การเกิดสีน้ำตาล (BI) ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบแห้งลดลง หรือรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Chroma มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับค่าการคืนรูปและค่า a_w เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้น และรังสีอินฟราเรดลดลง โดยค่าความแข็งของเส้นขนมจีนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและรังสีอินฟราเรด จากการทำแห้งทั้ง 4 กระบวนการ พบว่าการอบแห้งแบบสองขั้นตอน ที่รังสีอินฟราเรด 400 วัตต์ เวลานาน 90 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการอบแห้งขนมจีน

รตินันท์ เหลือมพล (2561) ศึกษาการอบแห้งแบบขั้นบันไดของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับป้อนความร้อน โดยใช้แครอทหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3 เซนติเมตร อบในสภาวะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้ความดัน 0.2, 0.5 และ 0.7 bar ความเร็วลม 1.2 m/s จากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความดันต่ำลงจะใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุด (60 °C/0.2 bar/330 min)

เรวัฒน์ คาวาน, สุรสิทธิ์ เทียงจันทา, และสวัสดิ์ กีไสย์ (2561) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งขนุนโดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ ด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดขนาด 220 V 250 W จำนวน 2 หลอด เครื่องทำสุญญากาศขนาด 13.42 m³/hr เนื้อขนุนจำนวน 2 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 350 - 400% (db) ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ทำการปรับเปลี่ยนความดันสัมบูรณ์ 1, 5, 10 และ 15 kPa และทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดฮีตเตอร์อินฟราเรดกับชั้นวางขนุน 12, 15 และ 18 เซนติเมตร อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายมีค่าไม่เกิน 19% (db) จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมการอบแห้งเนื้อขนุน คืออุณหภูมิอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ความดัน 1 kPa ระยะห่างของฮีตเตอร์อินฟราเรดกับชั้นวางที่ 12 เซนติเมตร ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด 480 นาที สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 21.67 MJ/kg และอัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด 0.172 kg/hr

โพรไบโอติก (Probiotic)

โพรไบโอติก คือจุลินทรีย์เล็ก ๆ ที่มีชีวิตซึ่งเมื่อร่างกายได้รับเชื้อที่รอดชีวิตในปริมาณที่เพียงพอจะส่งผลที่เป็นประโยชน์ทางด้านสุขภาพ มีบทบาทต่อระบบทางเดินอาหาร ช่วยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่ไม่ก่อให้เกิดโรค ซึ่งช่วยปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ (Host) มีคุณสมบัติในการยับยั้งเซลล์มะเร็งในลำไส้ ยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค และกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกัน (Anal, & Singh, 2007) ซึ่งคำว่าโพรไบโอติกส์เริ่มใช้โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียชื่อ Metchnikoff ได้พบว่าชาวบัลแกเรียมีอายุยืน เนื่องจากรับประทานนมหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์ Lactobacilli เป็นประจำทุกวัน (Metchnikoff, 1908) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้โพรไบโอติกส์มาเป็น 100 ปี จนถึงปัจจุบัน โดยแบ่งเชื้อออกเป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของจุลินทรีย์ คือ 1) กลุ่มที่ใช้แป้งเป็นอาหารเรียกว่า Carbolytic bacteria ได้แก่ เชื้อ lactobacilli, eubacteria และ bifidobacterial 2) กลุ่มที่ใช้โปรตีนเป็นอาหารเรียกว่า Proteolytic bacteria ได้แก่ *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus*, *Staphylococci*, *Clostridium* และ *V. eillonellae* และ 3) กลุ่มที่ใช้แป้งและโปรตีนเป็นอาหาร ได้แก่ *Enterococci*, *E. coli*, *Streptococci* และ *Bacteroides* (Supujchara, 2014) และที่สำคัญในการใช้ประโยชน์จากโพรไบโอติกส์นั้นจะต้องคำนึงถึงจำนวนเชื้อที่เหลือรอดในผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่บริโภคควรมีอย่างน้อย 1×10^6 CFU/g ตลอดอายุการเก็บรักษา ซึ่งจุลินทรีย์ที่นำมาผลิตเป็นโพรไบโอติกส์ เช่น *Bacillus coagulans*, *Bifidobacterium bifidum*, *Enterococcus durans*, *Lactobacillus acidophilus*, *Staphylococcus sciuri* และ *Saccharomyces cerevisiae* subsp. *Boulardii* (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2554) เป็นต้น

คุณสมบัติของจุลินทรีย์โพรไบโอติก

1. เป็นเชื้อที่สามารถสร้างกรดแลคติกได้ และช่วยปรับสภาวะในระบบทางเดินอาหารให้ยากต่อการเจริญของแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (นวลจันทร์ พารักษา, 2533)
2. เชื้อที่สามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรดในกระเพาะอาหารของคนได้ดี (Kontula et al., 1998) เนื่องจากร่างกายจะหลั่งกรดออกมาเพื่อย่อยอาหาร เช่น ไฮโดรคลอริก และเอนไซม์ เปปซิน กระเพาะอาหารจึงมีความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ประมาณ 1.0-3.0 (Huang, & Adams, 2004) ตัวอย่างเช่น *Lactobacillus gasseri* สามารถรอดชีวิตได้มากกว่าที่ความเป็นกรด-ด่าง 3, 2 และ 1.5 ตามลำดับ (Arihara et al., 1998)
3. สามารถทนต่อเกลือน้ำดี (Bile salt) ในลำไส้เล็กได้ดี เพราะน้ำดีมีหน้าที่ขั้บสารที่ตกค้างออกจากร่างกาย จำพวกยาหรือแร่ธาตุบางตัว (Kontula et al., 1998) ซึ่งเกลือน้ำดี คือ โซเดียมไกลโคโคเลต (Sodium glycocholate) และโซเดียมทอโรโคเลต (Sodium taurocholate) ที่ถูกสร้างจากตับ เพื่อย่อยอาหารประเภทไขมันในลำไส้เล็ก (Taranto et al., 1996) ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 1.5-2.0 ในช่วงแรกของกรดย่อย และลดลงมาอยู่ประมาณร้อยละ 0.3 (Noriega et al., 2004)
4. เชื้อที่สามารถแข่งกับเชื้อโรคในการยึดผนังลำไส้ โดยปกติเชื้อโรคจะเกาะตามผนังลำไส้ ส่งผลให้การบีบตัวให้อาหารเคลื่อนที่ผิดปกติ ซึ่งโพรไบโอติกจะเคลือบเกาะที่ผนังลำไส้ ทำให้การย่อยและการดูดซึมเป็นไปตามปกติ (Fuller, 1993)
5. เชื้อที่สามารถสร้างเอนไซม์ที่มีผลทำให้เกิดการย่อยได้ เช่น Amylase, Pectinase, Protease, Glucosidase, Cellulase และ Lactase (อุทัย คันโธ, 2535)
6. สามารถสร้างสารต่อต้านเชื้อก่อโรคได้ จำพวก สารเมแทบอไลต์ปฐมภูมิ (Primary metabolite) เช่น กรดอินทรีย์ และสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (Secondary metabolite) เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแบคทีริโอซิน เป็นต้น (Fuller, 1993) ซึ่งสารเหล่านี้จะส่งผลทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อก่อโรคบางตัว (Arihara et al., 1998)
7. สามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน เช่น ผู้ป่วยที่เป็นโรคท้องร่วงรับประทานโพรไบโอติกพบว่าร่างกายผู้ป่วยสามารถสร้างภูมิคุ้มกันได้ร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับผู้ป่วยที่ไม่ได้รับประทานโพรไบโอติก ซึ่งสามารถสร้างภูมิคุ้มกันเพียงร้อยละ 46 (Kaila et al., 1992)
8. ช่วยลดการสังเคราะห์สารกลุ่มเอมีนที่เป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร ที่รบกวนการทำงานของสารที่มีประโยชน์ต่าง ๆ ในร่างกาย (อุทัย คันโธ, 2535)
9. ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่ (Colon) โดยการเข้าไปลดเอนไซม์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็ง (Kontula et al., 1998)

10. สามารถเข้าไปแย่งอาหารจากเชื้อก่อโรคได้ เพื่อลดการเจริญของเชื้อก่อโรค (Fuller, 1993)
11. เป็นเชื้อที่สามารถมีชีวิตรอดอยู่ภายในลำไส้ได้นานประมาณ 24 ชั่วโมง และมีการเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว (นวลจันทร์ พารักษา, 2533)

บาซิลลัส โคแอกกูแลน (*Bacillus coagulans*)

Bacillus coagulans (*B. coagulans*) หรืออาจเรียกว่า *Bacillus thermoacidurans* เป็นแบคทีเรียในตระกูล Bacillus ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างเป็นท่อน (Rod shape) สามารถเจริญได้แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic) และที่อุณหภูมิสูง (Thermophilic bacteria) สร้างสปอร์ (Spore forming bacteria) และเป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตกรดแลกติก แต่จะไม่ผลิตก๊าซจากการหมักของมอลโตส (Maltose) แรฟฟิโนส (Raffinose) แมนนิทอล (Mannitol) และซูโครส (Sucrose) (Asan, 2010) นอกจากนี้ยังบางสายพันธุ์ยังสามารถผลิต α -amylase ที่ทนความร้อนได้ ดังนั้น *B. coagulans* จึงมีคุณสมบัติที่ใช้เป็นจุลินทรีย์โพรไบโอติก (Karri et al., 2016) ซึ่งมันมีลักษณะที่ทนความร้อน อุณหภูมิและพีเอชที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตประมาณ 35-50 องศาเซลเซียส และที่ pH 5.5-6.5 (Asan, 2010; Karri et al., 2016) มีการตรวจสอบพบว่าเป็นเชื้อที่ปลอดภัยสำหรับผู้บริโภค ไม่เป็นเชื้อที่ก่อโรค (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2554) นอกจากนี้ *B. coagulans* ยังได้รับการรับรองความปลอดภัยจากองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (US Food and Drug Administration: FDA) หน่วยงานความปลอดภัยด้านอาหารแห่งสหภาพยุโรป (European Union Food Safety Authority: EFSA) และอยู่ในเกณฑ์การยอมรับโดยทั่วไปว่าปลอดภัย (Generally Recognized As Safe: GRAS) และ Qualified Presumption of Safety (QPS) ซึ่ง *B. coagulans* เป็นโพรไบโอติกที่มีการศึกษาทางคลินิกมากที่สุดเกี่ยวกับการบริโภคของมนุษย์ และมีรายงานว่า *B. coagulans* ช่วยในการรักษาความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร อาการแพ้แลคโตส ไขมันในเลือดสูง การติดเชื้อในช่องคลอด อาการตับโคมา และเป็นตัวเสริมในการรักษาด้วยยาปฏิชีวนะ (Jurenka, 2012; Majeed et al., 2016; Majeed, & Prakash, 1998)



ภาพ 26 *Bacillus coagulans*

ที่มา: Jason, 2017

การศึกษาผลจากการใช้ผลิตภัณฑ์จากเชื้อจุลินทรีย์ *B. coagulans* ต่อภาวะแก๊สในระบบทางเดินอาหารที่ไม่ได้เกิดจากโรค เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีโพรไบโอติกที่มี *B. coagulans* จำนวน 2×10^9 CFU/U ต่อระบบทางเดินอาหารที่มีอาการทางลำไส้เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า โพรไบโอติกที่มี *B. coagulans* มีประสิทธิภาพในการลดอาการแน่นท้อง ปวดท้อง และภาวะมีแก๊สหลังรับประทานอาหารได้ (Kalman *et al.*, 2009)

การศึกษาการใช้ *B. coagulans* GBI-30, 6086 ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมต่อการมีชีวิตรอดของจุลินทรีย์ก่อโรคต่อจุลินทรีย์ในลำไส้มนุษย์โดยใช้ระบบการหมักเชื่อมแบบต่อเนื่อง (Continuous culture fermentation system) ด้วยการทดลองในหลอดทดลอง (*in vitro*): Continuous culture formation systems จำนวน 2 ชุด คือแบบกลุ่มที่มีโพรไบโอติกในระบบ และกลุ่มควบคุมที่ไม่มีโพรไบโอติก ทำการประเมินผลของจำนวนจุลินทรีย์โพรไบโอติกชนิดดีจากการวัดกรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acids; SCFAs) พบว่าการเสริม *B. coagulans* ไม่ได้มีผลเปลี่ยนแปลงจำนวนเชื้อจุลินทรีย์อันตราย และไม่มี的增加ของกรดไขมันสายสั้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การวิเคราะห์แบบ FISH พบความแตกต่างของจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ *B. coagulans* เพิ่มขึ้น ในกลุ่มที่มีการเสริมโพรไบโอติกเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม *B. coagulans* สามารถรักษาจำนวนไว้ได้แม้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีจุลินทรีย์ก่อโรค นอกจากนี้ยังพบว่าการทำงานของ *B. coagulans* สามารถต่อต้านเชื้อก่อโรคในระบบลำไส้ส่วนปลายได้ (Harue *et al.*, 2011)

B. coagulans MTCC 5856 สามารถออกฤทธิ์ต้านอาการท้องร่วงในหนูจำลอง (*In vivo*) และพบว่าอาจจะช่วยในเรื่องของอาการของผู้ป่วยที่เป็นโรคท้องร่วง (Irritable bowel syndrome; IBS) เมื่อเปรียบเทียบกับผู้ป่วยที่ไม่รับสปอร์ และผู้ป่วยที่ได้รับสปอร์ของเชื้อปริมาณ 2×10^9 CFU (spore)/day (Majeed, Natarajan et al., 2016; Majeed, Nagabhushanam, Natarajan, Sivakumar, Ali et al., 2016)

Majeed et al. (2019) รายงานถึงอัตราการรอดชีวิตของเชื้อโพรไบโอติก *B. coagulans* ที่เสริมลงไปในกาแฟ และชาที่ผ่านการต้มด้วยอุณหภูมิ 80 ± 2 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที จะลดลงเป็น 70 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า *B. coagulans* มีอัตราการรอดชีวิตหลังจากการต้มกาแฟ และชาร้อยละ 94.94 และ 99.76 ตามลำดับ และไม่มีความแตกต่างทางประสาทสัมผัสเมื่อเทียบกับกาแฟ และชาที่ไม่ถูกเสริมด้วยโพรไบโอติก นอกจากนี้ *B. coagulans* ยังมีอัตราการรอดชีวิตร้อยละ 99 ในผงกาแฟ และชาที่ถูกเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 เดือน



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

1. ข้าวกล้องพันธุ์มะลินิสสุรินทร์ ซึ่งเป็นข้าวหักมีอายุหลังเก็บเกี่ยว 6-7 เดือน ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท พรารด์ ออร์แกนิก จำกัด เลขที่ 90 ม.1 ตำบลหนองไม้กอง อำเภอไทรงาม จังหวัดกำแพงเพชร
2. ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทเก่า (ภัทรคำข้าว, พิชณุโลก)
3. เชื้อโพรไบโอติก *Bacillus coagulans* TISTR 1447 ในรูปแบบผงจากสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
4. แป้งมันสำปะหลัง ตราแมวแดงดาวเทียมลูกโลก (บริษัท เกรียงไกร (เกียงไต) จำกัด, นครปฐม)
5. แซนแทนกัม (Xanthan gum) (บริษัท ยูเนียน ซายน์ จำกัด, เชียงใหม่)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ (EM-ICE POWER, Sharp, Thailand)
2. เครื่องสับตัดแยกกาก (CE-03, Wasino, Thailand)
3. เครื่องบดแห้งแบบสแตนเลส (DXM-200, DXFLL, China)
4. เครื่องผสม (KSM150PSOB Artisan, Kitchen aid, USA)
5. เครื่องชั่งส่วนผสม (DJ1002C, GHL, China)
6. ตู้อบลมร้อน (Tray Dryer) (Songkwaetao-op, Thailand)
7. ตู้อบแห้งสุญญากาศ (Vacuum Drying oven) (VD115, BINDER, Germany)
8. ตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศ (Vacuum infrared oven) (March Cool Industry, Thailand)
9. เตามแม่เหล็กไฟฟ้า (MI-SV19DD, Midea, Vietnam)
10. ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
11. อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ตะกร้า ไม้พาย ผ้าขาวบาง ผ้ายางพลาสติก กระชอน ตะแกรง กระสอบ ถาด หม้อ และกะละมังอะลูมิเนียม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (OHAUS, PA 413, USA)
2. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (BSA 3202S-CW, Sartorius, Germany)
3. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (E-812 SOX, Buchi, Switzerland)
4. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (B-323, Buchi, Switzerland)
5. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใย (Fibertec system M6, Tecator, Denmark)
6. เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน (Benchmark Z206-A, Hermle, Germany)
7. เครื่องระเหยสุญญากาศ (R124, Buchi, Switzerland)
8. เครื่องผสมสารละลาย (G560E, Scientific Industries, USA)
9. เครื่องเขย่าสารละลาย (NB-101M, N-Biotek, Korea)
10. เครื่องอัลตราโซนิกแบบอ่าง (Elma Emasonic S 30 H, Germany)
11. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Thermo Spectronic Genesys 20, USA)
12. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (Agilent 1100 Series, USA)
13. เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (AREC, VELP, Italy)
14. ตู้อบลมร้อน (UM-Oven 120L, UMAC, Thailand)
15. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (WNB29LO, Memmert, Germany)
16. โถดูดความชื้น
17. เครื่องแก้วและอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ขวดปรับปริมาตร หลอดทดลอง กระจกบอกรดวง ขวดเก็บสาร คิวเวทท์ กระจบองอลูมิเนียม และอื่น ๆ

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1. ABTS⁺⁺ (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid)), AR grade (Sigma-Aldrich, USA)
2. Acetonitrile, HPLC grade (RCI Labscan, Thailand)
3. Aluminium chloride, AR grade (LOBA Chemie, India)
4. Boric acid, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
5. Catalyst tablets, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
6. Catechin, AR grade (Sigma-Aldrich, Russia)
7. Cyanidin-3-glucoside chloride, HPLC grade (Phyproof, Germany)
8. DPPH^{*} (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), AR grade (Sigma-Aldrich, Germany)
9. Ferric chloride, AR grade (PanReac AppliChem, Germany)

10. Folin-Ciocaltue, AR grade (LOBA Chemie, India)
11. Formic acid, AR grade (LOBA Chemie, India)
12. Gallic acid, AR grade (Sigma-Aldrich, China)
13. Glacial acetic acid, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
14. Hydrochloric acid, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
15. Methanol, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
16. Methanol, HPLC grade, RCI Labscan, Thailand)
17. Peonidin-3-O-glucoside chloride, HPLC grade (Phyproof, Germany)
18. Petroleum ether, AR grade (LOBA Chemie, India)
19. Potassium chloride, AR grade (LOBA Chemie, India)
20. Potassium hydroxide, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
21. Potassium persulfate, AR grade (LOBA Chemie, India)
22. Sodium acetate trihydrate, AR grade (LOBA Chemie, India)
23. Sodium carbonate, AR grade (Ajax Finechem, Australia)
24. Sodium hydroxide, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
25. Sodium nitrile, AR grade (LOBA Chemie, India)
26. Sulfuric acid, AR grade (RCI Labscan, Thailand)
27. TPTZ (2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine), AR grade (Sigma-Aldrich, Switzerland)
28. Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid), AR grade (Sigma-Aldrich, Russia)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

1. เครื่องวัดสี (Color Reader CR-20, Konica Minolta, Japan)
2. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA-HD plus, Stable micro system, UK) โดยใช้หัววัดแบบ ไบมีด (A/LKB-F) และหัววัด Spaghetti-noodle rig (A/SPR)
3. เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (4500, Perten Instruments, Australia)
4. เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติการไหล (MCR92, Anton Paar, Austria) ใช้หัววัดแบบ parallel plates ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร
5. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (ST3100-F, OHAUS, USA)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา

1. เครื่องนับจุลินทรีย์ (SCS, STUART, UK)
2. เครื่องตีปั่นอาหาร (Stomacher 400, Seward, UK)
2. ตู้บ่มเชื้อจุลินทรีย์ (1535, Seldon, USA)
3. ตู้เย็นเก็บเชื้อจุลินทรีย์ (NR-B23AZ, National, Japan)
4. ตู้ปลอดเชื้อ (DLF460 Vertical flow, Clean Air, Netherlands)
5. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสองตาแบบธรรมดา (BA 200, Motic, USA)
6. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อภายใต้ความดันไอน้ำ (KT 30L, ALP, Japan)
7. เครื่องแก้วและอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น จานเพาะเชื้อพลาสติก ขวดรูปชมพู่ ปิเปตต์แก้ว ออโต้ปิเปตต์ หลอดเลี้ยงเชื้อ ตะเกียงแอลกอฮอล์ ห่วงเขี่ยเชื้อ แท่งแก้วเกลี่ยเชื้อ หลอดเซนตริฟิวก์พลาสติก และอื่น ๆ

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา

1. Agar (Himedia, India)
2. Dextrose monohydrate (QREC, New Zealand)
3. Lactobacilli MRS agar (Himedia, India)
4. Lactobacilli MRS broth (Himedia, India)
5. Manganese sulfate monohydrate (KemAus, Australia)
6. Nutrient agar (Himedia, India)
7. Peptone water (Himedia, India)

เครื่องประมวลผลทางสถิติ

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for windows version 22.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA)

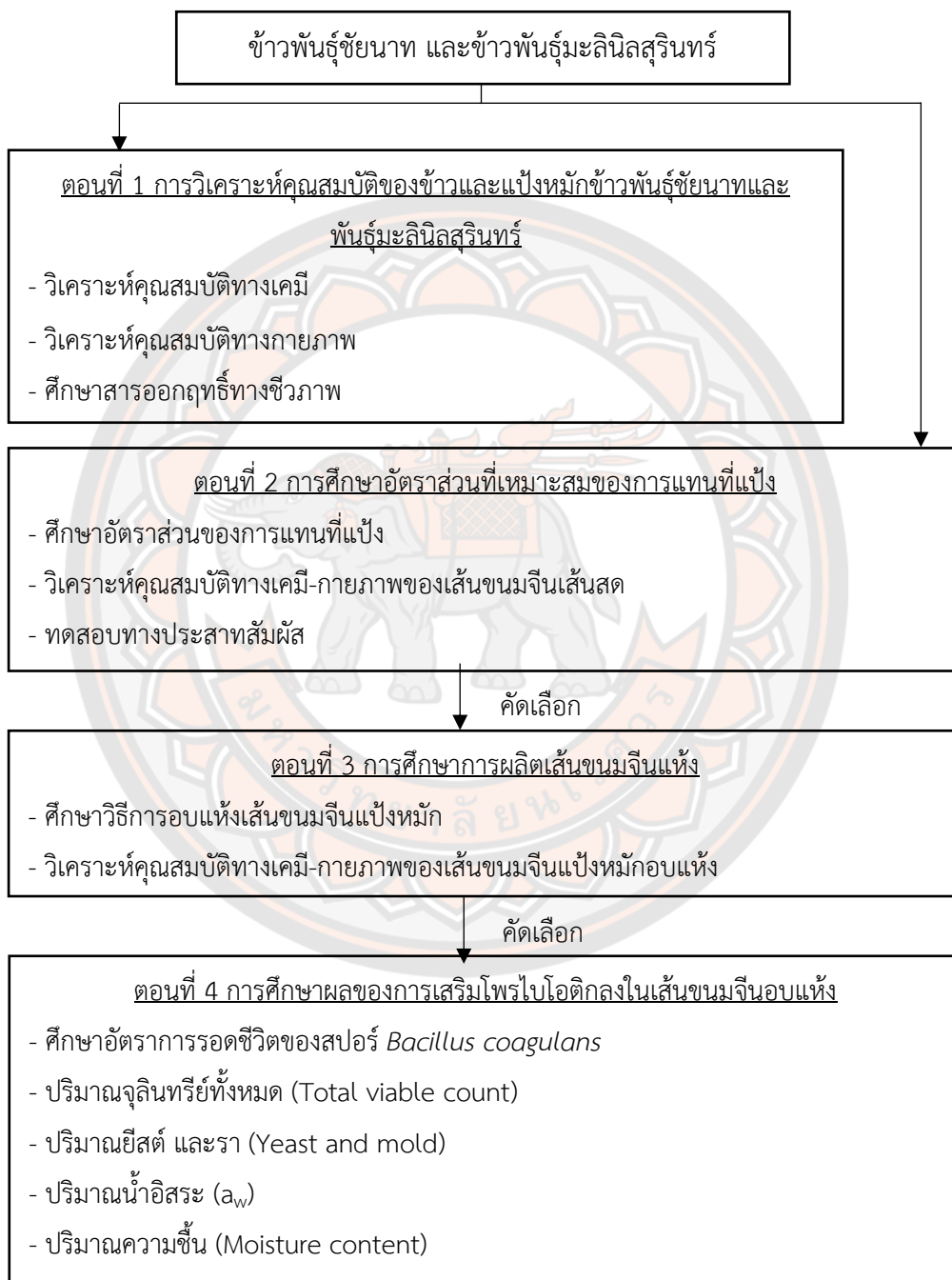
วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ตอน ได้แก่

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติของข้าวและแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์
2. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่แป้ง
3. การศึกษาการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้ง

4. การศึกษาผลของการเสริมโพรไบโอติกลงในเส้นขนมจีนอบแห้ง

โดยมีภาพรวมวิธีดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพ 27



ภาพ 27 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของข้าวและแป้งหมักจากข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

1. การเตรียมตัวอย่างข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

นำข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ บดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบสแตนเลส จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช เก็บตัวอย่างข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท (CHI) และข้าวหักพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ (SU) ในถุงซิปล็อกและซ้อนทับด้วยถุงอลูมิเนียมฟอยล์ นำตัวอย่างข้าวไปเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

2. การเตรียมแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ขั้นตอนการเตรียมแป้งหมัก (ภาพที่ 28) โดยนำข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ ล้างด้วยน้ำให้สะอาด และแช่ข้าวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เทน้ำทิ้ง จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการแช่ใส่กระสอบ สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 10 นาที และห่อด้วยผ้าขาวให้มิดชิด หลังจากนั้นนำไปหมักในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 7 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน เมื่อครบ 7 ชั่วโมง ข้าวจะถูกหมักต่อที่อุณหภูมิห้องอีกประมาณ 17 ชั่วโมง ซึ่งในแต่ละวันจะมีการล้างข้าวผ่านน้ำก่อนนำไปหมักในตู้อบลมร้อน เมื่อหมักข้าวครบ 3 วัน นำข้าวในกระสอบมาล้างผ่านน้ำประมาณ 5-10 นาที แล้วนำไปโม่ด้วยเครื่องบดอาหาร (อัตราส่วนข้าว:น้ำ เท่ากับ 1:0.5) จากนั้นปั่นหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกกากจนได้แป้งหมัก และนำแป้งหมักไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จะได้แป้งหมักที่มีความชื้นไม่เกิน 14% จากนั้นพักให้เย็น บดละเอียด และร่อนด้วยตะแกรงขนาดความถี่ 100 เมช จะได้แป้งหมักที่พร้อมใช้งาน เก็บตัวอย่างแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท (FCHI) และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ (FSU) ในถุงซิปล็อกและซ้อนทับด้วยถุงอลูมิเนียมฟอยล์ซิปล็อก นำตัวอย่างข้าวไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนทำการทดลองขั้นต่อไป

3. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพของตัวอย่างข้าวและแป้งหมักจากข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

3.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่

- 3.1.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน (AOAC, 2001)
- 3.1.2 ปริมาณอะไมโลสโดยวิธี Amperometric titration with potassium iodate solution ดัดแปลงจาก Takeda et al. (1987) และ Gibson et al. (1997)
- 3.1.3 ปริมาณแป้งทั้งหมดโดยวิธี Amyloglucosidase amylase method (Total starch kit, Megazyme international Ireland, Ireland)
- 3.1.4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Shao et al., 2014)
- 3.1.5 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Jia et al., 1998)
- 3.1.6 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด โดยวิธี pH difference (AOAC, 2006)

3.1.7 วิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

- 1) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•] assay (Shao et al., 2014)
- 2) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS^{•+} assay (Roberta et al., 1999)
- 3) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP assay (Thitipramote et al., 2016)

3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

3.2.1 วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Hunter lab (Color Reader CR-20, Konica Minolta, Japan) และรายงานผลด้วยค่า L^* (ค่าความสว่าง), a^* (สีเขียว-สีแดง) และ b^* (สีน้ำเงิน-สีเหลือง)

3.2.2 ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index; WAI and Water Solubility Index; WSI) (Anderson *et al.*, 1969)

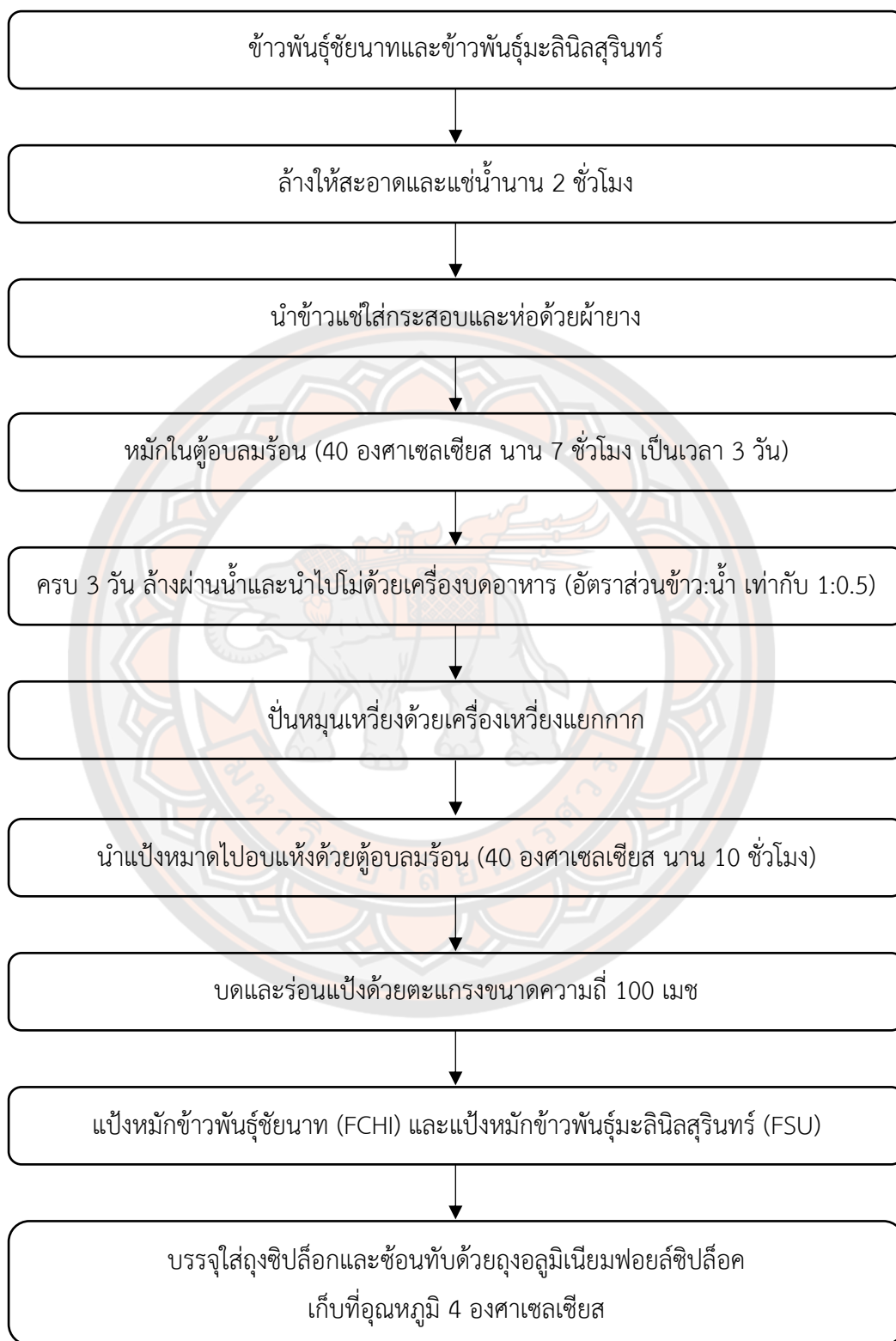
3.2.3 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and Solubility) (Schoch, 1964)

3.2.4 วิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง RVA (4500, Perten Instruments, Australia) (AACC Method 61-02, 2000)

ชั่งตัวอย่างแป้ง 3 กรัม (ความชื้นร้อยละ 12) ใส่ในกระป๋องอะลูมิเนียม เต็ม น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร และกวนผสมแป้งโดยใช้ใบพัด (Paddle type) ที่ความเร็วรอบเริ่มต้น 960 รอบ/นาที และลดลงที่ 160 รอบ/นาที จนสิ้นสุดการทดสอบ โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 95 องศาเซลเซียส รักษาอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และลดระดับอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส ในกระบวนการทดสอบจะสิ้นสุดที่ 12 นาที 30 วินาที โดยวัดเป็นค่า Peak viscosity (PV), Breakdown (BD), Final viscosity (FV), Setback (SB) และ Pasting temperature (PaT)

3.2.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้เครื่อง pH meter (ST3100-F, OHAUS, USA)

การเตรียมแป้งหมัก มีวิธีการดังนี้



ภาพ 28 การเตรียมแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ตอนที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

1. ศึกษาอัตราส่วนของการแทนที่แป้ง

ศึกษาอัตราส่วนของแป้งหมักที่ใช้การผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักโดยแปรระดับแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทต่อแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักแห่งเปรียบเทียบกับเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ไม่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ (ร้อยละ 0) ดังตาราง 10

ตาราง 10 อัตราส่วนการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

แป้งหมัก (การแทนที่)	แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ (ร้อยละ)	แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท (ร้อยละ)
ร้อยละ 0	0	100
ร้อยละ 10	10	90
ร้อยละ 20	20	80
ร้อยละ 30	30	70

2. วิธีการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมัก

วิธีการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักดังภาพ 29

2.1 การปรับความชื้นแป้ง นำแป้งหมักจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ได้จากตอนที่ 1 มาปรับความชื้นให้ได้ประมาณร้อยละ 45 โดยชั่งแป้งและน้ำตามอัตราส่วนดังตาราง 11 ผสมแป้งกับน้ำจนเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้แป้งหมักที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 45

ตาราง 11 อัตราส่วนของแป้งหมักและน้ำสำหรับปรับความชื้นแป้งหมัก

แป้งหมัก	ปริมาณแป้ง (กรัม)	ปริมาณน้ำ (กรัม)
แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท	100	58.72
แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์	100	63.07

2.2 การพรีเจลาติไนซ์ จะทำการพรีเจลาติไนซ์แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทร้อยละ 30 ของแป้งทั้งหมด ซึ่งแป้งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของแป้งพรีเจลาติไนซ์ (แป้งสุก) โดยผสม

แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 นำไปเคี่ยวด้วยกระทะจนแป้งสุก และส่วนที่ 2 เป็นแป้งสำหรับตีผสม (แป้งดิบ) คือการนำแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทส่วนที่เหลือผสมกับแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ร้อยละ 10, 20 และ 30 และน้ำเข้าด้วยกัน ดังตาราง 12 โดยในแต่ละสูตรการแทนที่แป้งจะมีการเติมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 25 เท่ากันทุกสูตร

ตาราง 12 อัตราส่วนของแป้งสำหรับตีผสมในการผลิตเส้นขนมจีนเส้นสด

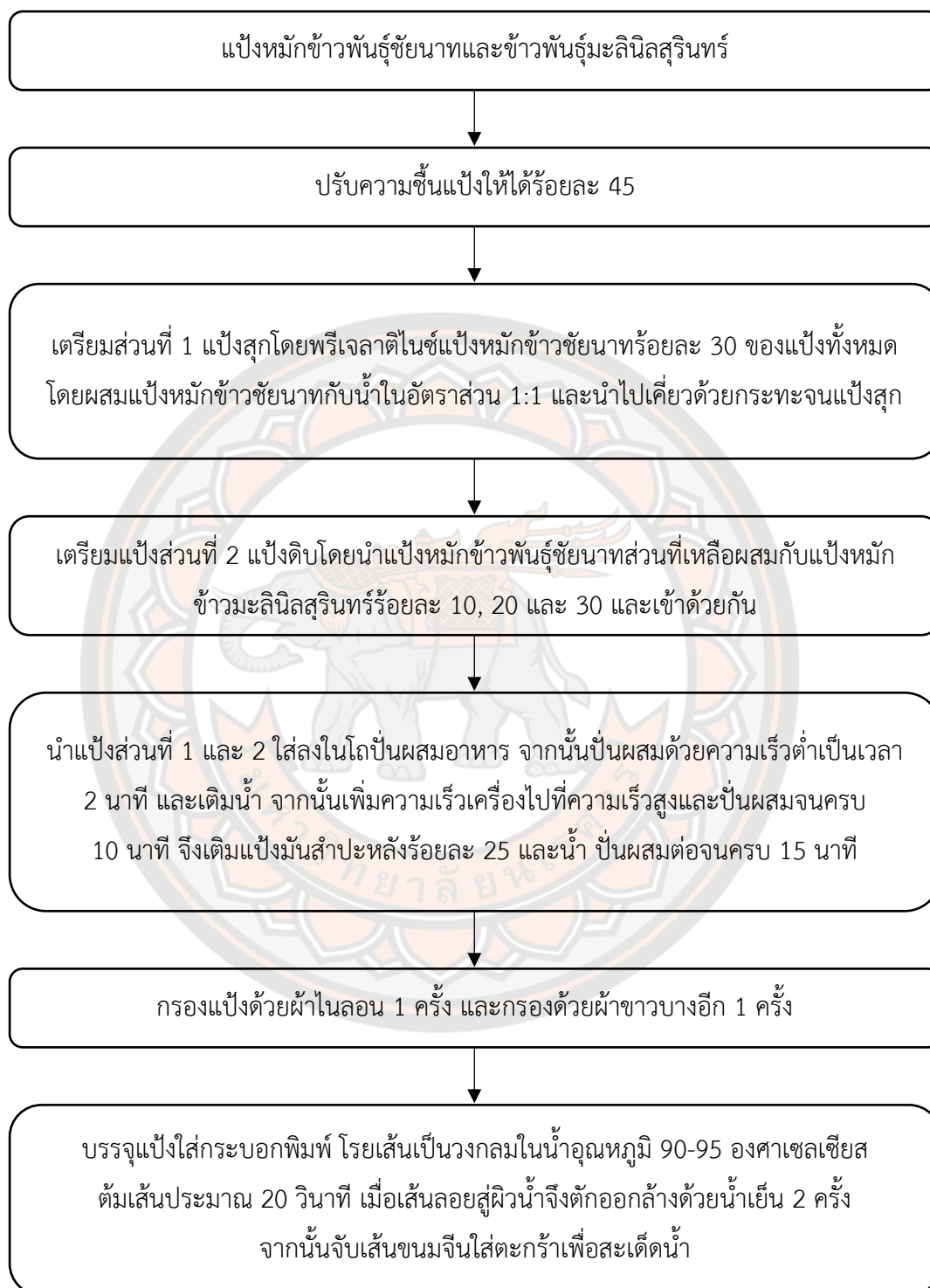
ส่วนที่ 1 แป้งพรีเจลาคีโนซ์ (แป้งสุก)		ส่วนที่ 2 แป้งสำหรับตีผสม (แป้งดิบ)	
แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท	30 กรัม	แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท	50 กรัม
น้ำ	30 กรัม	แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์	20 กรัม
		น้ำ	25 กรัม

2.3 การนวดผสมแป้ง จะทำการนวดผสมด้วยเครื่องผสมอาหาร นำแป้งส่วนที่ 1 ใส่ลงใน โถปั่นผสมอาหารตามด้วยแป้งส่วนที่ 2 ที่ผสมรอไว้ จากนั้นปั่นผสมด้วยความเร็วต่ำเป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้แป้งสุกและแป้งดิบเข้ากันโดยเติมน้ำลงไป 12.5 กรัม จากนั้นเพิ่มความเร็วเครื่องผสมไปที่ความเร็วสูงและปั่นผสมจนครบ 10 นาที จึงเติมแป้งมันสำปะหลัง 25 กรัม และน้ำ 12.5 กรัม ปั่นผสมต่อจนครบ 15 นาที

2.4 การกรอง ทำการกรองด้วยผ้าไนลอน 1 ครั้ง เพื่อกรองส่วนของเม็ดแป้งสุกที่ไม่เข้ากับแป้งดิบออก จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบางอีก 1 ครั้ง

2.5 การโรยเส้น บรรจุแป้งใส่กระบอกลูกพิมพ์ โรยเส้นเป็นวงกลมในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส ต้มเส้นประมาณ 20 วินาที เมื่อเส้นลอยสู่ผิวน้ำจึงตัดออกล้างด้วยน้ำเย็น 2 ครั้ง จากนั้นจับเส้นขนมจีนใส่ตะกร้าเพื่อสะเด็ดน้ำและเก็บตัวอย่างเส้นในถุงซิปล็อคเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

วิธีการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมัก



ภาพ 29 ขั้นตอนการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมัก

3. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ภายภาพของเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่ของ แป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์

3.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่

3.1.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2001)

3.1.2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Shao et al., 2014)

3.1.3 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Jia et al., 1998)

3.1.4 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด โดยวิธี pH difference (AOAC, 2006)

3.1.5 วิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

1) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•] assay (Shao et al., 2014)

2) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS^{•+} assay (Roberta et al., 1999)

3) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP assay (Thitipramote et al., 2016)

3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

3.2.1 วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Hunter lab (Color Reader CR-20, Konica Minolta, Japan) และรายงานผลด้วยค่า L^* (ค่าความสว่าง) a^* (สีเขียว-สีแดง) และ b^* (สีน้ำเงิน-สีเหลือง)

3.2.2 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter (ST3100-F, OHAUS, USA)

ซึ่งตัวอย่างเส้นขนมจีน 10 กรัม นำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ (Sharp, Thailand) กับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นาน 5 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง นำส่วนของเหลวไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter (Yeoh et al., 2013)

3.2.3 วิเคราะห์คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA-HD plus, Stable micro system, UK) วัดเป็นค่าค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Adhesiveness) โดยใช้หัววัดแบบใบมีดตัด light knife blade (A/LKB-F) ทำการเรียงเส้นขนมจีน 5 เส้น ที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ลงบนแผ่นตัด ตัดตัวอย่างโดยวิธีการวัดดังนี้ อัตราเร็วก่อนการทดสอบ (Pre-test speed) 2.0 มิลลิเมตร/วินาที อัตราระหว่างการทดสอบ (Test speed) 2.0 มิลลิเมตร/วินาที และอัตราเร็วหลังการทดสอบ (Post-test speed) 15.0 มิลลิเมตร/วินาที รายงานเป็นค่าความแข็ง (g force) และค่าความเหนียว (g.cm)

3.2.4 วิเคราะห์คุณสมบัติทางรีโอโลยีและความหนืดของน้ำแป้งหลังปั่นผสมด้วยเครื่อง Rheometer (MCR92, Anton Paar, Austria)

1) วิเคราะห์คุณสมบัติด้านรีโอโลยีด้วยหัววัดแบบ Parallel plate ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างเพลทเป็น 1 มิลลิเมตร โดยกำหนด Strain sweep จาก 0.01-10 เปอร์เซ็นต์ บนช่วงความถี่ 0.01-10 เฮิรต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อหาช่วง Viscoelastic linear range จากนั้นทำการวิเคราะห์ Frequency sweeps โดยใช้ Strain ที่ได้จากช่วง Viscoelastic linear range ข้างต้น น้ำแป้งหลังการผสมจะถูกวัดคุณสมบัติด้านรีโอโลยีด้วยโหมดการสั่นแบบไดนามิก (Dynamic oscillatory test) ช่วงความถี่ 0.1-10 เฮิรต และความเครียด (Strain) 0.1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหาค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$)

2) วิเคราะห์ความหนืดของน้ำแป้งหลังผสมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราเฉือน (Shear rate) $0.01-100 \text{ s}^{-1}$ ภายใต้สภาวะแรงเฉือนคงที่

2.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

นำเส้นขนมจีนทั้ง 4 สูตร ที่ผลิตได้มาทดสอบคุณภาพของเส้นขนมจีนทางประสาทสัมผัส ด้วยการทดสอบแบบ 9-points Hedonic scale (1=ไม่ชอบมากที่สุด และ 9=ชอบมากที่สุด) ทำการพิจารณาทางด้าน สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และความชอบโดยรวมของเส้นขนมจีน โดยใช้ผู้ทดสอบชิมเป็นนิสิตภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่มีอายุ 20 ปีบริบูรณ์ขึ้นไป และเป็นนิสิตระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 3 ขึ้นไปโดยไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน มาทดสอบความชอบของผลิตภัณฑ์เพื่อคัดเลือกสูตรต้นแบบและนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ตอนที่ 3 การศึกษาการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ได้จากการแทนที่ของแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งเส้นขนมจีนแป้งหมัก

นำเส้นขนมที่ผ่านการคัดเลือกในตอนที่ 2 ได้แก่ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัชยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 20 มาทำการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้งโดยกรรมวิธีการอบแห้ง 3 วิธี คือ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Tray Dryer), การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying oven) โดยใช้ความดัน 0.2 บาร์ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ (Vacuum Infrared oven) โดยกำหนดรังสีอินฟราเรดที่ 1,700 วัตต์ และความดัน 0.8 บาร์ โดยแต่ละวิธีการทำแห้งมีการแปรระดับอุณหภูมิเป็น 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ดังตาราง 13 โดยจะมีการเติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแป้งแห้งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนอบแห้งหลังคั่ว ทำการเตรียมเส้นขนมจีนตามวิธีข้างต้นโดยจะเติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 ลงไปในแป้งส่วนที่ 1 (ตารางที่ 14) โดยผสมแป้ง

หมักข้าวชัณษาทกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 และเติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 แล้วนำไปเคี่ยวด้วยกระทะจนแป้งสุก

ตาราง 13 สภาวะการอบแห้งเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่ของแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

สภาวะการอบแห้ง	ตู้อบลมร้อน	ตู้อบแห้งสุญญากาศ	ตู้อบแห้งอินฟราเรด สุญญากาศ
ระดับอุณหภูมิ (°C)	50, 60 และ 70	50, 60 และ 70	50, 60 และ 70
ระดับความดัน (Bar)	-	0.2	0.8
ระดับรังสีอินฟราเรด (W)	-	-	1,700

ตาราง 14 อัตราส่วนของแป้งสำหรับตีผสมในการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้ง

ส่วนที่ 1 แป้งพรีเจลาติไนซ์ (แป้งสุก)	ส่วนที่ 2 แป้งพรีเจลาติไนซ์ (แป้งดิบ)
แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัณษาท	แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัณษาท
น้ำ	แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์
แซนแทนกัม	น้ำ
30 กรัม	50 กรัม
30 กรัม	20 กรัม
0.5 กรัม	25 กรัม

2. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเส้นขนมจีนอบแห้ง

2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่

2.1.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2001)

2.1.2 ปริมาณน้ำอิสระ (AOAC, 2000)

2.1.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Shao *et al.*, 2014)

2.1.4 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Jia *et al.*, 1998)

2.1.5 ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด โดยวิธี pH difference (AOAC, 2006)

2.1.6 วิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

1) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•] assay (Shao *et al.*, 2014)

2) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS^{•+} assay (Roberta *et al.*, 1999)

3) ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP assay (Thitipramote

et al., 2016)

2.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

2.2.1 วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Hunter lab (Color Reader CR-20, Konica Minolta, Japan) และรายงานผลด้วยค่า L^* (ค่าความสว่าง) a^* (สีเขียว-สีแดง) และ b^* (สีน้ำเงิน-สีเหลือง)

2.2.2 ทดสอบการคืนตัว (Recovery)

ชั่งตัวอย่างเส้นขนมจีนที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง 2 กรัม และจัดบันทึกน้ำหนัก นำเส้นขนมจีนอบแห้งแช่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 95 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาสะเด็ดน้ำจนแห้ง ชั่งน้ำหนักและคำนวณหาค่าการคืนตัวจากสมการของ (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2559)

$$RR = \frac{m_f}{m_d}$$

เมื่อ RR คือ การคืนตัว (เท่า)

m_d คือ น้ำหนักตัวอย่างเส้นขนมจีนก่อนกระบวนการคืนตัว (กรัม)

m_f คือ น้ำหนักตัวอย่างเส้นขนมจีนหลังกระบวนการคืนตัว (กรัม)

2.2.3 วิเคราะห์คุณภาพด้านการหุงต้ม (AACC, 2000)

1) ระยะเวลาที่เหมาะสมในการหุงต้ม (Cooking time) นำตัวอย่างเส้นขนมจีนแห้ง 5 กรัม แช่น้ำที่อุณหภูมิห้องนาน 20 นาที จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือด 150 มิลลิลิตร ทำการจับเวลาตั้งแต่เส้นขนมจีนลงไปต้ม ต้มให้ใจกลางของเส้นสุก ลักษณะใส

2) ร้อยละของการดูดน้ำ (Cooking yield) นำเส้นขนมจีนที่ผ่านการต้มสุกขึ้นมาสะเด็ดน้ำ แล้วนำเส้นขนมจีนไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละการดูดน้ำ

3) ร้อยละของการสูญเสียของแข็งระหว่างการต้ม (Cooking loss) นำน้ำต้มเส้นขนมจีนเทใส่กระป๋องอะลูมิเนียม อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละของการสูญเสียของแข็งระหว่างการต้ม

2.2.4 วิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer

1) ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Adhesiveness) โดยใช้หัววัดแบบใบมีดตัด light knife blade (A/LKB-F) โดยเรียงเส้นขนมจีนหลังการคืนตัว 5 เส้น ที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ลงบนแท่นตัด วัดตัวอย่างโดยใช้วิธีการวัดดังนี้ อัตราเร็วก่อนการทดสอบ (Pre-test speed) 2.0 มิลลิเมตร/วินาที อัตราระหว่างการทดสอบ (Test speed) 2.0 มิลลิเมตร/วินาที

วินาที และอัตราเร็วหลังการทดสอบ (Post-test speed) 15.0 มิลลิเมตร/วินาที รายงานเป็นค่าความแข็ง (g force) และค่าความเหนียว (g.cm)

2) ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) โดยใช้หัววัด Spaghetti-noodle rig (A/SPR) นำเส้นขนมจีนแห้งแช่น้ำนาน 20 นาที และนำไปต้มในน้ำเดือด 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 นาที ล้างด้วยน้ำเย็นและสะเด็ดน้ำ จากนั้นนำเส้นขนมจีนความยาว 10 เซนติเมตร ผูกมัดกับหัววัด ทำการดึงตัวอย่างด้วยวิธีการวัดดังนี้ อัตราเร็วก่อนการทดสอบ (Pre-test) 2.0 มิลลิเมตร/วินาที อัตราเร็วระหว่างการทดสอบ (Test speeds) 2.0 มิลลิเมตร/วินาที อัตราเร็วหลังการทดสอบ (Post-test) 15 มิลลิเมตร/วินาที ระยะห่าง (Distance) 2.0 มิลลิเมตร และ Trigger force 5.0 กรัม รายงานค่าความต้านทานแรงดึง (g force)

ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการเสริมโพรไบโอติกลงในเส้นขนมจีนอบแห้ง

นำเส้นขนมจีนที่ผ่านการคัดเลือกในตอนต้นที่ 3 ได้แก่ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุศาสตร์ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุศาสตร์มะลินิสสุรินทร้อยละ 20 ที่ผ่านการทำแห้งโดยวิธีการอบด้วยตู้อบลมร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มาทำการศึกษานมจีนอบแห้งเสริมโพรไบโอติก

1. การเตรียมเชื้อโพรไบโอติกเริ่มต้น

1.1 การเตรียมเชื้อ *Bacillus coagulans*

ทำการกระตุ้นเซลล์ปกติ (Vegetative cell) ของ *B. coagulans* ให้มีการเจริญเติบโตโดยถ่ายเชื้อปริมาตร 100 ไมโครลิตร มาเลี้ยงในอาหารเหลว (Nutrient agar) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

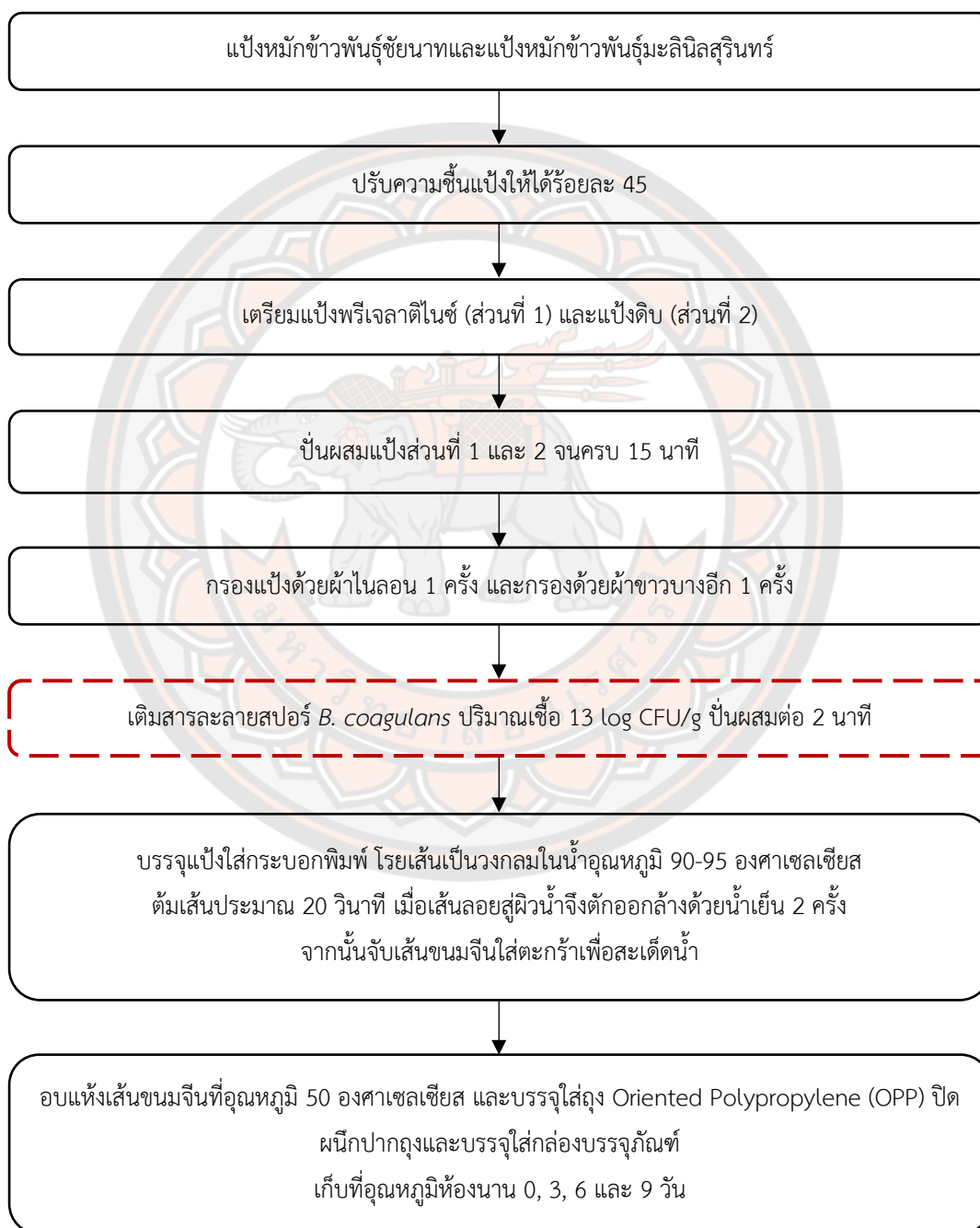
1.2 การเตรียมสปอร์ *B. coagulans*

ทำการถ่ายเชื้อที่ผ่านกระตุ้นเซลล์ 100 ไมโครลิตร ลงบนอาหาร MRS agar ที่เสริมด้วยเดกซ์โทรส (D-glucose) 500 มิลลิกรัม/ลิตร และแมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4 \cdot H_2O$) 3 มิลลิกรัม/ลิตร หลังจากนั้นทำการ Spread plate ทั้งหมด 60 เพลท แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 21 วัน เมื่อครบกำหนดทำการเทเปปโตไนให้ท่วมเชื้อที่เจริญแล้วเกลี่ยเชื้อกองรวมกัน ใช้ไมโครปิเปตต์ดูดสารละลายเชื้อใส่ขวดรูปชมพู่ และนำไปให้ความร้อนเพื่อกำจัดเซลล์เชื้อปกติที่ไม่ต้องการโดยแช่ในอ่างความคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นถ่ายเชื้อใส่หลอดเซนติฟิวร์กขนาด 50 มิลลิลิตร ทำการล้างเซลล์ 2 ครั้ง โดยนำไปแยกตะกอนเชื้อด้วยเครื่องปั่นหมุนเหวี่ยงที่ 9,000 รอบ/นาที นาน 5 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เทส่วนใสทิ้งแล้วเติมน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 10 มิลลิลิตร เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อบริโภคใช้งานต่อไป (Somavat et al., 2013)

2. การเติมสปอร์ *B. coagulans* ลงในเส้นขนมจีน

การเติมสปอร์ของเชื้อ *B. coagulans* ลงในเส้นขนมจีนโดยเติมลงไปในช่วงสุดท้ายของการตีผสมแป้ง ดังภาพ 30

วิธีการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งเสริมโพรไบโอติก



ภาพ 30 ขั้นตอนการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่มีการเติมเชื้อโพรไบโอติก

3. การศึกษาผลของการเสริมโพรไบโอติกลงในเส้นขนมจีน

3.1 ปริมาณจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่รอดชีวิต (Survival count)

เส้นขนมจีนอบแห้งที่ปริมาณ 5 กรัม นำมาเจือจางแบบ ten-fold dilution ในเปปโตน 45 มิลลิลิตร และนำไปนับเชื้อด้วยเทคนิค spread plate บนอาหาร MRS agar บ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง รายงานผลเป็น log cfu/g (Kim et al., 2021)

3.2 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total viable count) โดยวิธี Spread plate (American Public Health Association, 2012)

3.3 ปริมาณยีสต์และรา (Yeast and mold) (BAM, 2001)

3.4 ปริมาณน้ำอิสระ (AOAC, 2000)

3.5 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2001)

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ของแต่ละการทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำผลที่ได้มาทดสอบความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) วางแผนการทดลองเป็นแบบ (Completely Randomized Design; CRD) วิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติในการทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Randomize Completely Block Design; RCBD) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan New Multiple Range Test; DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (IBM SPSS Statistics Base 22.0)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของข้าวและแป้งหมักจากข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิ นิลสุรินทร์

ข้าวหักพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นข้าวจากบริษัท พรารวด ออร์แกนิก จำกัด ตำบลหนองไม้กอง อำเภอไทรงาม จังหวัดกำแพงเพชร ซึ่งเป็นข้าวที่เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนมกราคม 2563 เก็บรักษาไว้เป็นเวลา 6-7 เดือน ก่อนนำมาทำการทดลอง

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ดังตารางที่ 15 พบว่าข้าวพันธุ์ชัยนาท (CHI) มีปริมาณความชื้น โปรตีน และไขมันร้อยละโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 12.45, 6.75 และ 0.13 ตามลำดับ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท (FCHI) มีปริมาณความชื้น โปรตีน และไขมันร้อยละโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 12.70, 4.36 และ 0.05 ตามลำดับ ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ (SU) มีปริมาณความชื้น โปรตีน และไขมันร้อยละโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 10.49, 8.32 และ 3.64 ตามลำดับ และแป้งข้าวหมักพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ (FSU) มีปริมาณความชื้น โปรตีน และไขมันร้อยละโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 10.31, 6.32 และ 3.65 ตามลำดับ ปริมาณโปรตีนของข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์จะมีค่าสูงกว่าข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวหลังผ่านการหมักจะมีปริมาณโปรตีนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักจะมีการสร้าง Proteolytic enzyme ซึ่งย่อยโปรตีนในข้าว นอกจากนั้นข้าวพันธุ์ชัยนาทจะมีปริมาณไขมันลดลงหลังผ่านการหมัก ส่วนปริมาณไขมันของข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ทั้งก่อนและหลังการหมักไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตาราง 15 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)

ตัวอย่าง	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	อะมิโลส	สตาร์ช
CHI	12.45±0.05 ^b	6.75±0.07 ^c	0.13±0.03 ^b	23.29±0.20 ^b	85.88±0.92 ^b
FCHI	12.70±0.12 ^a	4.36±0.34 ^d	0.05±0.00 ^c	25.36±0.54 ^a	88.82±0.23 ^a
SU	10.49±0.09 ^c	8.32±0.04 ^a	3.64±0.00 ^a	7.13±0.07 ^d	72.11±0.40 ^d
FSU	10.31±0.07 ^d	6.32±0.01 ^a	3.65±0.04 ^a	9.46±0.21 ^c	76.76±0.05 ^c

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
 CHI คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท
 FCHI คือ แป้งหมักข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
 SU คือ ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์
 FSU คือ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส (Amylose) และปริมาณสตาร์ชทั้งหมด (Total starch) พบว่าข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีปริมาณอะมิโลสและปริมาณสตาร์ชทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) หลังจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ผ่านขั้นตอนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยปริมาณอะมิโลสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 23.29 เป็นร้อยละ 25.36 และปริมาณสตาร์ชทั้งหมดจากร้อยละ 7.13 เป็นร้อยละ 9.46 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักมีผลต่อปริมาณอะมิโลสและสตาร์ชของข้าว เนื่องจากการไฮโดรไลซ์โมเลกุลของอะมิโลเพคติน (Amylopectin) ด้วยกรดแลคติก (Lactic acid) ที่ถูกผลิตจากจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก (Lu et al., 2007) โดยโมเลกุลของอะมิโลเพคตินที่อยู่ในส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) ที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบในเม็ดแป้ง (Starch granule) จะถูกย่อยด้วยกรดเป็นอันดับแรก (Li et al., 2007) ส่งผลให้ปริมาณอะมิโลสสูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นหลังกระบวนการหมักอาจเกิดจากการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ของแป้งหมัก เช่น โปรตีนและไขมัน ส่งผลให้แป้งหมักมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

ตาราง 16 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ตัวอย่าง	Phenolic content (mg GAE/100g DW)	Flavonoid content (mg CE/100g DW)	Anthocyanin content (mg Cy-3-glu/100g DW)
CHI	244.57 ± 0.35 ^c	11.59 ± 0.51 ^c	ND
FCHI	419.00 ± 17.54 ^c	6.28 ± 0.28 ^c	ND
SU	6,761.90 ± 204.48 ^a	1,114.80 ± 10.69 ^a	12,965.48 ± 982.20 ^a
FSU	3,750.09 ± 118.36 ^b	393.64 ± 10.38 ^b	2,791.43 ± 300.76 ^b

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ND คือ Not Determined

CHI คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท

FCHI คือ แป้งหมักข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

SU คือ ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

FSU คือ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินทั้งหมดของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ และแป้งหมักจากข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แสดงในตาราง 16 ข้าวพันธุ์ชัยนาทมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 244.57 mg gallic acid equivalents/100 g DW และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในข้าวพันธุ์ชัยนาทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง (419.00 mg gallic acid equivalents/100g) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดฟีนอลิก (Phenolic acid) บางชนิดจากการไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ β -glucosidase ที่ผลิตโดยเชื้อรา (Fungi) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก โดย β -glucosidase จะเร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสของพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารประกอบฟีนอลิกและเมทริกซ์ต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของแป้งในระหว่างการหมัก ส่งผลให้สารประกอบฟีนอลิกในตัวอย่างแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทมีปริมาณสูงขึ้น (Shin et al., 2019) ปริมาณฟลาโวนอยด์ในตัวอย่างแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทมีค่าลดลงหลังจากผ่านกระบวนการหมัก ซึ่งเกิดอาจเกิดจากการสูญเสียในระหว่างกระบวนการผลิตแป้ง ตั้งแต่การแช่ข้าว ล้างข้าวผ่านน้ำขณะทำการหมัก และมีการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำ ซึ่งฟลาโวนอยด์ที่พบในธรรมชาติหลาย ๆ กลุ่ม มักอยู่ในรูปไกลโคไซด์ ทำให้สามารถ

ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากมีน้ำตาลเข้ามาจับในโมเลกุล ส่งผลให้เกิดการสูญเสียได้ง่ายระหว่างการผลิต แป้งหมัก (Hiemori et al., 2009) ซึ่ง Lin et al. (2014) พบว่าภายหลังกระบวนการหมักเปลือก ลิ้นจี่ด้วย *Aspergillus awamori* สารประกอบฟีนอลิกมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและมีปริมาณ เพิ่มขึ้นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมและไฮโดรไลติกของเอนไซม์ต่าง ๆ ที่ *A. awamori* ผลิตขึ้นมา ในระหว่างกระบวนการหมัก โดยมีความสอดคล้องกับการหมักข้าวสาลี (Wheat koji) ด้วย *Aspergillus oryzae* มีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงมากขึ้น เมื่อระยะเวลาการหมักมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยสารประกอบฟีนอลิกที่เป็นผลมาจากเอนไซม์ ได้แก่ α -amylase, β -glucosidase และ Xylanase ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของเชื้อรา *A. oryzae* (Bhanja et al., 2009)

ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์เมื่อเข้าสู่กระบวนการหมักจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 16 โดยเป็น ผลมาจากการสูญเสียในระหว่างกระบวนการผลิตแป้งหมัก เนื่องจากในระหว่างกระบวนการหมักเป็น เวลา 72 ชั่วโมง จะมีการนำข้าวหมักมาล้างผ่านน้ำทุก ๆ 24 ชั่วโมง เพื่อลดอัตราการหมักหรือลด จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดระหว่างกระบวนการหมัก ส่งผลให้ปริมาณสารพิษเคมี (Phytochemical) ในตัวอย่างแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ลดลงหลังจากผ่านการหมัก โดยเฉพาะฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติที่ ละลายน้ำได้ดีจึงทำให้เกิดการสูญเสียได้ง่าย ทั้งนี้การลดอัตราการหมักหรือลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ ระหว่างการหมักเพื่อทำการควบคุมไม่ให้เกิดปริมาณกรดสูงหรือค่า pH ต่ำเกินไป มีความสัมพันธ์กับ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น กล่าวคือปริมาณกรดจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH ลดลง (ปราโมทย์ ศิริโรจน์ และคณะ, 2534)

ตาราง 17 แสดงฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ และแป้งหมักจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ด้วย DPPH radical scavenging ability assay (DPPH[•] assay) ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดอนุมูล DPPH[•] ของสารสกัดตัวอย่าง โดยสารสกัด ตัวอย่างจะทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนอะตอมแก่อนุมูลของ DPPH[•] สำหรับ ABTS radical scavenging ability assay (ABTS^{•+} assay) เป็นการทดสอบความสามารถของต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูล ABTS^{•+} ที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (K₂H₂O₈) และ Ferric Reducing Antioxidant Power assay (FRAP assay) เป็นการวัดความสามารถในการรีดิวซ์ของสาร ต้านอนุมูลอิสระต่อสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กหรืออนุมูลอิสระสังเคราะห์ โดยคำนวณในรูปของ mg Trolox equivalents/100 g

ข้าวพันธุ์ชัยนาทเมื่อผ่านกระบวนการหมักจะมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•], ABTS^{•+} และ FRAP assay ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) สำหรับตัวอย่างแป้งหมักจากข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•] assay, ABTS^{•+} assay และ FRAP assay ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการสูญเสียในระหว่างกระบวนการหมักซึ่งในระหว่างการผลิตแป้งหมักมีการล้างด้วยน้ำเพื่อชะลอการหมักและทำความสะอาดแป้ง โดยสารฟลักซ์เคมีในตัวอย่งข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ส่วนใหญ่ที่พบ ได้แก่ แอนโทไซยานิน ซึ่งมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ดี ทำให้เกิดการสูญเสียในระหว่างผลิตแป้งหมัก จึงส่งผลให้ตัวอย่างแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระลดลง โดยมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานิน

ตาราง 17 ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ตัวอย่าง	DPPH [•] assay (mg TE/100g DW)	ABTS ^{•+} assay (mg TE/100g DW)	FRAP assay (mg TE/100g DW)
CHI	56.70 ± 0.85 ^c	209.66 ± 4.44 ^c	391.64 ± 11.76 ^c
FCHI	37.11 ± 0.16 ^c	223.74 ± 4.70 ^c	149.99 ± 4.36 ^c
SU	3,245.82 ± 70.79 ^a	6,313.64 ± 22.16 ^a	11,172.46 ± 897.38 ^a
FSU	1,056.12 ± 15.05 ^b	3,217.51 ± 51.88 ^b	4,777.48 ± 179.00 ^b

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

CHI คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท

FCHI คือ แป้งหมักข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

SU คือ ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

FSU คือ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ดัชนีการละลายน้ำ ดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัว และการละลายของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักจากข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แสดงดังตารางที่ 18 ค่าดัชนีการละลายน้ำแสดงถึงปริมาณสารที่ละลายในน้ำ จากการทดลองพบว่าเมื่อข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ผ่านกระบวนการหมักแล้ว มีค่าดัชนีการละลาย

ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ ซึ่งก่อนหมักและหลังผ่านการหมักมีค่าดัชนีการละลาย 0.16 และ 0.08 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณโปรตีนที่ลดลง (ตาราง 15) หลังผ่านกระบวนการหมัก โปรตีนที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Starch granule) ทำให้เกิดประจุบริเวณพื้นผิวโดยมีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง และส่วนของโปรตีนที่ชอบน้ำมีอัตราส่วนน้อยลง ซึ่งมีผลต่อการจับกับโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้ค่าดัชนีการละลายของแป้งหมักลดลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด, และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

ดัชนีการดูดซับน้ำแสดงถึงปริมาณน้ำที่แป้งดูดซึมเข้าสู่เม็ดแป้ง และเป็นดัชนีบ่งบอกการเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งแตกออกและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลถูกทำลาย น้ำจึงเข้าสู่เม็ดแป้งและจับกับหมู่ไฮดรอกซิลได้มากขึ้น แป้งจึงสามารถดูดซับน้ำได้สูง แป้งที่ได้จากการหมักของข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ มีค่าดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากพันธะของโมเลกุลอะมิโลสถูกทำลายและปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่เพิ่มขึ้นจากการย่อยของกรดที่ได้จากจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมัก โมเลกุลของน้ำจึงเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระได้มากขึ้น

กำลังการพองตัวและการละลาย มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง ซึ่งภายในโครงสร้างของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทั้งส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) และส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline region) จากการทดลองพบว่าเมื่อแป้งผ่านกระบวนการหมัก ส่งผลให้กำลังการพองตัวและการละลายลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากแป้งหมักมีปริมาณอะมิโลเพคตินลดลงจากการถูกย่อยของกรดที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักและมีปริมาณอะมิโลสเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโมเลกุลของอะมิโลสมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นร่างแหของอะมิโลสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วนโครงสร้างของโมเลกุลอะมิโลเพคตินจะมีกิ่งก้านสาขาแตกแขนงออกมาทำให้มีความสามารถในการจับกับน้ำและอุ้มน้ำได้ดี (Leach et al., 1959)

ตาราง 18 ดัชนีการละลายน้ำ ดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัว และการละลายของข้าวพันธุ์ชยันนาท ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชยันนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

ตัวอย่าง	ดัชนีการละลายน้ำ	ดัชนีการดูดซับน้ำ	กำลังการพองตัว (ร้อยละ)	การละลาย (ร้อยละ)
CHI	0.18 ± 0.00 ^a	7.03 ± 0.04 ^d	2.54 ± 0.02 ^a	1.75 ± 0.02 ^b
FCHI	0.15 ± 0.00 ^{ab}	11.41 ± 0.08 ^b	1.93 ± 0.01 ^c	1.01 ± 0.04 ^d
SU	0.16 ± 0.08 ^a	8.98 ± 0.14 ^c	2.12 ± 0.05 ^b	5.81 ± 0.08 ^a
FSU	0.08 ± 0.01 ^b	16.81 ± 0.39 ^a	1.90 ± 0.01 ^c	1.23 ± 0.07 ^c

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

CHI คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ชยันนาท

FCHI คือ แป้งหมักข้าวเจ้าพันธุ์ชยันนาทที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

SU คือ ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

FSU คือ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์ค่าสีของข้าวพันธุ์ชยันนาท ข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ และแป้งหมักจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่าเมื่อข้าวพันธุ์ชยันนาทเข้าสู่กระบวนการหมักจะทำให้แป้งมีความสว่าง (L^*) สูงขึ้น และมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) ลดลง ($p < 0.05$) อาจเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายของโปรตีนและไขมันโดยจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก และอาจเกิดจากการล้างทำความสะอาดแป้งในขั้นตอนการผลิตแป้งหมัก ส่งผลให้แป้งมีความสว่างสูงเพิ่มมากขึ้น และค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองลดลง เช่นเดียวกับข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ที่มีความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลงเมื่อผ่านขั้นตอนการหมัก นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ มีค่าความเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้น ($p < 0.05$) แม้ว่าจะมีการสูญเสียแอนโทไซยานินในระหว่างการหมักและการทำความสะอาด ทั้งนี้อาจเกิดจากความคงตัวที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้างแอนโทไซยานินในสภาวะที่เป็นกรด โดยการเกิดเอซิลเลชัน (Acylation) คือกรดที่เกิดจากกระบวนการหมักเกิดพันธะเอสเทอร์กับน้ำตาล เช่น กรดชิคาปิก กรดคาแพอิก กรดคูมาริก และกรดเฟอร์รูริก เป็นต้น ส่งผลให้แอนโทไซยานินที่มีกรดเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง (Acylated anthocyanin) มีความเสถียรมากขึ้น (Wiczowski et al., 2016) ค่าความเป็นสีแดงของแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์จึงเพิ่มขึ้นดังตาราง 19

ตาราง 19 ค่า pH และค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ตัวอย่าง	pH	ค่าคุณภาพสี		
		L^*	a^*	b^*
CHI	5.94 ± 0.01 ^b	97.70 ± 0.29 ^b	0.00 ± 0.00 ^c	5.03 ± 0.09 ^a
FCHI	4.24 ± 0.01 ^c	99.50 ± 0.14 ^a	-0.13 ± 0.05 ^d	2.49 ± 0.03 ^d
SU	6.32 ± 0.01 ^a	58.90 ± 0.09 ^d	5.30 ± 0.00 ^b	3.50 ± 0.00 ^b
FSU	3.97 ± 0.01 ^d	72.19 ± 0.23 ^c	5.94 ± 0.05 ^a	2.93 ± 0.05 ^c

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
 CHI คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท
 FCHI คือ แป้งหมักข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
 SU คือ ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์
 FSU คือ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตาราง 20 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความหนืดของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA)

ตัวอย่าง	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Final viscosity (cP)	Setback (cP)
CHI	91.35 ± 0.85 ^a	934.80 ± 8.79 ^d	143.00 ± 3.54 ^d	1,664.40 ± 12.52 ^c	729.60 ± 11.99 ^b
FCHI	89.89 ± 0.04 ^b	2,144 ± 11.42 ^b	648.00 ± 8.97 ^c	3,150.40 ± 6.99 ^a	1,020.20 ± 22.83 ^a
SU	90.18 ± 0.43 ^b	1,456 ± 16.53 ^c	672.60 ± 16.21 ^b	1,800 ± 15.94 ^b	343.80 ± 15.32 ^c
FSU	78.42 ± 0.41 ^c	2,292 ± 12.25 ^a	1,368.20 ± 7.69 ^a	1,353.00 ± 8.46 ^d	-939.00 ± 5.43 ^d

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
 CHI คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท
 FCHI คือ แป้งหมักข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
 SU คือ ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์
 FSU คือ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตาราง 20 แสดงผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความหนืดของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ และแป้งหมักจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว ซึ่งเป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิ เวลา และความเร็วยกที่เปลี่ยนไป ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ประกอบด้วยอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด หรืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลลาติไนซ์ (Pasting temperature) ความหนืดที่จุดสูงสุด (Peak viscosity) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Breakdown) ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (Final viscosity) และค่าการคืนตัว (Setback)

จากการศึกษาอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) ของข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวมะลิสีสุรินทร์อยู่ในช่วง 91.35 องศาเซลเซียส และ 90.18 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ เข้าสู่กระบวนการหมักส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าแป้งที่ผ่านกระบวนการหมัก (FCHI และ FSU) มีความสามารถในการเกิดเจลลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก (CHI และ SU) ซึ่งอาจเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของโมเลกุลอะมิโลสเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีอัตราการดูดซับน้ำที่ดีขึ้นเป็นผลให้เม็ดแป้งมีอัตราการเกิดเจลลาติไนซ์ที่ต่ำลง

ความหนืดที่จุดสูงสุด (Peak viscosity) แสดงถึงความสามารถในการจับตัวกับน้ำของแป้งต่อแรงที่ใช้ในการกวนผสม ข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ มีค่า Peak viscosity (934.80-1,456 cP) สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อผ่านกระบวนการหมัก (2,144-2,292 cP) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักส่งผลต่อความหนืดสูงสุดของแป้ง เนื่องจากแป้งมีความบริสุทธิ์มากขึ้นจากกระบวนการย่อยของจุลินทรีย์ ทำให้ปริมาณของอะมิโลสและสตาร์ชสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง

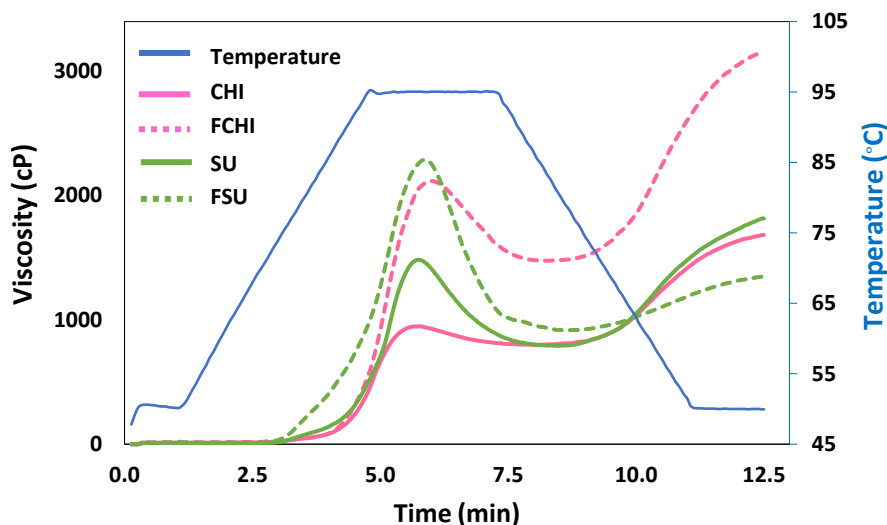
ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Breakdown) แสดงถึงความคงตัวของเม็ดแป้งต่อแรงเฉือนและอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยแป้งที่มีค่า Breakdown สูงจะมีความคงทนระหว่างการให้ความร้อนและแรงเฉือนต่ำ จากการทดลองพบว่าเมื่อข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ ผ่านกระบวนการหมักแล้วมีค่า Breakdown สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการหมักส่งผลต่อความคงทนของเม็ดแป้งในระหว่างการทำให้สุก ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการย่อยองค์ประกอบทางเคมีบางอย่างของแป้งโดยจุลินทรีย์ในระหว่างการหมัก ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความบริสุทธิ์และสามารถแตกตัวได้มากขึ้น

ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (Final viscosity) แสดงถึงลักษณะความหนืดของแป้งเมื่อผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิลง 95 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นที่ 50 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าเมื่อข้าวพันธุ์ชัยนาทเข้าสู่กระบวนการหมักส่งผลให้ค่า Final viscosity สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการคืนตัวของแป้งหมักทั้ง 2 สายพันธุ์ แสดงให้เห็น

ว่าเมื่อข้าวพันธุ์ชัยนาทผ่านกระบวนการหมักจะได้เจลแข็งหลังการคืนตัวที่แข็งมากขึ้น ในขณะที่ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ มีเจลหลังการคืนตัวที่อ่อนแอลงหลังจากผ่านกระบวนการหมัก

ค่าการคืนตัว (Setback) หรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) แสดงถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งเมื่อทำให้เย็นตัวลงหลังจากให้ความร้อน คำนวณได้จากผลต่างของความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) หลังการคืนตัว แป้งจะมีการจับตัวกันโดยเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของอะมิโลสในระหว่างการทำให้เย็น เมื่อข้าวพันธุ์ชัยนาทผ่านกระบวนการหมักพบว่ามีการคืนตัวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากปริมาณของโมเลกุลของอะมิโลสเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้เมื่อให้ความร้อนกับแป้งและทำให้เย็น เจลของแป้งหมักจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ มีค่าการคืนตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) หลังจากผ่านการหมัก ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ มีปริมาณไขมันที่สูง โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนอะมิโลส-ลิพิด (Amylose-lipid complex) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ จึงทำให้โมเลกุลของอะมิโลสถูกขัดขวางในการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เมื่อให้ความร้อนกับแป้งและทำให้เย็น จึงทำให้โมเลกุลของแป้งกลับมาเชื่อมต่อกันยาก ซึ่งมีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของเม็ดแป้ง (ชนิดา หันสวารสดี, 2551)

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักแป้งมีผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวพันธุ์ชัยนาท และข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ โดยแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทมีค่า Peak viscosity, Breakdown, Final viscosity, Setback สูงขึ้น และมีค่า Pasting temperature ต่ำลง และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีค่า Peak viscosity, Breakdown สูงขึ้น และมีค่า Final viscosity, Pasting temperature, Setback ต่ำลงเมื่อผ่านกระบวนการหมัก



ภาพ 31 อะมิโลแกรมของข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว

หมายเหตุ: CHI คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท

FCHI คือ แป้งหมักข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

SU คือ ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

FSU คือ แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นขนมจีนแป้งหมักจากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ทำการศึกษาอัตราส่วนของแป้งหมักที่ใช้การผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักโดยแปรระดับแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทต่อแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 เปรียบเทียบกับเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ไม่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ (ร้อยละ 0)

จากการวิเคราะห์ค่าความชื้น ค่า pH และค่าสีของเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 พบว่าเส้นสดขนมจีนแป้งหมักทั้ง 4 สูตร มีปริมาณความชื้นร้อยละโดยน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง 70.62-71.60 และเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า pH ของเส้นขนมจีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ มีค่า pH ที่ต่ำกว่าแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และเมื่อถูกแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ เพิ่มขึ้นตามลำดับจึงทำให้เส้นขนมจีนมีค่า pH ลดลง แสดงให้เห็นว่าการทดแทน

แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ ลงในเส้นขนมจีนมีผลให้เส้นขนมจีนแป้งหมักมีปริมาณกรดสูงขึ้น หรือค่า pH ลดลง

จากการวิเคราะห์ค่าสีของเส้นขนมจีนแป้งหมัก พบว่าการทดแทนแป้งหมักชัณนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ส่งผลให้ค่าสีของเส้นขนมจีนมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่าเส้นขนมจีนที่ระดับการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ ร้อยละ 0 มีค่าความสว่างสูงที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ สำหรับค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองของเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ ร้อยละ 30 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเส้นขนมจีนที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 20, 10 และ 0 ตามลำดับ โดยระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นทำให้เส้นขนมจีนที่ได้มีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสีเหลืองที่มีโทนสีส้มเล็กน้อย เนื่องจากค่าความเป็นสีแดงมีค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์เป็นข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วงดำ ค่า pH ของข้าวมีค่า 6.32 และเมื่อเข้าสู่กระบวนการหมักค่า pH จะต่ำลงโดยมีค่าเท่ากับ 3.97 (ตารางที่ 21) ส่งผลให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ flavylum cation ซึ่งให้สีเป็นโทนสีแดงและมีความเสถียรในสภาวะที่เป็นกรด (McDougall et al., 2007) ส่งผลให้เส้นขนมจีนมีสีที่เข้มขึ้นเมื่อระดับการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ เพิ่มขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปณิตนัท วชิรศิริ, และกิตติพงษ์ ห่วงรักษ์ (2554) ซึ่งได้ทดลองผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักโดยทดแทนข้าวขาวด้วยข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก พบว่า การทดแทนข้าวขัดขาวด้วยข้าวกล้องส่งผลให้เส้นขนมจีนมีค่าความสว่างลดลงเมื่อระดับการทดแทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 และมีค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อการทดแทนข้าวขาวเพิ่มขึ้น เนื่องจากรงควัตถุที่พบในส่วนเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการสีเพียง 1 ครั้ง จึงทำให้เส้นขนมจีนมีสีคล้ำมากขึ้น

ตาราง 21 ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) ค่า pH และค่าสีของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุส์ชันนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์

ระดับการแทนที่ (ร้อยละ)	ความชื้น	pH	ค่าคุณภาพสี		
			L*	a*	b*
0	71.22±0.24 ^{ab}	6.12±0.00 ^a	70.61±0.32 ^a	-2.15±0.05 ^d	0.91±0.03 ^d
10	71.60±0.16 ^a	5.58±0.01 ^b	42.25±0.15 ^b	5.90±0.00 ^c	0.96±0.07 ^c
20	70.62±0.34 ^b	5.05±0.00 ^c	31.61±0.23 ^c	7.88±0.06 ^b	1.68±0.06 ^b
30	71.48±0.46 ^a	4.98±0.00 ^d	25.61±0.23 ^d	8.90±0.07 ^a	2.15±0.05 ^a

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

0 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 0

10 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 10

20 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 20

30 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 30

ตาราง 22 แสดงปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินทั้งหมดของเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 เมื่อระดับการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการทดแทนด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ที่ร้อยละ 0-30 จะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 247.15-446.57 mg GAE/100g DW เส้นขนมจีนที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุดคือเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ที่ระดับสูงสุดคือร้อยละ 30 รองลงมาคือเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ที่ร้อยละ 20, 10 และ 0 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานินทั้งหมดในเส้นขนมจีนอยู่ในช่วง 14.45-51.68 mg CE/100g DW และ 14.06-46.92 mg Cy-3-glu/100g DW ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุส์ชันนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์ ส่งผลให้เส้นขนมจีนมีปริมาณฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานินทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากข้าวพันธุส์มะลินิลสุรินทร์มีสารพฤกษเคมี ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินสูงกว่าข้าวพันธุส์ชันนาท ทำให้เส้นขนมจีนที่ถูก

แทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และ แอนโทไซยานินเพิ่มมากขึ้น

ตาราง 22 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์

ระดับการแทนที่ (ร้อยละ)	Phenolic content (mg GAE/100g DW)	Flavonoid content (mg CE/100g DW)	Anthocyanin content (mg Cy-3-glu/100g DW)
0	247.15 ± 7.11 ^d	ND	ND
10	270.27 ± 6.71 ^c	14.45 ± 0.52 ^c	14.06 ± 1.08 ^c
20	392.72 ± 4.24 ^b	30.84 ± 0.27 ^b	36.85 ± 2.15 ^b
30	446.57 ± 8.33 ^a	51.68 ± 0.91 ^a	46.92 ± 1.53 ^a

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ND คือ Not Determined

0 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 0

10 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 10

20 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 20

30 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 30

ตาราง 23 แสดงประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระของเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ด้วยวิธี DPPH*, ABTS** และ FRAP assay จากการทดลองพบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของเส้นขนมจีนมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์เพิ่มขึ้น โดยเส้นขนมจีนที่ผ่านการทดแทนด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ที่ร้อยละ 0 ถึง 30 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH*, ABTS** และ FRAP assay อยู่ในช่วง 25.53-139.23, 190.11-359.90 และ 110.82-390.06 mg TE/100g DW ตามลำดับ เส้นขนมจีนที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดคือเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 30 รองลงมาคือร้อยละ 20, 10 และ 0 ตามลำดับ

ตาราง 23 ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุชยันนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์

ระดับการแทนที่ (ร้อยละ)	DPPH [*] assay (mg TE/100g DW)	ABTS ^{**} assay (mg TE/100g DW)	FRAP assay (mg TE/100g DW)
0	25.53±0.56 ^d	190.11±1.44 ^d	110.82±2.14 ^d
10	55.21±0.14 ^c	233.56±5.26 ^c	232.34±9.61 ^c
20	94.96±13.75 ^b	292.13±8.68 ^b	358.33±13.26 ^b
30	139.23±22.99 ^a	359.90±6.46 ^a	390.06±14.81 ^a

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

0 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 0

10 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 10

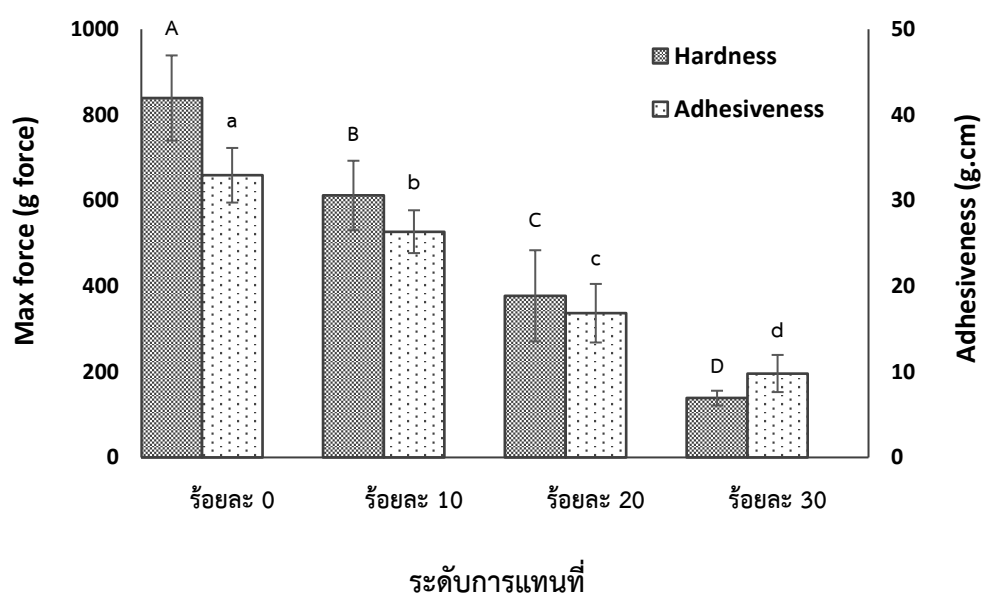
20 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 20

30 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 30

ภาพ 32 แสดงลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งชยันนาทหมักด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ซึ่งค่าแรงสูงสุด (Maximum force) แสดงถึงความแข็ง (Hardness: g force) หรือค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการกดหัววัดลงบนตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน ถ้าใช้แรงกดมากแสดงถึงตัวอย่างมีความแข็งมาก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ประเมินความคงทนของตัวอย่างต่อการหุงต้มได้ และค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (Adhesiveness: g.cm) บ่งบอกถึงแรงที่ต้องใช้ในการดึงหัววัดออกจากผิวหน้าของตัวอย่างจากการกดครั้งแรกเมื่อตัวอย่างเกาะกับผิวอื่น ถ้ามีแรงเกาะที่ผิวหน้าสูงแสดงว่าใช้แรงในการแยกตัวอย่างออกจากกันมาก

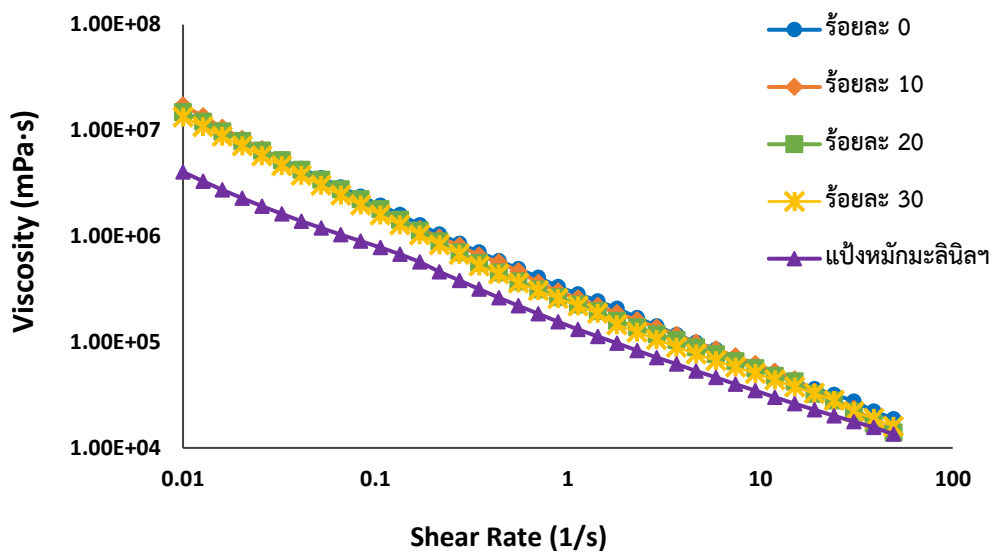
จากการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุชยันนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ในระดับต่าง ๆ พบว่าเมื่อระดับการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นขนมจีนแป้งหมักมีค่าความแข็งและค่าการยึดเกาะลดลง ($p < 0.05$) ตามระดับการแทนที่ที่เพิ่มมากขึ้น โดยค่าความแข็งและค่ายึดเกาะของเส้นขนมจีนอยู่ในช่วง 138.59-839.44 g force และ 9.80-32.95 g.cm ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ลงในเส้นขนมจีน จะทำให้เส้นขนมจีนมีลักษณะที่แข็งและมีความยึดเกาะลดลงตามระดับการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น โดยเส้นขนมจีนที่ไม่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิลสุรินทร์ (ร้อยละ 0) จะมีค่าความแข็งและความยึดเกาะสูงที่สุด และเส้นขนมจีนที่ผ่าน

การแทนที่ ร้อยละ 30 จะมีค่าความแข็งและการยึดเกาะต่ำที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของภายในเม็ดแป้งของแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ กล่าวคือจากการศึกษาเบื้องต้นของแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ พบว่าแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์มีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ต่ำกว่าแป้งหมักข้าวพันธุชัยนาทหลังจากผ่านกระบวนการหมัก เนื่องจากแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ยังคงมีปริมาณไขมันหลงเหลืออยู่ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอะมิโลส-ลิพิดที่ไม่ละลายน้ำและโปรตีนที่เกาะอยู่รอบ ๆ เม็ดแป้ง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลอะมิโลสในระหว่างการคั่วตัวของแป้งหลังให้ความร้อน (Park et al., 2020) ดังนั้นจึงทำให้การคั่วตัวของแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เส้นขนมจีนที่ได้จึงมีความอ่อนนุ่มมากขึ้นและความเหนียวในการยึดเกาะลดลง



ภาพ 32 ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (Adhesiveness) ของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์

หมายเหตุ: อักษรพิมพ์เล็กและพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



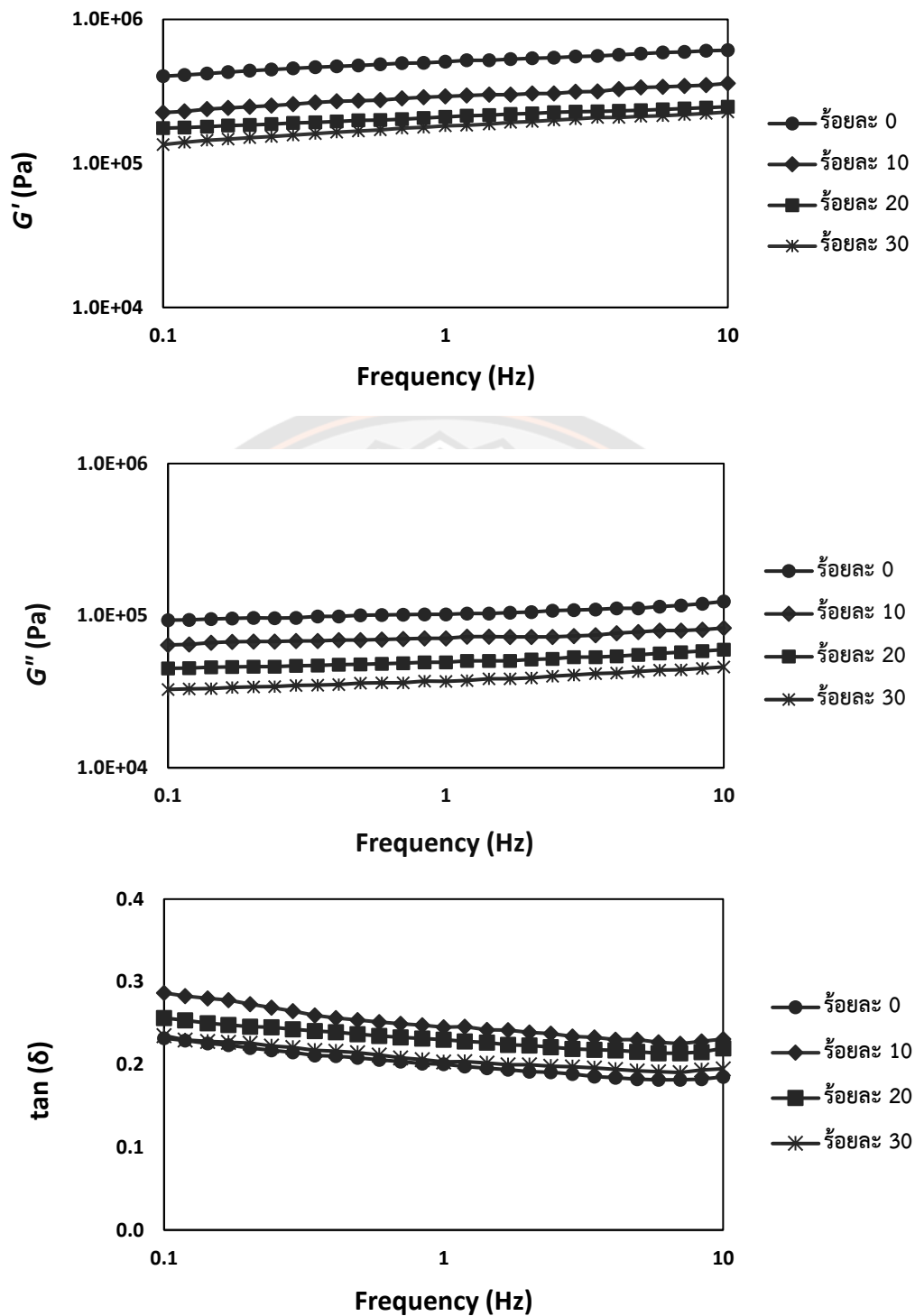
ภาพ 33 ความสัมพันธ์ของความหนืดและอัตราเฉือนของน้ำแป้ง (Fermented rice noodle paste) ก่อนโรยเส้นที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (Viscosity) และอัตราการเฉือน (Shear rate) ของน้ำแป้งก่อนโรยเส้นที่ผ่านการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัชยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ระดับต่าง ๆ แสดงดังภาพ 33 เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นค่าความหนืดของน้ำแป้งมีแนวโน้มลดลงในทุกตัวอย่าง ซึ่งแสดงการไหลประเภท Non-newtonian และแสดงลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic หรือ Shear-thinning จากกราฟจะเห็นว่าความหนืดสุดท้ายต่ำกว่าความหนืดช่วงเริ่มต้นของการให้แรงเฉือน ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างบางส่วนของแป้งเกิดความเสียหายหรือมีคั่งตัวลดลงเมื่อระดับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Inglett et al. (2005) ที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของแป้งในการทำเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีข้าวโอ๊ตเป็นองค์ประกอบในระดับที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าน้ำแป้งเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีข้าวโอ๊ตเป็นองค์ประกอบแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear-thinning

ภาพ 34 แสดงค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) ของน้ำแป้ง (Fermented rice noodle paste) ก่อนโรยเส้นที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัชยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ทำการวิเคราะห์แบบสั่นทางพลวัต (Dynamic oscillation) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเค้น (Stress) หรือความเครียด (Strain) ภายใต้การเคลื่อนที่แบบสั่นของวัสดุ เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ Strain ที่อยู่ในช่วง Linear viscoelastic range โดยทดสอบแบบ Amplitude sweep test กำหนดช่วง

Strain จาก 0.01-10% ที่ความถี่ 0.01-10 เฮิรตซ์ ซึ่งได้ค่าเปอร์เซ็นต์ Strain ที่ 0.1% จากนั้นถูกนำไปใช้ในการทดสอบ Frequency sweep test ที่ความถี่ 0.1-10 เฮิรตซ์ โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ได้แก่ Storage modulus (G') คือมอดูลัสกักเก็บ เป็นค่าพลังงานที่สะสมอยู่ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด แสดงถึงลักษณะความเป็นของแข็งที่มีความยืดหยุ่น (Elastic) และค่า Loss modulus (G'') คือมอดูลัสสูญเสีย เป็นค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาเป็นความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากความหนืด แสดงถึงลักษณะความเป็นของเหลวที่มีความข้นหนืด (ปาริตา ขุนแอ, 2550; ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์, 2561)





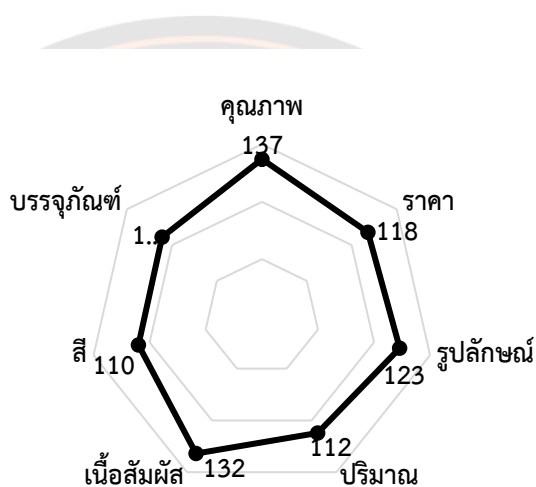
ภาพ 34 ค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) ของ น้ำแป้งก่อนโรยเส้นที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุชยันนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ มะลินิล สุรินทร์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 จากการทำให้ frequency sweep test

จากการศึกษาค่า G' และ G'' ของน้ำแป้งที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ที่ระดับต่าง ๆ พบว่าที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ น้ำแป้งที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ ร้อยละ 0 ถึง 30 จะมีค่า G' สูงกว่า G'' แสดงให้เห็นว่าน้ำแป้งที่ได้จากการแทนที่ดังกล่าวมีลักษณะความเป็นของแข็ง (Solid-like characteristic) มากกว่าความเป็นของเหลว (Liquid-like characteristic) ค่า G' และ G'' ของน้ำแป้งที่มีระดับการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ สูงขึ้นจะทำให้ค่า G' และ G'' ลดลงตามลำดับ โดยสูตรที่ไม่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ (แทนที่ร้อยละ 0) มีค่า G' และ G'' สูงที่สุด และสูตรที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ ร้อยละ 30 มีค่า G' และ G'' ต่ำที่สุด แป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ มีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของน้ำแป้ง โดยน้ำแป้งที่มีแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์สูงสุด จะมีลักษณะที่ยืดหยุ่นหรือลักษณะเป็นของแข็งต่ำที่สุด เป็นผลมาจากการเกิดโครงสร้างที่อ่อนแอของน้ำแป้ง จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความหนืด (Rapid Visco Analyzer) ของแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ พบว่าแป้งมีความสามารถคงทนระหว่างการให้ความร้อนและการกวนต่ำกว่าแป้งข้าวชั๊นนาท เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยส่งผลในการเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาภายในโครงสร้างของแป้ง (ชนิดา หันสวารสดี, 2551) นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ มีปริมาณอะมิโลสที่ต่ำกว่าแป้งหมักข้าวพันธุชั๊นนาท เมื่อทำการแทนที่ลงในน้ำแป้งจึงอาจเป็นผลให้อัตราส่วนของอะมิโลสต่ำลง ซึ่งมีผลต่อการสร้างพันธะภายในโครงสร้างของเม็ดแป้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jeong et al. (2017) ทำการศึกษาการเตรียมแป้งโดสำหรับทำเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีการเติม Zein ลงในแป้งข้าวที่มีระดับของปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 12, 19 และ 26) พบว่าแป้งโดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงที่สุด (ร้อยละ 26) มีค่า G' และ G'' สูงที่สุด ซึ่งให้เห็นว่าแป้งโดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงที่สุดมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่น (Elastic properties) สูงสุด

ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) คืออัตราส่วนพลังงานที่สูญเสียต่อพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุ ($\tan \delta = G''/G'$) (Oh et al., 2020) จากการศึกษาค่า $\tan \delta$ ของน้ำแป้งที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ที่ระดับต่าง ๆ พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของน้ำแป้งที่มีความเป็นของแข็งและความยืดหยุ่น

จากการประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสของเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุชั๊นนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุละลินิลสุรินทร์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยการนำขนมจีนเส้นสดมาทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9-points Hedonic scale ซึ่งเป็นการประเมินโดยการให้คะแนนความชอบตามคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ เพื่อศึกษาความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เส้น

ขนมจีนแป้งหมัก จากการศึกษาปัจจัยในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแป้งหมักจากการแทนที่ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ของผู้บริโภคดังภาพ 35 พบว่าปัจจัยที่สำคัญที่ผู้บริโภคพิจารณาซื้อผลิตภัณฑ์ คือ คุณภาพของเส้นขนมจีน รองลงมาได้แก่ เนื้อสัมผัส รูปลักษณ์ ราคา ปริมาณ บรรจุภัณฑ์ และสีของเส้นขนมจีน สำหรับลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคตัดสินใจเลือกซื้อเส้นขนมจีนแป้งหมักจากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์เพราะลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนและมีประโยชน์ต่อร่างกาย ผลิตภัณฑ์มีความแปลกใหม่ และสีของเส้นขนมจีนมีความน่าสนใจดังภาพ 36



ภาพ 35 ปัจจัยในการซื้อผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแป้งหมักจากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ร้อยละ 10, 20 และ 30 ผู้ทดสอบชิมยอมรับในระดับบอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ (5.87, 5.63 และ 5.03 คะแนน) ส่วนลักษณะประสาทสัมผัสทางด้านรสชาติ ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเส้นขนมจีนที่ไม่ผ่านการแทนที่สูงที่สุด (7.33 คะแนน) แสดงถึงผู้ทดสอบชิมยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับชอบปานกลาง เมื่อเทียบกับเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 มีคะแนนไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) เท่ากับ 6.60 และ 6.27 คะแนน แสดงถึงผู้ทดสอบชิมยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับชอบเล็กน้อย และที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 30 ผู้ทดสอบชิมยอมรับในระดับบอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ (5.40 คะแนน) สำหรับลักษณะเนื้อสัมผัสทางด้านความแข็งและความเหนียวของเส้นขนมจีน ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเส้นขนมจีนที่ไม่ผ่านการแทนที่สูงที่สุดเท่ากับ 6.97 และ 7.07 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 มีคะแนนด้านความแข็งและความเหนียวอยู่ในระดับชอบเล็กน้อย ($p<0.05$) และที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 30 ผู้ทดสอบชิมยอมรับในระดับบอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ เมื่อพิจารณาค่าความชอบโดยรวมของเส้นขนมจีนพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) กลุ่มผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมแก่ผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนที่ไม่ผ่านการแทนที่สูงที่สุด โดยมีคะแนนเท่ากับ 7.53 คะแนน แสดงถึงผู้ทดสอบชิมยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับชอบปานกลาง เมื่อเทียบกับเส้นขนมจีนสูตรอื่น ๆ พบว่าเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 มีคะแนนการยอมรับอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเส้นขนมจีนแป้งหมักทั้ง 4 ชนิด พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดแก่ผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ร้อยละ 0 ($p<0.05$) รองลงมา ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความประสงค์ที่จะเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเส้นขนมจีนด้วยการเติมแป้งหมักจากข้าวกล้องสายพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ ซึ่งเป็นข้าวที่มีคุณประโยชน์สูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเลือกเส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 20 มาทำการศึกษาต่อในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าและคะแนนการยอมรับด้านเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันระหว่างผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนที่ผ่านการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20

ตาราง 24 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีศรีรินทร์

ลักษณะทางประสาทสัมผัส	คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ระดับการแทนที่ต่าง ๆ		
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 10	ร้อยละ 20
ลักษณะปรากฏ			
- สี (Color)	6.90 ± 0.92 ^a	6.17 ± 0.95 ^b	6.97 ± 0.67 ^a
- การเกาะติดกัน (Adhesive)	7.23 ± 1.07 ^a	6.63 ± 1.06 ^{ab}	6.53 ± 1.41 ^b
กลิ่น (Order)			
- กลิ่นเส้นขนมจีน (Fermented Rice Noodle smell)	6.97 ± 1.40 ^a	5.87 ± 1.66 ^b	5.63 ± 1.38 ^{bc}
รสชาติ (Taste)			
- รสชาติ (Taste)	7.33 ± 1.12 ^a	6.60 ± 1.28 ^b	6.27 ± 1.44 ^b
เนื้อสัมผัส (Texture)			
- ความแข็ง (Hardness)	6.97 ± 1.22 ^a	6.20 ± 1.40 ^b	6.17 ± 1.37 ^b
- ความเหนียว (Adhesiveness)	7.07 ± 1.17 ^a	6.23 ± 1.33 ^b	6.33 ± 1.27 ^b
ความชอบโดยรวม (Overall characteristics)			
- ความชอบโดยรวม (Overall characteristics)	7.53 ± 1.22 ^a	6.70 ± 1.40 ^b	6.53 ± 1.17 ^b

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันบนอนแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ร้อยละ 0 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีศรีรินทร์ร้อยละ 0
 ร้อยละ 10 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีศรีรินทร์ร้อยละ 10
 ร้อยละ 20 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีศรีรินทร์ร้อยละ 20
 ร้อยละ 30 คือ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีศรีรินทร์ร้อยละ 30

ตอนที่ 3 การศึกษาการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้งที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

นำเส้นขนมจีนที่ผ่านการคัดเลือกในตอนที่ 2 ได้แก่ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 20 มาทำการผลิตเส้นขนมจีนอบแห้งโดยกรรมวิธีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Tray Dryer), การอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying oven) และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ (Vacuum Infrared oven) โดยแปรระดับอุณหภูมิที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในเส้นขนมจีน ดังตารางที่ 25 พบว่าปริมาณความชื้นของเส้นขนมจีนอบแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 9.02-9.80 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแห้งโดยผลิตภัณฑ์ต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (มผช, 140/2556) เมื่อเปรียบเทียบเส้นขนมจีนอบแห้งจากกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 แบบ จะเห็นได้ว่าเส้นขนมจีนอบแห้งมีปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกัน

ค่าออสโมเตอร์แอกติวิตี (a_w) (ตาราง 25) เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหารมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้บอกปริมาณน้ำที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถใช้ในการเจริญเติบโตได้ตลอดจนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ ค่า a_w ของเส้นขนมจีนอบแห้งที่ได้จากการอบทั้ง 3 วิธี อยู่ในช่วง 0.35-0.43 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปริมาณน้ำอิสระตามมาตรฐานอาหารแห้ง ($a_w < 0.6$) (นิธิยา รัตนพานนท์, 2549) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งโดยกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 วิธี และอุณหภูมิ 3 ระดับ มีปริมาณน้ำอิสระอยู่ในเกณฑ์ที่เชื้อจุลินทรีย์เกือบทุกชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ทั้งนี้ควรบรรจุผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนอบแห้งในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันการดูดความชื้นกลับ ซึ่งมีผลต่อการเสื่อมเสียสภาพและเสียคุณภาพ

ค่าความสว่าง (L^*) ของตัวอย่างเส้นขนมจีนอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 56.69-59.43 โดยเส้นขนมจีนอบแห้งที่มีค่าความสว่างสูงสุด ได้แก่ เส้นขนมจีนแห้งที่ผ่านการอบแห้งแบบอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 12 นาที และเส้นขนมจีนอบแห้งที่มีค่าความสว่างต่ำสุด ได้แก่ เส้นขนมจีนแห้งที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 270 นาที ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) อยู่ในช่วง 6.50-7.80 โดยเส้นขนมจีนอบแห้งที่มีค่าความเป็นสีแดงสูงสุด ได้แก่ เส้นขนมจีนแห้งที่ผ่านการอบแห้งแบบอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 270 นาที และเส้นขนมจีนอบแห้งที่มีค่าความเป็นสีแดงต่ำสุด ได้แก่ เส้นขนมจีนแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 80 นาที สำหรับค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 4.70-5.64 โดยเส้นขนมจีนอบแห้งที่มีค่าความเป็นสีเหลืองสูงสุด ได้แก่ เส้นขนมจีนแห้งที่ผ่านการอบแห้งแบบอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส นาน 22 นาที และเส้นขนมจีนอบแห้งที่มีค่าความเป็นสีเหลืองต่ำสุด ได้แก่ เส้นขนมจีนแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 80 นาที จากภาพ 37 จะเห็นได้ว่าสีของเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งทั้งสามวิธี มีสีที่ค่อนข้างเข้มเป็นสีออกม่วงเข้มเหลืองแดง เนื่องจาก แอนโทไซยานินที่ปรากฏอยู่ในข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ อยู่ในรูปแบบของ Quinoidal เป็นรงควัตถุที่ให้สีเป็นสีม่วงที่ค่า pH ช่วงกว้าง และเมื่อผ่านกระบวนการหมักแล้วจะส่งผลต่อโครงสร้างของแอนโทไซยานินบางชนิด โดยจะเปลี่ยนรูปแบบไปอยู่ในรูป Flavylium cation ซึ่งเสถียรที่ค่า pH ต่ำ ($\text{pH} \approx 1-3$) และเป็นรงควัตถุให้สารสีแดง (Castaneda-Ovando et al., 2009)



ภาพ 37 เส้นขนมจีนแห้งที่ผ่านการอบแห้งที่แบ่งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ด้วยแบ่งหมักข้าวพันธุ่มะลินิลสุรินทร์ร้อยละ 20 อบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน

หมายเหตุ: TD คือ เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส
 VD คือ เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส
 IRD คือ เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

ตาราง 25 ความชื้น วอเตอร์แอคทีวิตี้ (a_w) และค่าสีของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

การอบแห้ง	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น (ร้อยละ)	a_w	ค่าสี		
				L*	a*	b*
ตูบลมร้อน (Tray Dryer; TD)	50	9.44 ± 0.18 ^{ab}	0.40 ± 0.00 ^c	57.20 ± 0.18 ^e	6.52 ± 0.04 ^e	5.19 ± 0.03 ^e
	60	9.35 ± 0.12 ^{ab}	0.39 ± 0.01 ^d	58.59 ± 0.63 ^{bc}	6.50 ± 0.00 ^e	4.70 ± 0.00 ^h
	70	9.30 ± 0.14 ^b	0.39 ± 0.00 ^d	58.18 ± 0.06 ^d	6.76 ± 0.51 ^d	4.90 ± 0.00 ^s
ตูบแห้งสุญญากาศ (Vacuum Drying Dryer; VD)	50	9.44 ± 0.43 ^{ab}	0.43 ± 0.01 ^a	56.69 ± .011 ^f	7.80 ± 0.00 ^a	5.29 ± 0.03 ^d
	60	9.80 ± 0.36 ^a	0.43 ± 0.00 ^a	57.16 ± 0.98 ^e	7.79 ± 0.03 ^a	5.34 ± 0.05 ^c
	70	9.25 ± 0.18 ^b	0.41 ± 0.01 ^b	58.50 ± 0.39 ^{bcd}	7.42 ± 0.13 ^c	5.13 ± 0.05 ^f
ตูบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศ (Vacuum infrared Dryer; IRD)	50	9.47 ± 0.15 ^{ab}	0.39 ± 0.00 ^d	58.22 ± 0.06 ^{cd}	7.77 ± 0.05 ^a	5.30 ± 0.00 ^d
	60	9.35 ± 0.36 ^{ab}	0.37 ± 0.00 ^e	58.76 ± 0.11 ^b	7.76 ± 0.05 ^a	5.64 ± 0.05 ^a
	70	9.02 ± 0.10 ^b	0.35 ± 0.00 ^f	59.43 ± 0.16 ^a	7.51 ± 0.03 ^b	5.60 ± 0.00 ^b

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวัดอัตราการคืนตัวของเส้นขนมนเงินแบงก์ที่ผ่านการอบแห้งทั้งสามวิธี (ตาราง 26) พบว่าเส้นขนมนเงินมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.10-4.16 เท่า เส้นขนมนเงินที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ มีอัตราการคืนตัวสูงที่สุดโดยมีอัตราการคืนตัวอยู่ในช่วง 3.43-4.16 เท่า และอัตราการคืนตัวมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบสูงขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจากการให้รังสีอินฟราเรดในระบบสุญญากาศจะช่วยให้การทำแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยใช้ระยะเวลาการเกิดความร้อนที่สั้น และเมื่อเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิสูง จะส่งผลให้อุณหภูมิภายในเส้นขนมนเงินสูงขึ้นด้วย เนื่องจากอัตราการสิ้นสลายของโมเลกุลน้ำสูงขึ้น เป็นผลทำให้โครงสร้างภายในเส้นขนมนเงินมีรูพรุนหรือฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ น้ำภายในเส้นขนมนเงินจึงเกิดการแพร่สู่วิวของเส้นขนมนเงินได้อย่างรวดเร็ว และลักษณะเส้นที่ได้จะมีพื้นผิวที่เรียบ เส้นค่อนข้างตรง แต่ที่พื้นผิวเส้นจะมีการพองตัวเกิดขึ้น จากการมีรูพรุนภายในโครงสร้างของเส้นขนมนเงิน จึงทำให้เส้นขนมนเงินที่ผ่านการอบด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีอัตราการคืนตัวกลับที่สูง (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560)

เส้นขนมนเงินที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิต่างกันจะมีอัตราการคืนตัวที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.10-3.21 เท่า เส้นขนมนเงินที่ได้จากการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะมีลักษณะผิวเรียบ เส้นตรง และมีลักษณะเล็กกว่าการอบแห้งด้วยวิธีอื่น โดยมีอัตราการคืนตัวต่ำกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ เนื่องจากการอบแห้งภายใต้สุญญากาศทำให้น้ำภายในเส้นขนมนเงินระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ หรือเป็นการทำแห้งภายใต้แรงดันต่ำ (Low pressure) เป็นผลให้น้ำระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งเกิดจากความต่างของความดันระหว่างความดันไอภายในเส้นขนมนเงินกับผิวหน้าของเส้นขนมนเงินที่สัมผัสกับสภาวะสุญญากาศภายในตู้อบ (Ienergyguru, 2015) ทำให้น้ำในเส้นขนมนเงินระเหยกลายเป็นไอ ทั้งนี้อาจเป็นผลให้เส้นขนมนเงินที่ได้จากการอบลมร้อนในสภาวะสุญญากาศมีอัตราการพองตัวของเม็ดสตาร์ช หรือการเดือดของน้ำภายในเส้นขนมนเงินต่ำ ส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวภายในเส้นขนมนเงินเกิดรูพรุนน้อย และมีอัตราการคืนตัวที่ต่ำกว่าเส้นขนมนเงินที่ผ่านการอบด้วยลมร้อนและอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ โดยภราดร หนูทอง และคณะ (2560) ทำการศึกษาการถ่ายเทมวลและกระบวนการอบแห้งขนมนเงินด้วยอินฟราเรดช่วงกำลังวัตต์ 200-400 วัตต์ และอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของขนมนเงินอบแห้ง จากการทดลองพบว่าเส้นขนมนเงินที่ผ่านการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (3.73-4.17 เท่า) มีอัตราการคืนตัวสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา (3.39-3.85 เท่า) และเมื่อพิจารณาพื้นผิวของขนมนเงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 400 เท่าพบว่าเส้นขนมนเงินที่ผ่านการอบด้วยอินฟราเรดมีโครงสร้างภายในที่มีขนาดรูพรุนสูงกว่าเส้นขนมนเงินที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ ซึ่งการอบแห้งด้วยลมร้อนเส้นขนมนเงินจะมีลักษณะหดตัวเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น

จากการวิเคราะห์คุณภาพของเส้นขนมจีนอบแห้งหลังการต้ม (Cooking quality) ดังตาราง 26 พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการต้ม (Cooking time) เส้นขนมจีนอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับมีระยะเวลาในการต้มให้สุกอยู่ในช่วง 9.07-9.49 นาที เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ มีระยะเวลาในการต้มสุกอยู่ในช่วง 7.07-10.29 นาที และเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ มีระยะเวลาในการต้มสุกอยู่ในช่วง 3.27-6.09 นาที ซึ่งเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาที่ใช้ในการต้มสุกสูงที่สุดเท่ากับ 10.29 นาที และเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาที่ใช้ในการต้มสุกต่ำที่สุดเท่ากับ 3.27 นาที เนื่องจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศนั้นส่งผลต่อโครงสร้างภายในเส้นขนมจีน โดยการพองตัวของเม็ดสตาร์ชหรือการเดือดของน้ำที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดรูพรุนเป็นจำนวนมาก โมเลกุลของน้ำจึงแทรกเข้าไปในเม็ดสตาร์ชและจับกับโมเลกุลของสตาร์ช เป็นผลให้เม็ดสตาร์ชพองตัวและสลายเมื่อให้ความร้อนแก่เส้นขนมจีนในสภาวะที่มีน้ำ ตรงกันข้ามกับเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่มีระยะเวลาในการต้มสุกที่นานกว่าตัวอย่างอื่น ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการคืนตัวของเส้นขนมจีน กล่าวคือเส้นขนมจีนที่อบแบบสุญญากาศเกิดการพองตัวของเม็ดสตาร์ชหรือการสั่นของน้ำภายในโครงสร้างน้อย ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงระหว่างเม็ดสตาร์ชเมื่อให้ความร้อนในสภาวะที่มีน้ำจึงทำให้พันธะไฮโดรเจนคลายตัวยาก โมเลกุลของน้ำจึงเข้าสู่โครงสร้างได้ค่อนข้างช้า (กล้าณรงค์ ศรีรอด, และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ดังนั้นจึงทำให้เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศใช้เวลาในการต้มสุกนานกว่าตัวอย่างอื่นและมีอัตราการคืนตัวต่ำ

จากการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (Cooking loss) และการดูดซับน้ำ (Water absorption) ของเส้นขนมจีนแป่งหมักที่ผ่านการอบแห้งทั้งสามวิธี พบว่าปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มและค่าการดูดซับน้ำของเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอยู่ในช่วง 14.52-17.53% และ 210.48-228.92% ตามลำดับ ส่วนเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศพบปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มและค่าการดูดซับน้ำอยู่ในช่วง 10.43-14.38% และ 198.06-216.20% ตามลำดับ สำหรับเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศพบปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มและค่าการดูดซับน้ำอยู่ในช่วง 9.26-10.50% และ 248.43-298.75% ตามลำดับ เส้นขนมจีนจากกระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาในการต้มสุกนานกว่าจึงเป็นผลให้มีอัตราในการสูญเสียสูงกว่าตัวอย่างอื่น ส่วนเส้นขนมจีนจากกระบวนการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มต่ำที่สุด เนื่องจากมี

ระยะเวลาในการต้มสุกต่ำกว่าตัวอย่างอื่น จึงทำให้มีปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มต่ำกว่า ตัวอย่างอื่น ถึงแม้ว่าโครงสร้างภายในของเส้นขนมจีนจะไม่แข็งแรงเพราะความมีรูพรุนจำนวนมากที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับน้ำของเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบด้วย อินฟราเรดแบบสุญญากาศ เนื่องจากตัวอย่างเส้นขนมจีนที่ผ่านเครื่องอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงที่สุด ($p < 0.05$) จากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนภายในเส้นขนมจีน จึงทำให้มีการดูดซับน้ำได้มากกว่าตัวอย่างอื่นและทำให้มีการสูญเสียของแข็งระหว่างการต้มสุกต่ำลงในทางกลับกันเส้นขนมจีนจากกระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศพบค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการคืนตัวโดยมีอัตราการคืนตัวที่ต่ำ เนื่องจากเส้นขนมจีนที่ได้จากการอบลมร้อนในสภาวะสุญญากาศมีอัตราการพองตัวของเม็ดสตาร์ชหรือการเดือดของน้ำภายในเส้นขนมจีนต่ำ จึงยากต่อการดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างภายในเส้นขนมจีนในระหว่างการต้มสุก



ตาราง 26 อัตราการคืนตัว (Rehydration ratio) และคุณภาพหลังการต้ม (Cooking quality) ของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

การอบแห้ง	อุณหภูมิ (C°)	Rehydration ratio	Cooking time (min)	Cooking loss (%)	Water absorption (%)
ตูบลมร้อน (Tray Dryer; TD)	50	3.25 ± 0.11 ^c	9.49 ± 0.05 ^b	17.53 ± 1.44 ^a	220.09 ± 7.12 ^{cd}
	60	3.29 ± 0.12 ^{bc}	9.07 ± 0.09 ^d	14.71 ± 0.80 ^b	228.92 ± 4.26 ^c
	70	3.37 ± 0.27 ^{bc}	9.21 ± 0.00 ^c	14.52 ± 0.52 ^b	210.48 ± 1.92 ^{de}
ตูบแห้งสูญญากาศ (Vacuum Drying Dryer; VD)	50	3.21 ± 0.06 ^c	10.29 ± 0.08 ^a	14.38 ± 0.37 ^b	198.06 ± 4.46 ^f
	60	3.10 ± 0.15 ^c	9.45 ± 0.08 ^b	14.17 ± 1.52 ^b	201.24 ± 3.00 ^{ef}
	70	3.12 ± 0.09 ^c	7.07 ± 0.00 ^e	10.43 ± 0.91 ^c	216.20 ± 6.05 ^d
ตูบแห้งอินฟราเรดสูญญากาศ (Vacuum infrared Dryer; IRD)	50	3.43 ± 0.20 ^{bc}	6.09 ± 0.09 ^f	9.26 ± 0.78 ^c	258.56 ± 9.42 ^b
	60	3.72 ± 0.36 ^b	5.31 ± 0.00 ^g	9.68 ± 1.44 ^c	248.43 ± 6.79 ^b
	70	4.16 ± 0.50 ^a	3.27 ± 0.00 ^h	10.50 ± 1.76 ^c	298.75 ± 7.52 ^a

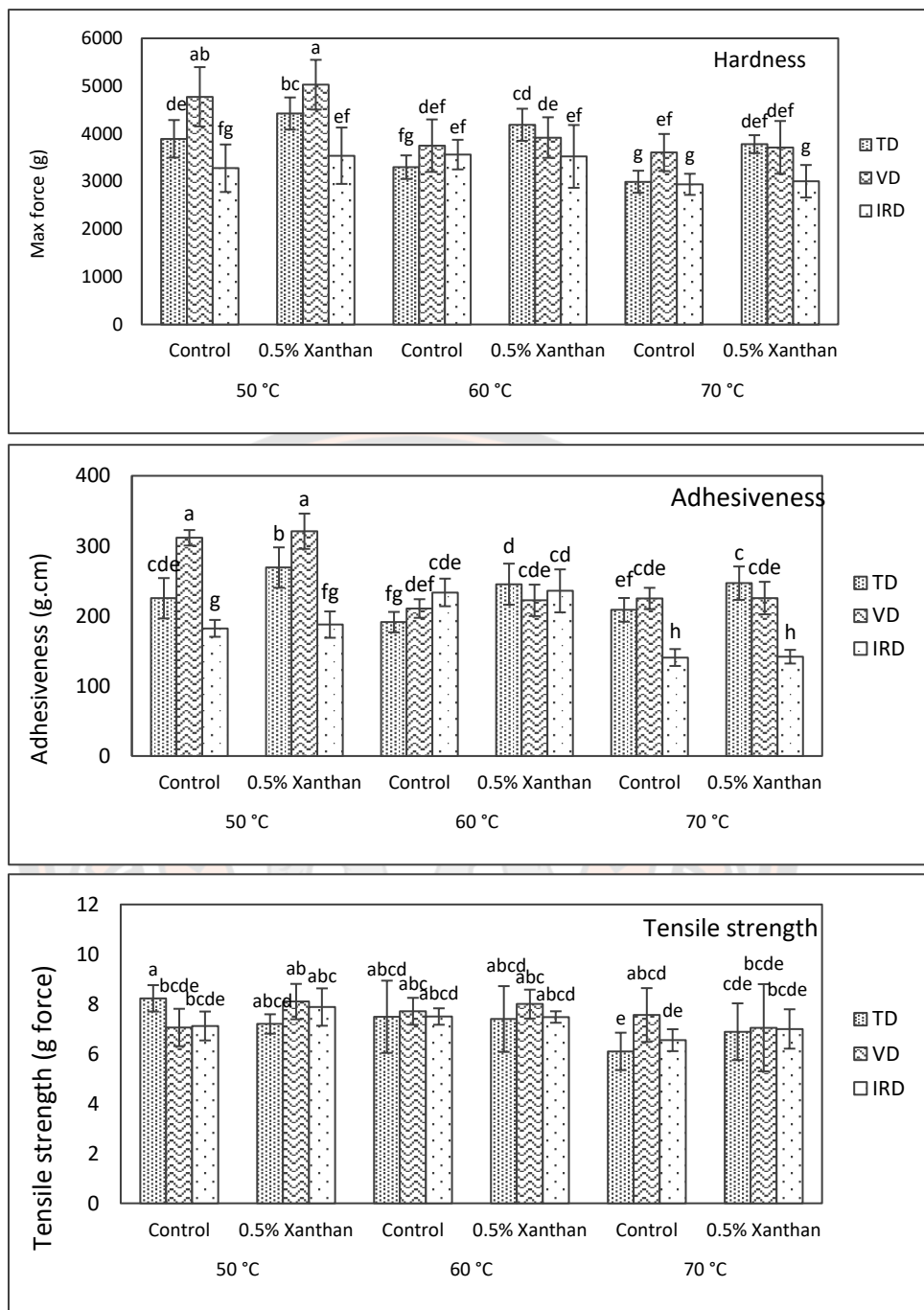
หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ภาพ 38 แสดงผลการตรวจวัดเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งหลังการคั่วที่มีการเติมและไม่เติมแซนแทนกัม โดยทำการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า (Adhesiveness) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นการวัดแรงที่ทำให้เส้นขนมจีนขาดออกจากกัน โดยเส้นขนมจีนที่มีแรงดึงมากแสดงว่าถึงความแข็งแรงของเส้น จากผลการทดลองพบว่าเส้นขนมจีนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งทั้งสามวิธี มีค่าความแข็ง ค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้า และค่าความต้านทานแรงดึงที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีค่าความแข็งของเส้นขนมจีนอยู่ในช่วง 3,780.86-4,423.73 g force เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งสุญญากาศมีค่าความแข็งของเส้นขนมจีนอยู่ในช่วง 3,712.86-5,027.79 g force สำหรับเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีค่าความแข็งของเส้นขนมจีนอยู่ในช่วง 3,003.30-3,538.53 g force ซึ่งเมื่อเทียบกับตัวอย่างเส้นที่ไม่เติมแซนแทนกัมพบว่าเส้นขนมจีนอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งในแต่ละกระบวนการมีแนวโน้มแสดงค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) โดยเฉพาะเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความแข็งสูงสุด โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการอบแห้งอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างภายในของเส้นขนมจีนมีความแข็งแรงลดลง เกิดจากการให้ความร้อนด้วยตู้อบลมร้อนและอินฟราเรดแบบสุญญากาศทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ภายในโครงสร้าง เส้นขนมจีนที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยตู้อบลมร้อนและอินฟราเรดแบบสุญญากาศจะมีลักษณะที่บวมน้ำ และมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560) นอกจากนี้ยังพบว่าแซนแทนกัมยังมีส่วนช่วยให้เส้นขนมจีนอบแห้งหลังการคั่วมีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของแซนแทนกัมร่วมกับโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคตินสายสั้นในระหว่างเกิดการเกิดเจลลาตินไนซ์ (Shi, & Bemiller, 2002)

เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้าของเส้นขนมจีนอยู่ในช่วง 245.29-269.02 g.cm, 222.21-320.88 g.cm, และ 141.80-235.75 g.cm ตามลำดับ จากภาพที่ 38 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมแซนแทนกัมลงในเส้นขนมจีนอบแห้ง ส่งผลให้เส้นขนมจีนอบแห้งหลังการคั่วมีค่าการยึดเกาะที่ผิวหน้าของเส้นขนมจีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) กับตัวอย่างเส้นขนมจีนอบแห้งที่ไม่มีการเติมแซนแทนกัม แต่เมื่อเทียบกับเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีอื่นที่มีการเติมแซนแทนกัมพบว่ามีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นขนมจีนอยู่ในช่วง 6.89-7.40 g force, 7.05-8.10 g force และ 7.00-7.88 g force ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมแซนแทนกัมลงในเส้นขนมจีนอบแห้งทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นขนมจีนใกล้เคียงกับเส้นขนมจีนอบแห้งที่ไม่มีการเติมแซนแทนกัม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชกับแซนแทนกัม โดยเกิดจากสัดส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในแป้งข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ที่ถูกแทนที่ลงในเส้นขนมจีนทำให้เกิดโครงสร้างของเส้นขนมจีนที่ไม่แข็งแรงพอที่จะยึดกันไว้ได้เมื่อมีแรงมากระทำ (Srikaeo et al., 2018)





ภาพ 38 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกันหลังการคินตัว

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

TD คือ เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน

VD คือ เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศ

IRD คือ เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศ

จากการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินทั้งหมดของเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศดังแสดงในตาราง 27 พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในเส้นขนมจีนที่ผ่านกระบวนการอบแห้งทั้งสามวิธี มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การอบแห้งเส้นขนมจีนด้วยตู้อบลมร้อนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในช่วง 238.49-257.09 mg gallic acid equivalents/100g และอุณหภูมิการอบแห้งมีผลต่อสารประกอบฟีนอลิก โดยการอบแห้งเส้นขนมจีนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นการใช้อุณหภูมิที่ต่ำ ช่วยลดการสูญเสียสารประกอบฟีนอลิกได้แม้ใช้เวลาในการอบค่อนข้างนาน ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส แต่ระยะเวลาในการอบสั้นอาจยังช่วยคงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไว้ได้ นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นอาจจะส่งผลให้โครงสร้างของผนังเซลล์ (Cell wall) ถูกทำลายทำให้เกิดการปลดปล่อยของสารประกอบฟีนอลิก (Brennan et al., 2011) Zielinski et al. (2001) รายงานปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) ในเมล็ดธัญพืชเพิ่มขึ้นสามเท่าหลังจากผ่านการอัดรีด (Extrusion) และมันเทศ ที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการอัดรีดด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Shih et al., 2009)

ขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในช่วง 253.42-284.63 mg gallic acid equivalents/100g เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งแบบสุญญากาศเพิ่มขึ้นจาก 50 จนถึง 70 องศาเซลเซียส พบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้นตามลำดับ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระยะเวลาในการอบที่สั้น หรือเกิดการปลดปล่อยของสารประกอบฟีนอลิก เมื่ออุณหภูมิสูงการอบแห้งสูงขึ้น

ขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศพบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในช่วง 202.68-272.16 mg gallic acid equivalents/100g และเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลงตามลำดับ เนื่องมาจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดในสภาวะที่เป็นสุญญากาศจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำแห้งดีขึ้นโดยรังสีอินฟราเรดจะทำการปล่อยรังสีทะลุผ่านไปยังเส้นขนมจีน ทำให้ภายในเส้นขนมจีนเกิดความร้อนที่สูงจากการสั่นของโมเลกุลน้ำ ส่งผลให้โครงสร้างของสารกลุ่มฟีนอลที่มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกเกิดความเสียหายและสลายตัวในที่สุด (Deng et al., 2013)

ปริมาณฟลาโวนอยด์ในเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งจากกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 วิธี มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีปริมาณฟลาโวนอยด์อยู่ในช่วง 57.26-78.61 mg catechin equivalents/100g และเส้นขนมจีนที่ผ่านการ

อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีปริมาณฟลาโวนอยด์สูงกว่าเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่วิเคราะห์ได้ แสดงให้เห็นว่าสารประกอบฟีนอลิกที่พบในเส้นขนมจีนเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์เป็นหลัก

เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศมีปริมาณฟลาโวนอยด์อยู่ในช่วง 57.58-63.20 mg catechin equivalents/100g เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณฟลาโวนอยด์เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นลงแม้ว่าอุณหภูมิการอบแห้งจะสูงขึ้น การอบแบบสุญญากาศเป็นการอบที่สภาวะความดันต่ำจึงลดการเดือดของน้ำภายในเส้นขนมจีนได้ ปริมาณออกซิเจนน้อย ช่วยลดพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งได้ และยังคงคุณค่าทางโภชนาการของตัวอย่าง (Alibas, 2007) สำหรับการอบแห้งเส้นขนมจีนด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีปริมาณฟลาโวนอยด์อยู่ในช่วง 46.45-64.60 mg catechin equivalents/100g สอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก โดยเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณฟลาโวนอยด์ลดลงตามลำดับ เนื่องจากการสูญเสียในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

จากการศึกษาปริมาณแอนโทไซยานินในเส้นขนมจีนแบ่งหมักจากกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 วิธี พบว่าปริมาณแอนโทไซยานินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบแอนโทไซยานินสูงที่สุดในตัวอย่างเส้นขนมจีนอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ มีค่าอยู่ในช่วง 18.93-35.58 mg Cyanidin-3-glucoside/100g และเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้นปริมาณแอนโทไซยานินจะมีค่าลดลง ($p < 0.05$) ทั้งนี้เกิดจากการเปิดออกของวงแหวนอะโรมาติกที่เสียหายเนื่องจากความร้อน ส่งผลให้โครงสร้างของแอนโทไซยานินบางชนิดเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของชาโลโคน (Chalcone) ซึ่งมีสีเหลืองสดไปจนถึงสีส้มจนกระทั่งไม่มีสี (Patras et al., 2010) เส้นขนมจีนอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศมีปริมาณแอนโทไซยานินอยู่ในช่วง 17.73-26.22 mg Cyanidin-3-glucoside/100g และเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ สำหรับเส้นขนมจีนที่อบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีปริมาณแอนโทไซยานินอยู่ในช่วง 15.68-24.80 mg Cyanidin-3-glucoside/100g เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นปริมาณแอนโทไซยานินจะลดลงตามลำดับ ($p < 0.05$) ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์

ตาราง 27 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินทั้งหมดของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

การอบแห้ง	อุณหภูมิ (°C)	Phenolic content (mg GAE/100g DW)	Flavonoid content (mg CE/100g DW)	Anthocyanin content (mg Cy-3-glu/100g DW)
ตูบลมร้อน (Tray Dryer; TD)	50	251.35 ± 1.92 ^d	76.46 ± 0.55 ^a	35.58 ± 0.88 ^a
	60	238.49 ± 2.89 ^e	57.26 ± 1.66 ^c	27.28 ± 1.39 ^b
	70	257.09 ± 3.92 ^{cd}	78.61 ± 2.63 ^a	18.93 ± 2.44 ^d
ตูบแห้งสูญญากาศ (Vacuum Drying Dryer; VD)	50	253.42 ± 2.58 ^d	57.58 ± 4.36 ^c	19.53 ± 1.63 ^d
	60	261.17 ± 2.82 ^c	59.91 ± 0.77 ^c	17.73 ± 0.43 ^{de}
	70	284.63 ± 2.86 ^a	63.20 ± 0.77 ^b	26.22 ± 1.08 ^{bc}
ตูบแห้งอินฟราเรดสูญญากาศ (Vacuum infrared Dryer; IRD)	50	272.16 ± 3.05 ^b	64.60 ± 0.57 ^b	24.80 ± 1.40 ^c
	60	240.44 ± 1.88 ^e	53.89 ± 0.47 ^d	18.92 ± 1.01 ^d
	70	202.68 ± 6.58 ^f	46.45 ± 1.09 ^e	15.68 ± 0.49 ^e

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

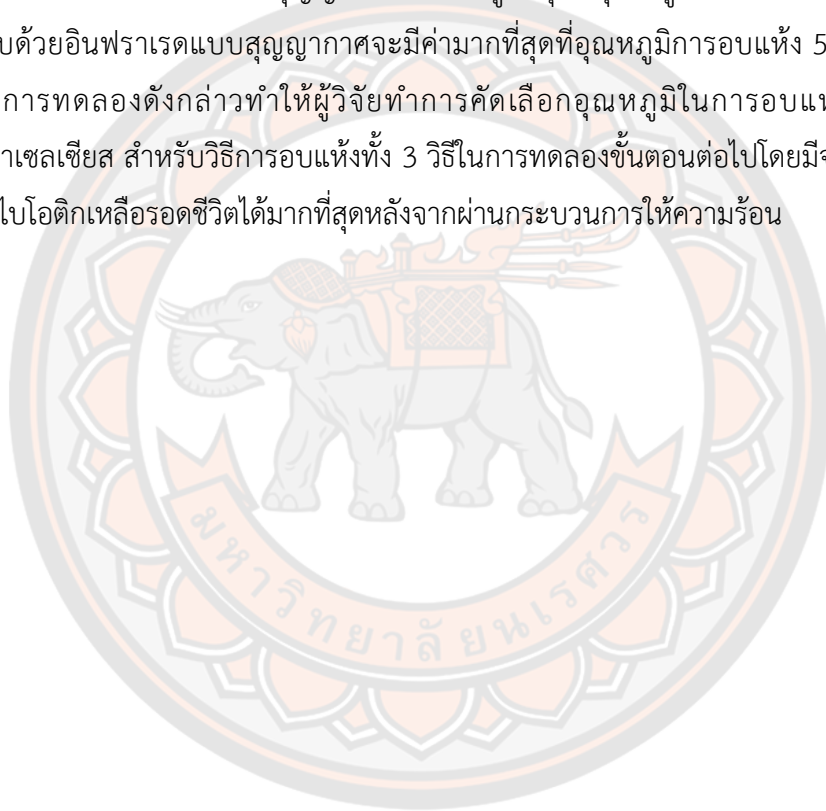
ตาราง 28 แสดงฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•] assay ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการกำจัดอนุมูล DPPH[•] ของสารสกัดตัวอย่าง โดยสารสกัดตัวอย่างจะทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนอะตอมแก่อนุมูลของ DPPH[•] จากการทดลองพบว่าเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระวัดด้วยวิธี DPPH[•] อยู่ในช่วง 146.69-160.28 mg Trolox equivalents/100g และการอบแห้งเส้นขนมจีนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส จะมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) ผลการทดลองสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และแอนโทไซยานินดังตาราง 27 เนื่องจากสารฟลาโวนอยด์มีหลักในข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์เป็นสารแอนโทไซยานิน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่พบในเส้นขนมจีนอบแห้งจึงแปรผันตามสารกลุ่มฟีนอลที่วิเคราะห์ได้ เช่นเดียวกับขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 146.15-160.79 mg Trolox equivalents/100g และขนมจีนที่อบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 140.24-157.15 mg Trolox equivalents/100g

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระวัดด้วยวิธี ABTS^{•+} assay เป็นการทดสอบความสามารถของต้านอนุมูลอิสระในการให้อิเล็กตรอนกับอนุมูล ABTS^{•+} ที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2H_2O_8$) เส้นขนมจีนแป่งหมักอบแห้งจากกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 วิธีมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระวัดด้วยวิธี ABTS^{•+} ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 109.48-117.21 mg Trolox equivalents/100g การอบแห้งขนมจีนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับเส้นขนมจีนที่อบแห้งแบบสุญญากาศมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 110.42-160.79 mg Trolox equivalents/100g และขนมจีนอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 113.27-119.71 mg Trolox equivalents/100g โดยผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH[•] assay

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระวัดด้วยวิธี FRAP assay เป็นการวัดความสามารถในการรีดิวซ์ของสารต้านอนุมูลอิสระต่อสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กหรืออนุมูลอิสระสังเคราะห์ เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อนมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระวัดด้วยวิธี FRAP อยู่ในช่วง 187.97-238.32 mg Trolox equivalents/100g โดยขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ($p < 0.05$) ส่วนขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 203.33-215.78 mg Trolox equivalents/100g โดยฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) และการอบแห้งขนมจีนด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระอยู่

ในช่วง 202.13-271.73 mg Trolox equivalents/100g ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับขนมจีนที่อบแห้งแบบสุญญากาศ

จากการตรวจสอบคุณภาพเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งจากการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าเส้นขนมจีนอบแห้งที่ได้มีปริมาณความชื้นและค่า a_w ที่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด โดยปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจะมีค่ามากที่สุดในตัวอย่างเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ส่วนขนมจีนที่ผ่านการอบแบบสุญญากาศจะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่การอบด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศจะมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยทำการคัดเลือกอุณหภูมิในการอบแห้งเส้นขนมจีนที่ 50 องศาเซลเซียส สำหรับวิธีการอบแห้งทั้ง 3 วิธีในการทดลองขั้นต่อไปโดยมีจุดประสงค์เพื่อให้เชื้อโปรไบโอติกเหลือรอดชีวิตได้มากที่สุดหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อน



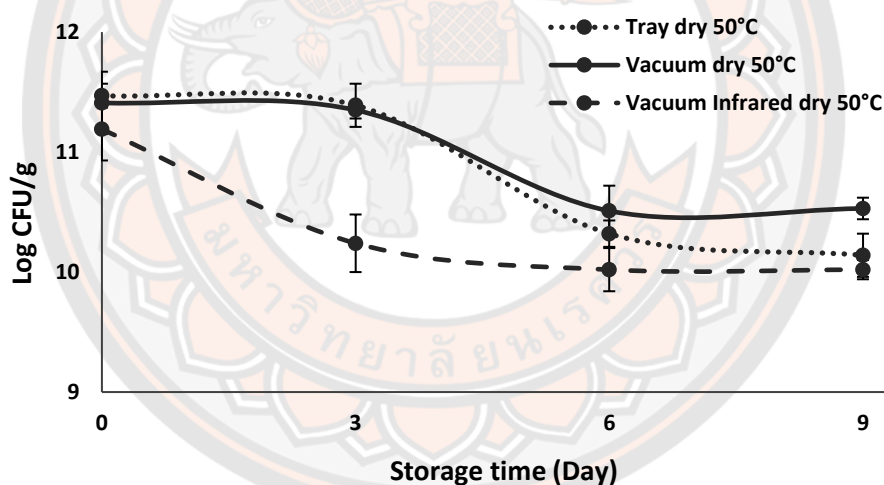
ตาราง 28 ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•], ABTS^{•+} และ FRAP assay ของเส้นขนมจีนที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

สภาวะการอบแห้ง	อุณหภูมิ (°C)	DPPH [•] assay (mg TE/100g DW)	ABTS ^{•+} assay (mg TE/100g DW)	FRAP assay (mg TE/100g DW)
ตู้อบลมร้อน (Tray Dryer; TD)	50	160.28 ± 1.00 ^{ab}	116.21 ± 1.53 ^b	238.32 ± 3.07 ^c
	60	146.69 ± 1.65 ^c	109.48 ± 0.97 ^d	187.97 ± 2.58 ^e
	70	160.10 ± 4.90 ^{ab}	117.21 ± 1.43 ^{ab}	222.98 ± 2.75 ^c
ตู้อบแห้งสูญญากาศ (Vacuum Drying Dryer; VD)	50	155.76 ± 3.79 ^b	112.20 ± 3.18 ^{cd}	215.78 ± 3.11 ^c
	60	146.15 ± 2.07 ^c	110.42 ± 1.26 ^d	205.32 ± 6.70 ^d
	70	160.79 ± 1.52 ^a	117.83 ± 1.03 ^{ab}	203.33 ± 4.16 ^d
ตู้อบแห้งอินฟราเรดสูญญากาศ (Vacuum infrared Dryer; IRD)	50	157.15 ± 1.29 ^{ab}	119.71 ± 0.95 ^a	271.73 ± 3.56 ^a
	60	145.23 ± 2.14 ^c	113.27 ± 0.90 ^c	239.80 ± 6.67 ^b
	70	140.24 ± 2.06 ^d	116.16 ± 1.19 ^b	202.13 ± 3.92 ^d

หมายเหตุ: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการเสริมโพรไบโอติกต่อคุณภาพของเส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุชยันนาด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิสสุรินทร์

นำเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ถูกคัดเลือกในตอนต้นที่ 3 ได้แก่ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุชยันนาด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิสสุรินทร์ร้อยละ 20 ที่ผ่านการทำแห้ง โดยกรรมวิธีการอบแห้ง 3 แบบ ได้แก่ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนนาน 90 นาที การอบแห้งแบบสุญญากาศโดยใช้ความดัน 0.2 บาร์ นาน 270 นาที และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศโดยกำหนดรังสีอินฟราเรดที่ 1,700 วัตต์ และความดัน 0.8 บาร์ นาน 60 นาที โดยแต่ละวิธีการทำแห้งมีการแปรระดับอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส และเติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแป้งแห้ง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเส้นขนมจีนอบแห้งหลังการคั่วตัว ทำการเสริมจุลินทรีย์โพรไบโอติก ได้แก่ สปอร์ของ *B. coagulans* โดยเติมสารละลายที่มีความเข้มข้นของสปอร์เริ่มต้นประมาณ $13 \log \text{CFU/g}$ ลงในเส้นขนมจีน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 9 วัน จากนั้นนำไปทดสอบการรอดชีวิต (Viability) ของสปอร์ *B. coagulans* แสดงผลดังภาพ 39 และตาราง 29



ภาพ 39 การรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ในขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุมะลินิสสุรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

หมายเหตุ: Tray Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Vacuum Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Vacuum infrared Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตาราง 29 การรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ในขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิสุนทรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

Storage time (Day)	Tray dry		Vacuum dry		Vacuum Infrared dry	
	Log CFU/g	Viability (%)	Log CFU/g	Viability (%)	Log CFU/g	Viability (%)
0	11.47±0.10 ^{aA}	100	11.41±0.26 ^{aA}	100	11.19±0.26 ^{aA}	100
3	11.39±0.18 ^{aA}	99.30	11.35±0.07 ^{aA}	99.47	10.24±0.24 ^{bB}	91.51
6	10.32±0.11 ^{abB}	89.97	10.51±0.21 ^{ab}	92.11	10.02±0.18 ^{bB}	89.54
9	10.14±0.18 ^{bB}	88.40	10.53±0.09 ^{ab}	92.29	10.02±0.08 ^{bB}	89.54

หมายเหตุ: อักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันภายในแถวเดียวกันและอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากภาพ 39 และตาราง 29 แสดงการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ที่เสริมลงในเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งโดยกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 แบบ หลังจากเติมสารละลายที่มีความเข้มข้นสปอร์เริ่มต้นเท่ากับ 13 log CFU/g ลงในเส้นขนมจีนและผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ พบว่าปริมาณของสปอร์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีสปอร์เริ่มต้นเท่ากับ 11.47, 11.41 และ 11.19 log CFU/g ตามลำดับ (ในวันที่ 0) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้การอุณหภูมิที่ต่ำในการอบแห้ง จึงอาจเป็นผลให้ทั้ง 3 กระบวนการอบแห้งมีอัตราการทำให้แห้งที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งใช้อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ในทุกกระบวนการอบแห้ง และเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิในอบแห้งต่ำจึงมีอัตราการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ในเส้นขนมจีนอบแห้งสูงถึง 11 log CFU/g จากนั้นทำการเก็บรักษาเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งถึงวันที่ 3 ตัวอย่างเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ มีอัตราการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ร้อยละ 99.30, 99.47 และ 91.51 ตามลำดับ โดยเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (11.39 log CFU/g) และตู้อบแบบสุญญากาศ (11.35 log CFU/g) มีปริมาณสปอร์ *B. coagulans* รอดชีวิตที่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ซึ่งมีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่าการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ (10.24 log CFU/g) ($p < 0.05$) หลังจากเก็บรักษาเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งผ่านไป 6 วัน เส้นขนมจีนจากการทำแห้งทั้ง 3 แบบมีอัตราการรอดชีวิตของสปอร์ที่ลดลงจากการเก็บรักษาวันที่ 3 ร้อยละ 89.97, 92.11 และ 89.54 ตามลำดับ โดยการทำ

แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (10.32 log CFU/g) พบการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ไม่แตกต่างกับการอบแห้งแบบสุญญากาศ (10.51 log CFU/g) และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ (10.02 log CFU/g) ($p > 0.05$) ในขณะที่การอบแห้งแบบสุญญากาศมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ ($p < 0.05$) และเมื่อเก็บรักษาเส้นขนมจีนอบแห้งจนถึงวันที่ 9 พบอัตราการรอดชีวิตของสปอร์ร้อยละ 88.40, 92.29 และ 89.54 ตามลำดับ ซึ่งในการอบแห้งแบบสุญญากาศ (10.14 log CFU/g) มีปริมาณสปอร์ของ *B. coagulans* เหลือรอดสูงที่สุด ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 แบบ เมื่อทำการเก็บรักษาเส้นขนมจีนอบแห้งไว้เป็นเวลา 9 วัน ชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบสุญญากาศส่งผลต่อการตายชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ต่ำที่สุด เพราะมีอัตราการรอดชีวิตสูงสุดและมีปริมาณสปอร์รอดชีวิตสูงกว่าการทำแห้งเส้นขนมจีนแบบหมักทั้ง 2 แบบ การอบแห้งแบบสุญญากาศเป็นวิธีการทำแห้งแบบพาความร้อน ตัวอย่างเส้นขนมจีนจึงไม่ได้สัมผัสกับลมร้อนโดยตรง และยังเป็นการทำแห้งภายใต้สภาวะที่ความดันอากาศต่ำกว่าความดันบรรยากาศ น้ำภายในเส้นขนมจีนจึงระเหยได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีจุดเดือดที่ต่ำกว่า (พิมเพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, และนิธิยา รัตนานนท์, 2553) จึงเป็นผลให้มีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่าการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ อุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้การพบอัตราการรอดชีวิตที่สูงของสปอร์ *B. coagulans* ในเส้นขนมจีนแบบหมักอบแห้งจากกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 แบบ อาจเนื่องมาจากในการทำแห้งเส้นขนมจีนแบบหมักนั้นใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ต่ำเพียง 50 องศาเซลเซียส Majeed et al. (2019) รายงานการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* MTCC 5856 มีความทนทานต่อสภาวะการต้มกาแฟสูง (90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที) โดยมีอัตราการรอดชีวิตร้อยละ 94.94 และ 94.04 ในกาแฟดิบและกาแฟคั่วตามลำดับ มีปริมาณสปอร์ที่รอดชีวิต 9 log CFU/200ml นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีการลดลงของสปอร์ของ *B. coagulans* MTCC 5856 ในกาแฟที่ต้มทิ้งไว้ระหว่าง 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ชี้ให้เห็นว่าสปอร์ของ *B. coagulans* มีความต้านทานและคงทนต่อความร้อนได้สูง เนื่องจากสปอร์ของ *B. coagulans* ที่เติมลงในเส้นขนมจีนจะมีความคงทนต่อความร้อนได้ในขณะทำการโรยเส้นในน้ำร้อนอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ต้มเส้นเป็นเวลา 20 วินาที และผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการเก็บเส้นขนมจีนอบแห้งเป็นเวลา 9 วัน สปอร์ *B. coagulans* ยังคงเหลือรอดอยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งอยู่สถานะพักตัวนิ่ง ๆ (Dormantion) ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการงอกหรือเจริญเติบโตได้

จากการทดลองเก็บรักษาเส้นขนมจีนแบบหมักเสริมโพรไบโอติก *B. coagulans* ที่ผ่านการอบแห้งโดยกระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ กระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศเป็นเวลา 9 วัน จากนั้นทำการหา

ความสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างอายุการเก็บรักษากับการชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* โดยทำเป็นสมการ Regression Equation ทำได้การนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ได้ทั้งหมด 3 สมการดังตาราง 30 เพื่อทราบถึงแนวโน้มของจำนวนวันในการเก็บรักษาเส้นขนมจีนแป่งหมักอบแห้งจากทั้ง 3 กระบวนการอบแห้งจนกว่าปริมาณของโพธิ์โปรโตติกจะลดลงเหลือ 6 log CFU/g ซึ่งในกระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.8772, 0.8165 และ 0.7446 ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้นแสดงเป็นการประมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ดังตาราง 30 และภาพ 40

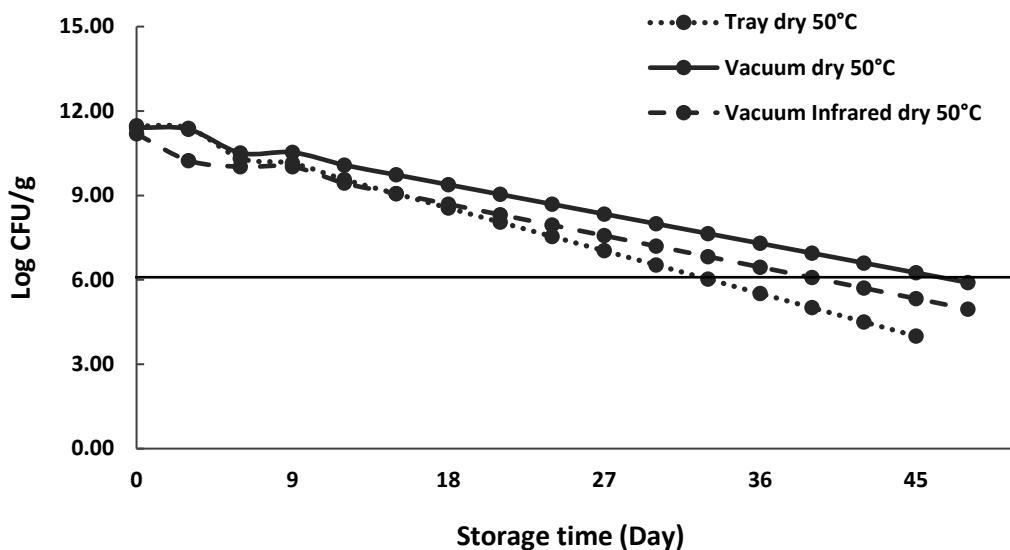
ตาราง 30 การประมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ด้วยสมการเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษากับปริมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans*

ตัวอย่าง	*สมการเส้นตรง	**ค่า X ตามจำนวนวันอายุการเก็บ (วัน)	***ปริมาณสปอร์ที่คาดว่าจะเหลือรอด (log CFU/g)
Tray dry 50°C	$Y=-0.1687X+11.589$	33	6.02
Vacuum dry 50°C	$Y=-0.116X+11.472$	45	6.25
Vacuum Infrared dry 50°C	$Y=-0.1243X+10.927$	39	6.08

หมายเหตุ: * สมการเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 9 วัน กับปริมาณสปอร์ *B. coagulans*

** ค่า X คือ จำนวนวันที่ต้องการคาดการณ์การรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans*

*** ปริมาณสปอร์ *B. coagulans* ที่คาดว่าจะเหลือรอดโดยไม่ต่ำกว่า 6 log CFU/g



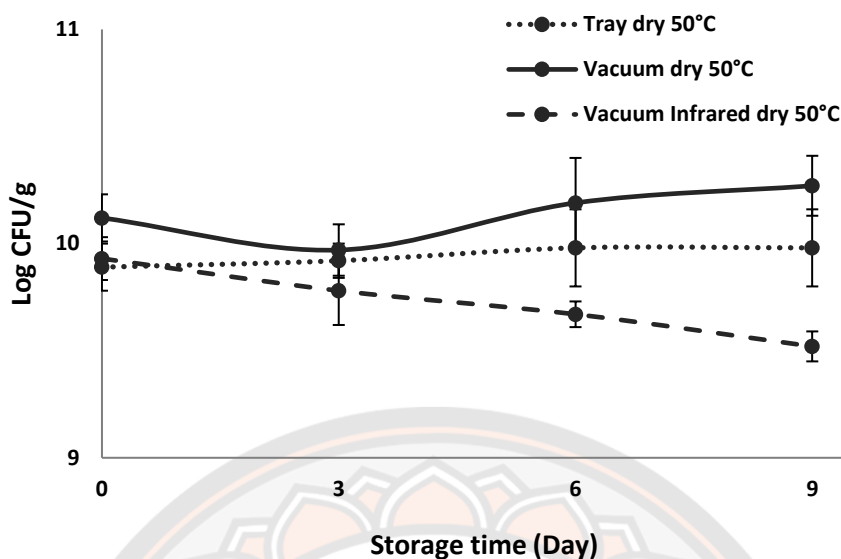
ภาพ 40 การประมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ด้วยสมการเส้นตรงจากความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษากับปริมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans*

หมายเหตุ: Tray Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
 Vacuum Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
 Vacuum infrared Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จากการทดลองผลิตเส้นขนมจีนอบแห้งเสริมโปรไบโอติก *B. coagulans* โดยผ่านกระบวนการอบแห้ง 3 แบบ ได้แก่ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ และทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 9 วัน เมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเก็บรักษากับปริมาณการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* จากตาราง 30 สมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ได้ค่า X intercept เท่ากับ 33 วัน แสดงให้เห็นว่าเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนจะมีอายุประมาณ 33 วัน สปอร์ *B. coagulans* จึงจะลดลงเหลือ 6.02 log CFU/g ส่วนเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งแบบสุญญากาศจะมีอายุประมาณ 45 วัน สปอร์จึงจะลดลงเหลือ 6.25 log CFU/g สำหรับเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศจะมีอายุประมาณ 36 วัน สปอร์จึงจะลดลงเหลือ 6.08 log CFU/g จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 40 จะเห็นได้ว่าการอบแห้งแบบสุญญากาศจะมีแนวโน้มการรอดชีวิตของสปอร์สูงกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและการอบด้วยอินฟราเรด

แบบสุญญากาศ ซึ่งมีความสอดคล้องกับทดลองก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ดังตาราง 29 และภาพ 39

จากการศึกษาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเส้นขนมจีนแปงหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยการอบแห้งทั้ง 3 แบบ ดังภาพที่ 41 หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งและทำการเก็บรักษาเส้นขนมจีนแปงหมักอบแห้งที่อุณหภูมิเป็นเวลา 9 วัน พบว่าในวันที่ 0 เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศ ($10.11 \log \text{CFU/g}$) มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดสูงสุด ($p < 0.05$) ซึ่งไม่แตกต่างกับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ ($9.93 \log \text{CFU/g}$) ($p > 0.05$) ในขณะที่การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ($9.89 \log \text{CFU/g}$) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการอบแห้งแบบสุญญากาศ ($p < 0.05$) เมื่อเก็บรักษานานขึ้นเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างเส้นขนมจีนแปงหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแห้งแบบสุญญากาศหลังจากผ่านไปจนถึงวันที่ 9 มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่แตกต่างจากการเก็บรักษาในวันที่ 0 ($p > 0.05$) ในขณะที่ตัวอย่างเส้นขนมจีนแปงหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีแนวโน้มลดลง ($p < 0.05$) เมื่อเก็บรักษาจนถึงวันที่ 9 อาจเป็นผลจากการเสียหายของจุลินทรีย์ที่เป็นเซลล์ปกติ (Vegetative cell) ที่ไม่สามารถทนต่อความร้อนสูง ๆ ได้ เนื่องจากกระบวนการทำแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศเป็นการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุทะลวงเข้าไปในชิ้นอาหาร จึงเกิดการสั่นของโมเลกุลน้ำอย่างรุนแรงเกิดเป็นความดันสูงภายในชิ้นอาหาร (ภราดร หนูทอง และคณะ, 2560) ซึ่งมีความแตกต่างจากกระบวนการอบแห้งทั้ง 2 แบบ กล่าวคือการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแบบสุญญากาศเป็นการอบแห้งที่คล้ายกัน แต่จะมีการดูดเอาอากาศออกจากห้องอบซึ่งทำให้น้ำภายในอาหารมีจุดเดือดที่ต่ำ คงสภาพ สารอาหาร และสีของอาหารไว้ได้ ในขณะที่ตู้อบลมร้อนเป็นการใช้ลมร้อนไหลเวียนภายในห้องอบ ไอน้ำบางส่วนจึงยังไหลเวียนอยู่ในระบบก่อนที่จะระเหยไป อัตราการทำแห้งจึงต่ำกว่าตู้อบบแบบอินฟราเรด ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างเส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแบบสุญญากาศจึงมีปริมาณที่สูงกว่าเส้นขนมจีนที่อบด้วยตู้อบบอินฟราเรดแบบสุญญากาศ ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณสปอร์ของโพรไบโอติก *B. coagulans* เนื่องจากจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในเส้นขนมจีนแปงหมักอบแห้งเป็นจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่เติมลงไป เป็นผลให้มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดค่อนข้างสูงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 แบบ



ภาพ 41 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ
มะลินิลสุรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

หมายเหตุ: Tray Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
Vacuum Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
Vacuum infrared Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศที่อุณหภูมิ
50 องศาเซลเซียส

จากตาราง 31 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 9 วัน ของเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งจากกระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าในระหว่างการเก็บรักษาเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งจากทั้ง 3 กระบวนการอบแห้งไม่พบเจริญเติบโตของยีสต์และรา อาจเกิดจากเส้นขนมจีนอบแห้งมีสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเส้นขนมจีนอบแห้ง กล่าวคือปริมาณยีสต์และราต้องน้อยกว่า 10 CFU/g (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนขนมจีนอบแห้ง 140/2546)

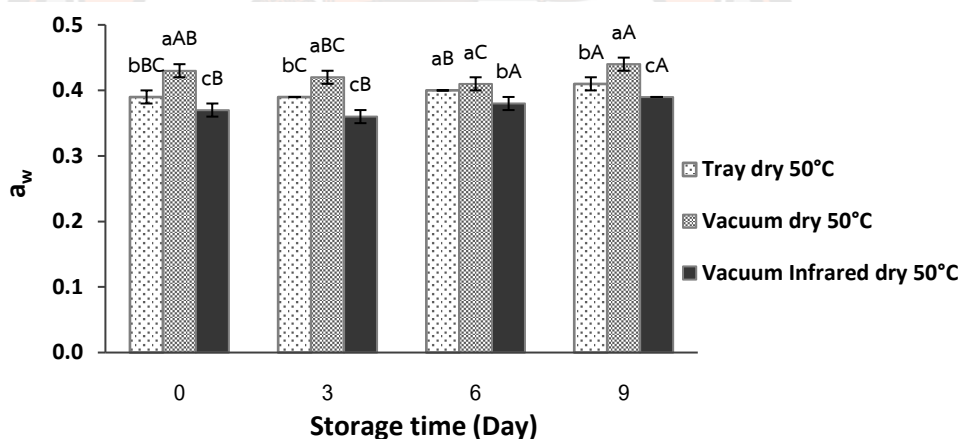
ตาราง 31 ปริมาณยีสต์และราในเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสี
สุรินทร์ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

เส้นขนมจีน	ปริมาณยีสต์และรา (CFU/g) ระหว่างการเก็บรักษา (วัน)			
	0	3	6	9
Tray dry 50°C	<10	<10	<10	<10
Vacuum dry 50°C	<10	<10	<10	<10
Vacuum Infrared dry 50°C	<10	<10	<10	<10

หมายเหตุ: Tray Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Vacuum Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Vacuum infrared Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพ 42 ค่า a_w ของเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่
สภาวะการอบแห้งแตกต่างกันระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

หมายเหตุ: อักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันภายในวันเดียวกันและอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันภายใน
ตัวอย่างเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

Tray Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

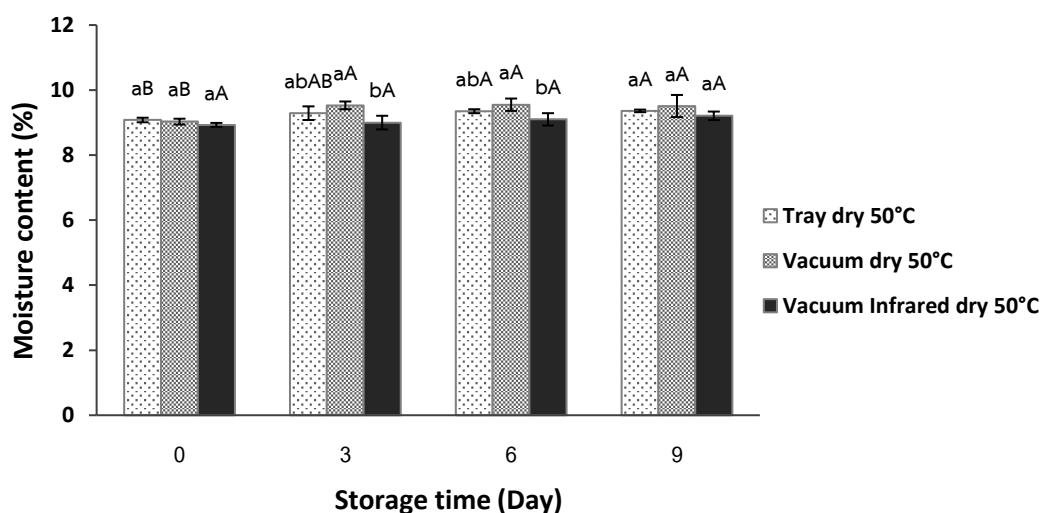
Vacuum Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Vacuum infrared Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จากภาพ 42 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ หรือค่า Water activity (a_w) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร มีความเกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียของอาหารโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย ยีสต์ และราที่สร้างสารพิษ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ นอกจากนี้ค่า a_w ยังมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากค่า a_w เป็นตัวชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ได้ จากผลการทดลองพบว่าเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งทั้ง 3 แบบมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.36-0.44 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปริมาณน้ำอิสระตามมาตรฐานอาหารแห้ง ($a_w < 0.6$) (นิธิยา รัตนปพนท์, 2549) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในวันที่ 0 เส้นขนมจีนขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศมีค่า a_w สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการทำแห้งอีก 2 แบบ ($p < 0.05$) โดยรองลงมาเป็นการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและการอบด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาผ่านไปจนถึง 9 วัน ยังคงพบค่า a_w สูงที่สุดในเส้นขนมจีนขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีค่า a_w เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ยังพบว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีค่า a_w เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างการอบแห้งแบบสุญญากาศมีแนวโน้มลดลงในระหว่างการเก็บรักษาวันที่ 3 และ 6 แล้วเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 9 ส่วนการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีค่า a_w เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บจนถึงวันที่ 9 อาจเกิดจากการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนจะได้เส้นขนมจีนที่มีลักษณะที่พองตัว โครงสร้างภายในเส้นขนมจีนมีช่องว่างสูงกว่าตัวอย่างจากการอบด้วยวิธีอื่นจึงสามารถดูดซับความชื้นจากภายนอกได้ง่ายกว่าตัวอย่างเส้นที่มีโครงสร้างภายในที่แข็งแรง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า a_w จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดจากการรายงานข้างต้น

สำหรับปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยการอบแห้งทั้ง 3 แบบ ดังภาพ 43 พบว่าหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งและทำการเก็บรักษาเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่อุณหภูมิเป็นเวลา 9 วัน เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8.93-9.55 โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานขนมจีนแห้งต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนขนมจีนอบแห้ง 140/2546) หลังจากการอบแห้งเส้นขนมจีนแป้งหมักพบปริมาณความชื้นในทุกตัวอย่างเส้นแห้งไม่แตกต่างกันในวันที่ 0 ($p > 0.05$) เมื่อทำการเก็บรักษาเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งเป็นเวลา 9 วัน เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งมีปริมาณความชื้นเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ยกเว้นตัวอย่างเส้นขนมจีนที่ผ่านการทำแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่มีแนวโน้มของปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าวันที่ 9 ของการเก็บรักษา เส้นขนมจีนอบแห้งจากทั้ง 3 กระบวนการทำแห้งมี

ปริมาณความชื้นที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณความชื้นที่วิเคราะห์ได้มีความสอดคล้องกับค่า a_w ดังรายงานข้างต้น เนื่องจากการดูดซึมน้ำจากภายนอกขึ้นอาหารจึงเป็นผลให้ตัวอย่างมีปริมาณน้ำในอาหารสูงขึ้นตามลำดับ



ภาพ 43 ค่าความชื้นของเส้นขนมจีนอบแห้งจากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์ ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

หมายเหตุ: อักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันภายในวันเดียวกันและอักษรพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันภายในตัวอย่างเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

Tray Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Vacuum Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Vacuum infrared Dry 50 °C คือ การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งอินฟราเรดสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของข้าวข้าวพันธุ์ชัยนาท ข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาท และแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

ข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์หลังผ่านกระบวนการหมักแบบธรรมชาติ ร่วมกับตู้อบลมร้อนมีค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณโปรตีนลดลง ส่วนปริมาณอะมิโลสและปริมาณสตาร์ชทั้งหมดเพิ่มขึ้น แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทและข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีกำลังการพองตัวและการละลายลดลง แต่มีดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ข้าวพันธุ์ชัยนาทหลังผ่านการหมักมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นและค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองลดลง ส่วนแป้งหมักจากข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นส่วนค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แป้งหมักจากข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระลดลง เมื่อเทียบกับแป้งข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก ค่า Peak viscosity ของข้าวทั้งสองสายพันธุ์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก ส่วนค่า Set back ของแป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทมีค่าที่เพิ่มขึ้นในขณะที่แป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์มีค่า Set back ลดลง

ตอนที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

เส้นขนมจีนที่ได้จากการแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ 0, 10, 20 และ 30 (โดยน้ำหนักแป้งแห้ง) มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น ส่วนค่าความแข็งและค่าการยืดเกาะลดลงเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น ความหนืดของน้ำแป้งก่อนโรยเส้นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการเจือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงการไหลประเภท Non-newtonian และแสดงลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic น้ำแป้งก่อนโรยเส้นมีค่า G' สูงกว่า G'' และเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า G' และ G'' ลดลงตามลำดับจากการประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัส พบว่าผู้ทดสอบชิมตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแป้งหมัก เนื่องจากคุณภาพของเส้นขนมจีน ลักษณะเนื้อสัมผัส ประโยชน์ต่อร่างกาย ความแปลกใหม่ของผลิตภัณฑ์ และสีของเส้นขนมจีนที่มีความน่าสนใจ โดยขนมจีนแป้งหมักที่ได้การแทนที่แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ที่ระดับร้อยละ 0 มีคะแนนความชอบโดยรวมสูง

ที่สุด 7.53 คะแนน รองลงมาได้แก่ เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ระดับการแทนที่ในระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 มีคะแนนความชอบโดยรวมเท่ากับ 6.70, 6.53 และ 5.77 คะแนน

ตอนที่ 3 การศึกษาการผลิตเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งที่ได้จากการแทนที่ของแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลินิลสุรินทร์

เส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของผลิตภัณฑ์เส้นขนมจีนแห้ง และมีค่า a_w ตามเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้ง โดยเส้นขนมจีนอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ มีอัตราการคืนตัวและค่าการดูดซับน้ำสูงที่สุด ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการต้มและปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มต่ำที่สุด เส้นขนมจีนที่ผ่านการอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งและค่าการยืดเกาะสูงสุดหลังจากเติมแซนแทนกัม ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกตัวอย่าง

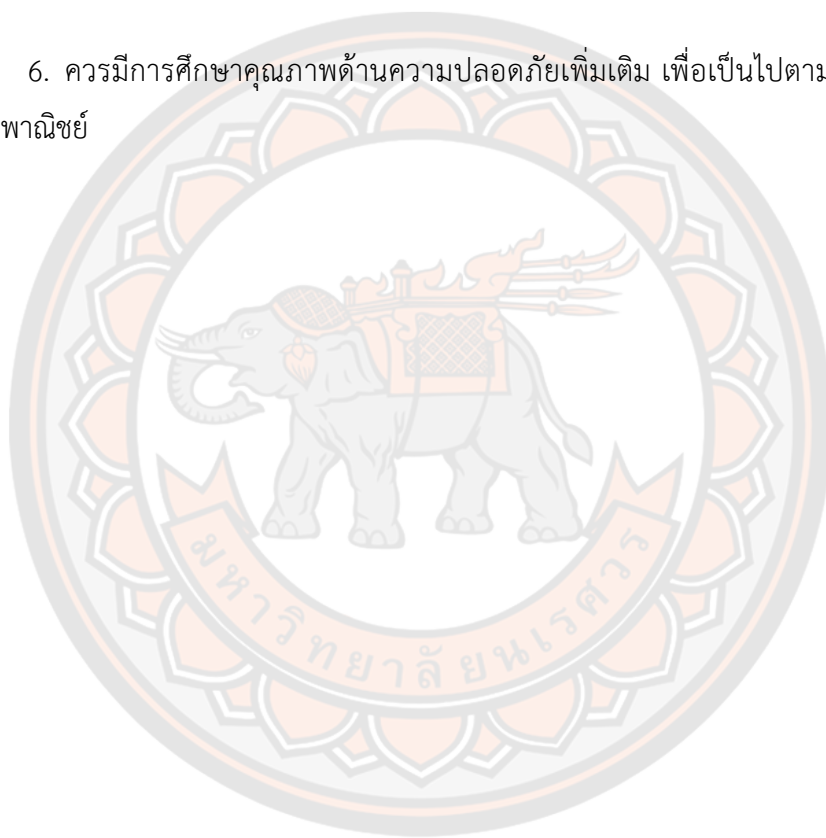
ตอนที่ 4 การศึกษาผลของการเสริมโพรไบโอติกลงในเส้นขนมจีนอบแห้ง

การเติมโพรไบโอติก (*B. coagulans*) ในเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อบแห้งแบบสุญญากาศ และอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณเชื้อโพรไบโอติกเริ่มต้น เท่ากับ 11.47, 11.41 และ 11.19 log CFU/g ตามลำดับ เส้นขนมจีนเมื่อเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 9 วัน จะมีอัตราการรอดชีวิตของสปอร์ *B. coagulans* ร้อยละ 88.40, 92.29 และ 89.54 ตามลำดับ ซึ่งในการทำแห้งแบบสุญญากาศมีปริมาณสปอร์ของ *B. coagulans* เหลือรอดสูงที่สุด และมีอายุการเก็บนานที่สุด (45 วัน) ก่อนที่สปอร์ของ *B. coagulans* จะลดลงเหลือ 6 log CFU/g เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแห้งแบบสุญญากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวอย่างเส้นขนมจีนแป้งหมักที่ผ่านการอบแห้งด้วยอินฟราเรดแบบสุญญากาศมีแนวโน้มลดลงหลังจากผ่านไป 9 วัน โดยไม่พบการเจริญเติบโตของยีสต์และรา ส่วนค่า a_w และปริมาณความชื้นของขนมจีนแป้งหมักอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและอบแห้งแบบสุญญากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ภาชนะในการหมักข้าวควรมีการออกแบบให้เหมาะสมกับปริมาณข้าวที่ใช้และปรับระยะเวลาในการหมักให้เหมาะสมกับปริมาณข้าวหรือสภาพอากาศแวดล้อม
2. การล้างข้าวในระหว่างการหมักและหลังหมัก ควรล้างให้สม่ำเสมอและทั่วถึง

3. การศึกษาโครงสร้างเชิงลึกของแป้งหมักและเส้นขนมจีนที่ได้ เพื่อเห็นโครงสร้างภายในที่ชัดเจนมากขึ้น เช่น การส่องกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy; SEM)
4. การเก็บรักษาเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้ง ควรกำหนดสภาวะในการเก็บรักษาหลากหลาย สภาวะเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของเส้นขนมจีนแป้งหมักอบแห้งในระหว่างการเก็บรักษาเพื่อพิจารณาบรรจุภัณฑ์ต่อไป
5. การศึกษาอายุการเก็บเส้นขนมจีนอบแห้งเสริมโพรไบโอติก ควรมีการศึกษาให้ยาวนานยิ่งขึ้น
6. ควรมีการศึกษาคุณภาพด้านความปลอดภัยเพิ่มเติม เพื่อเป็นไปตามมาตรฐานในการผลิตเชิงพาณิชย์



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กนกรส คงหอม. (2547). *ผลของน้ำตาลที่มีต่อความคงตัวของแอนโทไซยานินในน้ำลูกหว้าหมัก* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กระทรวงสาธารณสุข. (2554). *ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่องการใช้จุลินทรีย์โพรไบโอติกในอาหาร*. 128(86).
- กล้าณรงค์ ศรีรอด, และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). *เทคโนโลยีของแป้ง* (พิมพ์ครั้งที่ 3). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2535. *ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การทหารผ่านศึก.
- กฤษณา เวชกลาง, ภราดร หนูทอง, และเพลงพิน เพียรภูมิพงศ์. (2560). *การวิเคราะห์คุณภาพเส้นขนมจีนภายใต้การอบแห้งด้วยอินฟราเรดและลมร้อน*. นครราชสีมา: คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- เกียรติพงษ์ เจริญจิตต์. (2552). *การพัฒนาสูตรขนมจีนผสมน้ำแครอท น้ำชาเขียว และน้ำดอกอัญชัน* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- จันทร์เฉิดฉาย สังเกตฤกษ์. (2554). *การผลิตขนมจีนแป้งหมัก*. สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก http://www.clinictech.most.go.th/online/pages/techlist_display.asp?tid=401
- จิตธนา แจ่มเมฆ, และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2543). *ธัญชาติ และผลิตภัณฑ์* (พิมพ์ครั้งที่ 3). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชนรดี ชูทอง, ดุจฤดี จือทรง, วาสนา ทองเพชร, และฤทัยรัตน์ สุวรรณสุข. (2559). *การผลิตเส้นขนมจีนขมมันชั้น* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.
- ชนิดา หันสวารสดี. (2551). *เคมีของแป้งและแป้งดัดแปร*. โอ. เอส. พรินต์ติ้ง เฮ้าส์.
- ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์. (2562). *รีโอโลยีของไหลคล้ายนิวโตเนียน*. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข*, 43(3), 392-401.
- ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์. (2562). *รีโอโลยีของไหลคล้ายนิวโตเนียน*. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 47(3), 392-401.
- ญาติกา โยธา. (2552). *การสกัดสารแอนติออกซิแดนท์จากเปลือกแก้วมังกรโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์เสริม* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ณรงค์ นิยมวิทย์. (2528). *ขนมจีน*. *วารสารอาหาร*. 15(3), 123-129.

- ณัฐพล กระจ่าง, และณรงค์ อึ้งกิมบัว. (2559). จลนพลศาสตร์และแบบจำลองการอบแห้งขม้นชั้นด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 21(3), 239-248.
- แดนชัย เครื่องเงิน. (2558). การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำเฉาก๊วยในบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว. ใน *โครงการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
- ทวีศักดิ์ เกษปทุม. (ม.ป.ป.). *ขนมจีน*. กรุงเทพฯ: แม่บ้าน.
- ธีรพร กงบังเกิด, กมลวรรณ โรจน์สุนทรกิตติ, และนิติพงศ์ จิตรีโกชน. (2558). *ผลของการใช้วิธีสุญญากาศต่อการรอดชีวิตของแบคทีเรียในผลไม้กึ่งแห้ง*. พิษณุโลก: ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- นงคราญ พงศ์ตระกูล, ธนัฐธา รอดบุญฤทธิ์, สยาม ภาพลือชัย, ปิยะนุช เนียมทรัพย์, สมคิด ดีจริง, และไพโรจน์ วงศ์พุทธิสิน. (2561). ผลของรูปแบบเซลล์โพรไบโอติกที่มีต่อคุณสมบัติของไอศกรีมนม. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, 13(1), 58-70.
- นราภรณ์ ตั้งหทัยทิพย์. (2561). *คลื่นเทระเฮิร์ตซ์ (Terahertz waves)*. สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก <http://www.thaiphysoc.org/article/20/>
- นฤศันส์ วาสิดิลก. (2541). *การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากปลายข้าวหอมมะลิ* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นวลจันทร์ พารักษา. (2533). สารละลายเกี่ยวกับโพรไบโอติก. *ว.สุกรสาร*, 16(1), 6-13.
- นวลศรี รักอริยะธรรม, และอัญญา เจนวิถีสุข. (2545). *แอนติออกซิแดนท์: สารต้านมะเร็งในผัก-สมุนไพรไทย*. ม.ป.ท.: นพบุรีการพิมพ์.
- นิตยา รัตนานนท์. (2549). *เคมีอาหาร* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โอ. เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์.
- เนตรนภา เมยกลาง, และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. (2557). การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในเครื่องดื่มผลไม้. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (บศ.)*, 14, 69-79.
- ปราณี วราสวัสดิ์. (2547). *การทำขนมจีนแห้งจากข้าวกล้องเปรียบเทียบกับขนมจีนเสริมวิตามิน*. เชียงใหม่: ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

- ปราโมทย์ ศิริโรจน์, ลาวัญย์ ไกรเดช, อรอนงค์ นัยวิกุล, สุภรัตน์ ขวนะ, พัชรี โสธนาสมบุญ, พรเทพ พัฒนานนุรักษ์, และมาลี สุวรรณอัคร์. (2534, 4-7 กุมภาพันธ์). การเปลี่ยนแปลงของ ปริมาณจุลินทรีย์และความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลและกรดใน กระบวนการหมักขมจีน. ใน *รายงานการประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 29*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปรีชา บุญจุง. (2549). *สารต้านอนุมูลอิสระ*. กรุงเทพฯ: พี.เอส.พรินท์.
- ปิ่นชนัท วชิรศิริ, และกิตติพงษ์ ห่วงรักษ์. (2554). การทดแทนข้าวขาวด้วยข้าวกล้องและข้าวกล้อง งอกในขนมจีนแปงหมัก. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 29(3-1), 11-20.
- ปาริตา ขุนแอ. (2550). *ผลของการตัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิด ริโทรเกอร์เดชันของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน* (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต).สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัชรพร ศรีชัยนาท. (2561). *ผลของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีต่อสมบัติทางรีโอโลยีและทางเนื้อสัมผัสของ เนื้อแป้งสาลีที่เตรียมจากถั่วเหลือง* (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- พัชรี โสธนาสมบุญ, อรอนงค์ นัยวิกุล, สุภรัตน์ ขวนะ, มาลี สุวรรณอัคร์, ลาวัญย์ ไกรเดช, ปราโมทย์ ศิริโรจน์, และพรเทพ พัฒนานนุรักษ์ (2534, 4-7 กุมภาพันธ์). คุณลักษณะทางเคมีและ กายภาพของข้าวหักที่ใช้ทำขนมจีน. ใน *การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 29*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พันทมาศ จุมครอง, นรินทร์ หอมเสน, วุฒิพงศ์ วันดี, มารุต สมนึกตน, ประทีป ตุ่มทอง, และศิริชัย เสาะรส. (2556, 21-22 มีนาคม 2556). เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. ใน *การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 1 และสัมมนาวิชาการราช มงคลสุรินทร์วิชาการ ครั้งที่ 5: วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี เกษตรอินทรีย์สู่อาเซียน* (น. 178-184). สุรินทร์: มหาวิทยาลัยราชมงคลสุรินทร์.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, และนิธิยา รัตนานนท์. (2553). *Vacuum drier/เครื่องทำแห้งแบบ สุญญากาศ*. สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2973/vacuum-drier>.
- ภราดร หนูทอง, กุณฑิกา เวชกลาง, เพลงพิน เพ็ชรภูมิพงศ์, และไพรัชต์ ดิฐคุณารักษ์กุล. (2560). *การศึกษาการอบแห้งขนมจีนด้วยอินฟราเรดและลมร้อน*. คณะวิทยาศาสตร์และศิลป ศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

- ภัทรภรณ์ แก้วกุล. (2555). *โครงการเพิ่มมูลค่าข้าวพื้นเมืองจังหวัดสุรินทร์โดยการผลิตเป็นข้าวกล้องงอกและน้ำข้าวกล้องงอก*. สุรินทร์: สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์.
- มลศิริ วีโรทัย. (2545). *เทคโนโลยีของผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ*. กรุงเทพฯ: สถาบันพัฒนาคุณภาพวิชาการ.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. (2546). *ขนมจีนแห้ง มผช. 140/2547.*). สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก <http://tcps.tisi.go.th/public/StandardList.aspx>.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. (2547). *ขนมจีน มผช. 500/2547.*). สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps500_47.pdf
- ยศพร พลายโธ. (2559). *ฤทธิ์การป้องกันภาวะเครียดจากออกซิเดชันในเซลล์ลำไส้มนุษย์ของข้าวหมากจากข้าวเหนียวดำพันธุ์ลิ้มผิว*. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 25(5), 1-13.
- ยุพาพร ผลาจรศักดิ์. (2547). *การสกัดและความคงตัวของแอนโธไซยานินส์ที่สกัดได้จากเปลือกมังคุด* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- รตินันท์ เหลือมพล. (2561). *สมการอบแห้งแบบชั้นบางของแครอทโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับปีมความร้อน*. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 28(1), 147- 155.
- รวินิภา ศรีมูล, และศิริจันทร์ ตาใจ. (2557). *ปริมาณฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในน้ำผลไม้แปรรูปในจังหวัดจันทบุรี*. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก*. 7, 24-30.
- รัชนก จัตวงษ์. (2545). *การพัฒนาแป้งขนมจีนสำเร็จรูป* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เรวัฒน์ คาวาน, สุรสิทธิ์ เทียงจันตา, และสวัสดี กีไศย์. (2561). *การทำอัตราการแห้งตัวของขนุนโดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ*. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 11(2), 67-77.
- วรรณช ศรีเกษมรักษ์, ศุภวรรณ ถาวรชินสมบัติ, ปฎิมาภรณ์ พะสุวรรณ, และเทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. (2542). *การศึกษาความสัมพันธ์คุณสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของแป้งข้าวเจ้ากรรมวิธีการทำขนมจีนและคุณภาพขนมจีน*. กรุงเทพฯ: สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ.
- วิเชียร ดวงสีเสน. (2555). *การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- วีไล รังสาตทอง. (2543). *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ศิววัฒน์ ไทยอุดม, และหทัยชนก นพจรรยาศรี. (2557). ผลของอันตรกิริยาระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและแคปปา-คาราจีแนนต่อการตกผลึกน้ำแข็งใหม่ในไอศกรีม. ใน *โครงการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวขอนแก่น. (ม.ป.ป.). *ชนิด-ข้าวเจ้า (เยื่อหุ้มเมล็ดด่างสี)* นาสวนไวต์ต่อช่วงแสง. สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก <http://kknrsc.ricethailand.go.th/index.php/e-library/varieties/323-hom-mali-nin-surin>.
- สมนึก ยิ้มย่อง. (2553). *ความเสถียร การเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์การต้านจุลินทรีย์ และเซลล์มะเร็งของสารสกัดบัวกลุ่มอุบลชาติ* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สายัณห์ สุขพงษ์พันธ์, และวิรัตน์ ปฐมชัยอัมพร. (2549). *ความหนักคุณลักษณะเฉพาะของของไหล*. กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). *ผลผลิตข้าว*. สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก <http://www.thairiceexporters.or.th/production.htm>.
- สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. (2556). *รายงานผลการทดลองฤดูนาปี 2555 โครงการวิจัยและพัฒนาพันธุ์ข้าวนาข้าวฝืนภาคเหนือตอนบนและภาคตะวันออกเฉียงเหนือระยะที่สอง*. กรุงเทพฯ: กรมการข้าว.
- สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2553). *แอนโทไซยานิน (Anthocyanin)*. กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- สุนันทา ทองทา, และธนาวิทย์ กุลรัตน์รักษ์. (2555). *การผลิตสตาร์ชซีเตรททนย่อยต่อเอนไซม์*. (รายงานผลการวิจัย). นครราชสีมา: สาขาเทคโนโลยีอาหาร, สำนักเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุภาวดี พัสตร. (2555). *อาหารไทย 4 ภาค*. สืบค้น 25 มกราคม 2564, จาก <https://passadorn.wordpress.com/category/%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%92%E0%B8%99%E0%B8%98%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%B2/>

- แสนสุรีย์ เชื้อวงศ์, และอุปถัมภ์ โพธิ์กนิษฐ์. (2559). *เครื่องอบแห้งด้วยความร้อนร่วมแสงอาทิตย์ และแก๊สชีวภาพ*. สกลนคร: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ สกลนคร.
- อนุชิตา มุ่งงาม. (2555). *แอนติออกซิแดนซ์ในธัญพืช*. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- อรอนงค์ นัยวิกุล, จิตธนา แจ่มเมฆ, สินีนาถ จรรย์โชติเลิศ, กนกพรรณ เกียรติไกรกฤษฎา, และวีระ วงศ์ทรัพย์คณา. (2535). การผลิตขนมจีนกึ่งสำเร็จรูป. *วารสารเกษตรศาสตร์*, 26, 39-43.
- อรอนงค์ นัยวิกุล, สุภรัตน์ ชวนะ โสธนาสมบูรณ์, มาลี สุวรรณอัคร์, ลาวัญย์ ไกรเดช, ปราโมทย์ ศิริโรจน์, และพรเทพ พัฒนานุรักษ์. (2534, 4-7 กุมภาพันธ์). การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของขนมจีนในกระบวนการผลิต. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 29* กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). *การใช้ประโยชน์จากข้าวในการสร้างมูลค่าเพิ่มเพื่อการส่งออก*. กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อริญา ลาภโคกสูง. (2555). *ผลของปริมาณอะมิโลสและโครงสร้างอะมิโลเพคตินในสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ชนิดที่ 3 (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต)*. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อรุษา เขาวนลิขิต. (2554). การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโทไซยานิน. *วารสารมหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 3(6), 26-36.
- อรุษา เขาวนลิขิต. (2554). การสกัดและวิธีการวิเคราะห์แอนโทไซยานิน. *วารสารมหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 3(6), 26-36.
- อัญญา เจนวิถึ. (2554). *การตรวจหาและบ่งชี้ชนิดสารต้านอนุมูลอิสระจากผักพื้นบ้านและสมุนไพรไทย (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต)*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อิศเรศ วรรณทร. (2554). *การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุพูนในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนโดยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต)*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- อุทัย คันโช. (2535). หลักการโปรไบโอติกในเชิงอาหารสัตว์. *วารสารสุกรศาสตร์*. 18, 11-16.
- โอภา วัชรคุปต์. (2549). *สารต้านอนุมูลอิสระ*. กรุงเทพฯ: พี.เอส.พรินท์.
- AACC. (2000), *Determination of the Pasting of Rice with the Rapid Visco Analyzer*, In AACC, *International Approved Methods of Analysis*, (11th ed). AACC International, Saint Paul, MN: US.

- AACC. (2000). *Methods of Analysis* (11th ed.). N.P.: AACC international.
- Alibas, I. (2007). Energy consumption & colour characteristics of nettle leaves during microwave vacuum & convective drying. *Biosystems Engineering*, 96(1), 495-502.
- American Public Health Association. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22nd ed.). Washington, D.C.; 9215 A-C, p. 9-49-9-56.
- Anal, A. K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery review. *Trends Food Sci. Technol*, 18(1) 240-251.
- Anderson, O.M. and Markham, K.R. (2006). Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications. Boca Raton, Fla.: CRC Press / Taylor & Francis, 1, 472-478.
- Anderson, R., Conway, H., Pfeifer, V., & Griffin, E. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14(1), 4-12.
- AOAC International. (2006). *Monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants and wines*. pH differential method.
- AOAC Method. (2002). AACC Report: The definition of dietary fiber. *Cereal Food Wolrd*, 46, 112-126.
- AOAC Method. 2002.02. (2002). AACC Report: The definition of dietary fiber: *Cereal Food Wolrd.*, 46, 112-126.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis* (15th ed.) Washington, D.C.: A.O.A.C.
- AOAC. (2001). *Official Method of Analysis*. (16th ed.). USA: Washington, D.C.
- Arihara, K., Ota, H., Itoh, M., Kondo, Y., Sameshima, T., Yamanaka, H., ... & Miki, T. (1998). Lactobacillus acidophilus group lactic acid bacteria applied to meat fermentation. *Journal of Food Science*, 63(3), 544-547.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., & Benjapiyaporn, C. (2010). Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2), 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2009.09.006>
- Asan Özüsaglam, M. (2010). Importance of *Bacillus coagulans* Bacterium as Probiotic in Animal Nutrition. Süleyman Demirel Üniv. *Ziraat Fak. Derg*, 5(1), 50-57.

- Basílio, N., & Pina, F. (2016). Chemistry and Photochemistry of Anthocyanins and Related Compounds: A Thermodynamic and Kinetic Approach. *Molecules (Basel, Switzerland)*, *21(11)*, 1502. <https://doi.org/10.3390/molecules21111502>
- Bhanja, T., Kumari, A., & Banerjee, R. (2009). Enrichment of phenolics and free radical scavenging property of wheat koji prepared with two filamentous fungi. *Bioresource Technology*, *100(11)*, 2861-2866. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.055>
- Bhutto, A. A., Kalay, S., Sherazi, S. T. H., & Culh, M. (2018). Quantitative structure–activity relationship between antioxidant capacity of phenolic compounds and the plasmonic properties of silver nanoparticles. *Talanta*, *189*, 174-181.
- Bilanovic, D., Starosvetsky, J., & Armon, R. H. (2016). Preparation of biodegradable xanthan–glycerol hydrogel, foam, film, aerogel and xerogel at room temperature. *Carbohydrate Polymers*, *148*, 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.058>
- Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E., & Tiwari, B. K. (2011). Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. *Trends in Food Science & Technology*, *22(10)*, 570-575. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.007>
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1974). *Drying cereal grains*. Westport, Conn: AVI Pub. Co.
- Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, M. d. L., Páez-Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., & Galán-Vidal, C. A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*, *113(4)*, 859-871. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.001>
- Changlian, P., Zhi, F.L., Guizhu, L., and Shaowei, C. (2006). The anti-photooxidation of anthocyanins-rich leaves of a purple rice cultivar. *Science in China Series C:Life Sciences*, *49(6)*, 543-551.
- Dande, S., Reddy, C., & Manchala, R. (2009). Antioxidant activity of commonly consumed cereals, millets, pulses and legumes in India. *Indian journal of biochemistry & biophysics*, *46*, 112-115.

- Dasgupta, N., & De, B. (2004). Antioxidant activity of *Piper betle* L. leaf extract in vitro. *Food Chemistry*, 88(2), 219-224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.036>
- Dawilai, S., Muangnoi, C., Praengamthanachoti, P., & Tuntipopipat S. (2013). Antiinflammatory activity of bioaccessible fraction from *Eryngium foetidum* leaves. *BioMed Research International*, 2013, 1-8.
- Decena, J. (2010). Functional components of cooked and raw banana (*Musa sp.cv.saba*) Bud. Retrieved July 2, 2019, from <https://www.scribd.com/doc/50759570/Functional-Components-of-Cooked-and-Raw-Banana-Blossom-Decena-J>.
- Deng, G. F., Xu, X. R., Zhang, Y., Li, D., Gan, R. Y., & Li, H. B. (2013). Phenolic compounds and bioactivities of pigmented rice. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 53(3), 296-306. <https://doi.org/10.1080/10408398.2010.529624>
- Englyst, H.N. and Hudson, G.J. (1992). The classification and measurement of dietary carbohydrates. *Food Chemistry*, 57, 15-21.
- Erten, T., Adams, G., Foster, T., & Harding, S. (2014). Comparative heterogeneity, molecular weights and viscosities of xanthans of different pyruvate and acetate content. *Food Hydrocolloids*, 42, 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.04.012>
- Falleh, H., Ksouri, R., Lucchessi, M. E., Abdelly, C., & Magné, C. (2012). Ultrasound-assisted extraction: effect of extraction time and solvent power on the levels of polyphenols and antioxidant Activity of *Mesembryanthemum edule* L. Aizoaceae Shoots. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 11(2). doi: 10.4314/tjpr.v11i2.10.
- Fellows, P. J. (2009). 16 - Dehydration. In P. J. Fellows (Ed.), *Food Processing Technology (Third Edition)* (pp. 481-524). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845696344.3.481>
- Ferruzzi, M. G., Lumpkin, J. L., Schwartz, S. J., & Failla, M. (2006). Digestive Stability, micellarization, and uptake of betacarotene isomers by CaCO-2 human intestinal cells. *J. Agr. Food Chem*, 54, 2780-2785.

- Francis, F.J. (2002). *Food colorings*. In MacDougall, DB. *Colour in food:improving quality* (pp. 310-336). Boca Raton, Fla: CRC Press; Cambridge: Woodhead Pub.
- Fuller, R. (1993). Probiotic food current use and future developments. *Int Food Inged*, 3, 23-26.
- Gibson, T. S., Solah, V. A., & McCleary, B. V. (1997). A Procedure to Measure Amylose in Cereal Starches and Flours with Concanavalin A. *Journal of Cereal Science*, 25(2), 111-119. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0086>
- Habibi, H., & Khosravi, K. (2017). Effective variables on production and structure of xanthan gum and its food applications: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 10, 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.02.013>
- Hagiwara, A., Miyashita, K., Nakanishi, T., Sano, M., Tamano, S., Kadota, T., & Shirai, T. (2001). Pronounced Inhibition by a Natural Anthocyanin, Purple Corn Color, of 2-Amino-1-Methyl-6-Phenylimidazo [4,5-b] Pyridine (PhIP)- Associated Colorectal Carcinogenesis in Male F344 Rats Pretreated with 1,2-Dimethylhydrazine. *Cancer Letters*, 171(1), 17-25.
- Hao, J., Zhu, H., Zhang, Z., Yang S., & Li, H. (2015). Identification of anthocyanins in black rice (*Oryza sativa* L.) by UPLC/Q-TOF-MS and their in vitro and in vivo antioxidant activities. *Journal of Cereal Science*, 64, 92-99.
- Haralampu, S.G. (2000). Resistant starch-a review of the physical properties and biological impact of RS₃. *Carbohydrate Polymer*, 41, 285-292.
- Harue, H., Lesley, H., Glenn, G., Sean, F., David, K., & Anne, K. (2011). Impact of GanedenBC30 (*Bacillus coagulans* GBI-30, 6086) on population dynamics of the human gut microbiota in a continuous culture fermentation system. *International Journal of Probiotics and Prebiotics*, 6(1), 65-72.
- Hiemori, M., Koh, E., & Mitchell, A. (2009). Influence of Cooking on Anthocyanins in Black Rice (*Oryza sativa* L. japonica var. SBR). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 1908-1914. <https://doi.org/10.1021/jf803153z>

- Hizukuri, S. (1995). *Analytical aspects*. In *Carbohydrates in food*. Edited by Ann-Charlotte. New York, Basel, Hong Kong: Eliasson Marcel Dekker.
- Huang, Y., & Adams, M. (2004). In vitro assessment of the upper gastrointestinal tolerance of potential probiotic dairy propionibacteria. *Int. J. Food Microbiol*, 91(1), 253-260.
- lenergyguru. (2015). *Drying*. <https://ienergyguru.com/2015/09/drying/>
- Inglott, G. E., Peterson, S. C., Carriere, C. J., & Maneepun, S. (2005). Rheological, textural, and sensory properties of Asian noodles containing an oat cereal hydrocolloid. *Food Chemistry*, 90(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.08.023>
- Jane, J., Hasjim, J., Birt, D., & Zhao, Y. (2011). Resistant food starches and methods related thereto. *Patent Application Publication*, 1-9.
- Jason, T. (2017). Introducing A New Probiotic: *Bacillus Coagulans*. Retrieved March 20, 2019, from https://www.huffingtonpost.ca/jason-tetro/new-probiotics_b_9438360.html.
- Jeesuda, K., & Wannee, J. (2010). Volatile profile of khanom jeen, Thai fermented rice noodles, and the changes during the fermentation process. *ScienceAsia*, 36, 46-51.
- Jeong, S., Kim, M., Yoon, M. R., & Lee, S. (2017). Preparation and characterization of gluten-free sheeted doughs and noodles with zein and rice flour containing different amylose contents. *Journal of Cereal Science*, 75, 138-142. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.03.022>
- Jia, z., Tang, M. & Wu, J. (1998). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 69, 555-559.
- Jurenka, J. S. (2012). *Bacillus coagulans*: Monograph. *Alternative Medicine Review*, 17, 76-81.
- Kahkonen, M.P., & Heinonen, M. (2003). Antioxidant activity of anthocyanins and their aglycons. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 628-633.
- Kaila, M., Isolauri, E., Soppi, E., Virtanen, E., Laine, S., & Arvilommi, H. (1992). Enhancement of the circulating antibody secreting cell response in human diarrhoea by a human *Lactobacillus* strain. *Pediatr. Res*, 32, 141-144.

- Kalman, D.S., Schwartz, H.I., Alvarez, P., Feldman, S., Pezzullo, J.C., & Krieger, D.R. (2009). A prospective, randomized, double-blind, placebo-controlled parallel-group dual site trial to evaluate the effects of a *Bacillus coagulans*-based product on functional intestinal gas symptoms. *BMC Gastroenterology*, 9(85), 1-7.
- Karri, S.K., Majeed, M., Natarajan, S., Sivakumar, A., Ali, F., Pande, A., & Majeed, S. (2016). Evaluation of anti-diarrhoeal activity of *Bacillus coagulans* MTCC 5856 and its effect on gastrointestinal motility in wistar rats. *Int. J. Pharm. Biol. Sci*, 7(1), 311–316.
- Kim, Y.-S., Lee, J., Heo, S., Lee, J.-H., & Jeong, D.-W. (2021). Technology and safety evaluation of *Bacillus coagulans* exhibiting antimicrobial activity for starter development. *Lwt*, 137, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110464>
- Kontula, P., Jaskari, J., Nollet, L., De Smet, I., von Wright, A., Poutanen, K., & Mattila-Sandholm, T. (1998). The colonization of a simulator of the human intestinal microbial ecosystem by a probiotic strain fed on a fermented oat bran product: effects on the gastrointestinal microbiota. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 50(2), 246-252.
- Kool, M. M., Schols, H. A., Delahaije, R. J., Sworn, G., Wierenga, P. A., & Gruppen, H. (2013). The influence of the primary and secondary xanthan structure on the enzymatic hydrolysis of the xanthan backbone. *Carbohydrate polymers*, 97(2), 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.045>
- Kristjansson, J.K. (1991). *Thermophilic Bacteria* (pp. 26–29). Boca Raton, FL, USA: CRC Press:
- Leach, H. W., McCowen, L. D., & Schoch, T. J. 1959. Swelling power and solubility of granular starches. *Cereal Chemistry*, 36, 534-544.
- Li, J., Walker, C. E., & Faubion, J. M. (2011). Acidulant and oven type affect total anthocyanin content of blue corn cookies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(1), 38–43. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4173>

- Li, W. (2007). Kinetics of hydrolysis and changes in amylose content during preparation of microcrystalline starch from high-amylose maize starches. *Carbohydrate Polymers*, 69(2), 398-405-2007. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.12.022>
- Lin, S., Zhu, Q., Wen, L., Yang, B., Jiang, G., Gao, H., Chen, F., & Jiang, Y. (2014). Production of quercetin, kaempferol and their glycosidic derivatives from the aqueous-organic extracted residue of litchi pericarp with *Aspergillus awamori*. *Food chemistry*, 145, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.048>
- Lu, Z.-H., Yuan, M.-L., Sasaki, T., Li, L.-T., & Kohyama, K. (2007). Rheological Properties of Fermented Rice Flour Gel. *Cereal Chemistry - CEREAL CHEM*, 84, 620-625. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-84-6-0620>
- Majeed, M., & Prakash, L. (1998). *LactoSpore®: The Effective Probiotics*. Piscataway: Nutri science publishers.
- Majeed, M., Majeed, S., Nagabhushanam, K., Natarajan, S., Sivakumar, A., & Ali, F. (2016). Evaluation of the stability of *Bacillus coagulans* MTCC 5856 during processing and storage of functional foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(4), 894-901. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijfs.13044>
- Majeed, M., Majeed, S., Nagabhushanam, K., Natarajan, S., Sivakumar, A., & Ali, F. (2016). Evaluation of the stability of *Bacillus coagulans* MTCC5856 during processing and storage of functional foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 51(4), 894-901. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13044>
- Marcial-Coba, M. S., Pjaca, A. S., Andersen, C. J., Knøchel, S., & Nielsen, D. S. (2019). Dried date paste as carrier of the proposed probiotic *Bacillus coagulans* BC4 and viability assessment during storage and simulated gastric passage. *Lwt*, 99, 197-201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.052>
- Mazza G. J. (2007). Anthocyanins and heart health. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*, 43(4), 369–374.

- McCarthy, D.F., Gallagher, E. Gormley, T.R., Schober, T.J., & Arendt, E.K. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten free bread. *Cereal Chemistry*, 82(5), 609-615.
- McDougall, G.J., Dobson, P., Smith, P., Blake, A., & Stewart, D. (2005). Assessing Potential Bioavailability of Raspberry Anthocyanins Using an *in Vitro* Digestion System. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 5896-5904.
- McDougall, G.J., Fyffe, S., Dobson, P., & Stewart, D. (2007). Anthocyanins from red cabbage – stability to simulated gastrointestinal digestion. *Phytochemistry*, 68, 1285-1294.
- Mercadante, A., & Bobbio, F. O. (2008). Anthocyanins in foods: Occurrence and physicochemical properties. *Food Colorants: Chemical and Functional Properties*, 1, 241-276.
- Metchnikoff, E. (1908). *The prolongation of life*. New York: GP Putnam's Sons.
- Miguel, M. (2011). Anthocyanins: Antioxidant and/or anti-inflammatory activities. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 1, 7-15.
- Muangnoi, C. (2007). *Bioaccessibility, Cellular uptake and angiotensin I converting enzyme (ACE) inhibitor activity of triterpenoids from centella asiatica (Linn.) urban* (Master thesis). Bangkok: Mahidol university.
- Muselik, J., Garcia-Alonso, M., Martin-Lopez, M.P., Zemlicka, M., & Rivas-Gonzalo J.C. (2007). Measurement of antioxidant activity of wine catechins, procyanidins, anthocyanins and pyranoanthocyanins. *International Journal of Molecular Science*, 8, 797-809.
- Nam, S. H. (2006). Antioxidative activities of bran extracts from twenty one pigmented rice cultivars. *Food Chemistry*, 94(4), 613-620-2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.010>
- Noriega, L., Gueimonde, M., Sanchez, B., Margolles, A., & Reyes-Gavilan, C.G. (2004). Effect of the adaptation to high bile salts concentrations on glycosidic activity, survival at low pH and croee-resistance to bile salts in *Bifidobacterium*. *Int. J. Food Microbiol*, 92, 79-86.

- Park, J., Sung, J. M., Choi, Y.-S., & Park, J.-D. (2020). Effect of natural fermentation on milled rice grains: Physicochemical and functional properties of rice flour. *Food Hydrocolloids*, *108*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106005>
- Patras, A., Brunton, N., O'Donnell, C., & Brijesh kumar, T. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods: Mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science and Technology*, *21*, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.004>
- Peng, J., Mah, J.-H., Somavat, R., Mohamed, H., Sastry, S., & Tang, J. (2012). Thermal Inactivation Kinetics of *Bacillus coagulans* Spores in Tomato Juice. *Journal of Food Protection*, *75*(7), 1236-1242. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-490>
- Ranhotra, G.S., Gelroth, J. A., & Glaser, B. K. (1996). Effect of resistant starch on blood and liver lipids in hamsters. *Cereal Chem*, *73*, 176-178.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, *26*(9-10), 1231-1237.
- Reddy, B., Frost, R., Weier, M., & Martens, W. (2006). Ultraviolet-Visible, near Infrared and Mid Infrared Reflectance Spectroscopy of Turquoise. *J. Near Infrared Spectrosc*, *14*, 241-250. <https://doi.org/10.1255/jnirs.641>
- Rein, M. (2005). Copigmentation reactions and color stability of berry anthocyanins. (Dissertation thesis). Finland: University of Helsinki.
- Saiyot, A., Kaenango, E., Tanaruk, R., Chuenban, T., A-Surin, J., Dumnit, K., ... Wasusun, A. (2017). Mali Nil Surin (Mali Dam 2). *Thai Rice Research Journal*, *8*(2), 8-25.
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., & Kulkarni, P. R. (2006). Resistant Starch-A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *5*, 1-17.
- Sarma, A.D., Sreelakshmi, Y., & Sharma R. (1997). Antioxidant ability of anthocyanins against ascorbic acid oxydation. *Phytochemistry*, *45*, 671-674.
- Schoch, T. (1964). Swelling power and solubility of granular starches. In Whistler, R. L. (Ed.). *Methods in Carbohydrate chemistry*, Vol. IV. New York: Academic Press.

- Scientific Psychic. (n.p.). *Carbohydrates-Chemical Structure*. Retrieved August 22, 2019, from <https://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates1.html>.
- Semantic Scholar. (2005). *Copigmentation reactions and color stability of berry anthocyanins*. Retrieved September 2, 2019, from <https://www.semanticscholar.org/paper/Copigmentation-reactions-and-color-stability-of-SantosBuelga/39b50e7a118ade7e5553f50e243443b18f6aa728/figure/7>
- Shao, Y., Xu, F., Sun, X., Bao, J., & Beta, T. (2014). Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.). *Journal of cereal science*, *59*(2), 211-218.
- Shao, Y., Xu, F., Sun, X., Bao, J., & Beta, T. (2014). Phenolic acids, anthocyanins, and antioxidant capacity in rice (*Oryza sativa* L.) grains at four stages of development after flowering. *Food chemistry*, *143*, 90-96.
- Shi, X., & Bemiller, J. (2002). Effects of food gums on starch suspensions during pasting. *Carbohydrate Polymers*, *50*, 7-18. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00369-1)
- Shih, M.-C., Kuo, C.-C., & Chiang, W. (2009). Effects of drying and extrusion on colour, chemical composition, antioxidant activities and mitogenic response of spleen lymphocytes of sweet potatoes. *Food Chemistry*, *117*(1), 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.03.084>
- Shin, H.-Y., Kim, S.-M., Ju Hun, L., & Lim, S.-T. (2018). Solid-state fermentation of black rice bran with *Aspergillus awamori* and *Aspergillus oryzae*: Effects on phenolic acid composition and antioxidant activity of bran extracts. *Food Chemistry*, *272*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.174>
- Sikorski, Z.E. (2007). *Chemical and unctional Properties of Food Components* (2nd ed.). Boca Raton, Fla.: CRC Press,
- Skaar, I., Jordheim, M., Byamukama, R., Mbabazi, A., Wubshet, S. G., Kiremire, B., & Andersen, O. M. (2012). New anthocyanidin and anthocyanin pigments from blue plumbago. *Journal of agricultural and food chemistry*, *60*(6), 1510–1515. <https://doi.org/10.1021/jf2048004>

- Slater, T. F. (1984). Free-radical mechanisms in tissue injury. *The Biochemical journal*, *222*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1042/bj2220001>
- Somavat, R., Mohamed, H. M. H., & Sastry, S. K. (2013). Inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores under ohmic and conventional heating. *LWT - Food Science and Technology*, *54*(1), 194-198. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.004>
- Sompong, R., Siebenhandl-Ehn, S., Linsberger-Martin, G., & Berghofer, E. (2011). Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka. *Food Chemistry*, *124*(1), 132-140. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.05.115.
- Sreeramulu, D., Vijaya Kumar Reddy, C., & Raghunath, M. (2009). Antioxidant activity of commonly consumed cereals, millets, pulses and legumes in India. *Indian Journal of Biochemistry Biophysics*, *46*(1), 112-115.
- Supujchara Nopchinda. (2014). Probiotics for Health Promotion. *Journal of The Royal Thai Army Nurses*, *15*(3), 430-435.
- Tabilo-Munizaga, G., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, *67*(1), 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.062>
- Takeda, Y., Hizukuri, S., & Juliano, B. O. (1987). Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate Research*, *168*(1), 79-88. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(87\)80008-3](https://doi.org/10.1016/0008-6215(87)80008-3)
- Taranto, M.P., Perez-Martinez, G., & De Valdez, G.F. (1996). Effect of bile acid on the cell membrane functionality of lactic acid bacteria for oral administration. *Res. Microbiol*, *157*, 720-725.
- Thitipramote, N., Pradmeeteekul, P., Nimkamnerd, J., Chaiwut, P., Pintathong, P., & Thitilerdecha, N. (2016). Bioactive compounds and antioxidant activities of red (Brown Red Jasmine) and black (Kam Leum Pua) native pigmented rice. *International Food Research Journal*, *23*(1), 410.
- Tokta, B., Bildik, F., & Ozcelik, B. (2018). Effect of fermentation on anthocyanin stability and in vitro bioaccessibility during shalgam (*salgam*) beverage production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *98*, 3066–3075.

- Wang, T. Y., Li, Q., & Bi, K. S. (2018). Bioactive flavonoids in medicinal plants: Structure, activity and biological fate. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *13*(1), 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2017.08.004>
- Wang, Y., Liang, J., Luan, G., Zhang, S., Zhuoma, Y., Xie, J., & Zhou, W. (2019). Quantitative Analyses of Nine Phenolic Compounds and Their Antioxidant Activities from Thirty-Seven Varieties of Raspberry Grown in the Qinghai-Tibetan Plateau Region. *Molecules (Basel, Switzerland)*, *24*(21). <https://doi.org/10.3390/molecules24213932>
- Wiczowski, W., Szawara-Nowak, D., & Romaszko, J. (2016). The impact of red cabbage fermentation on bioavailability of anthocyanins and antioxidant capacity of human plasma. *Food Chem*, *190*, 730-740. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.021>
- Xu, W., Jin, W., Lin, L., Zhang, C., Li, Z., Li, Y., Song, R., & Li, B. (2014). Green synthesis of xanthan conformation-based silver nanoparticles: antibacterial and catalytic application. *Carbohydrate polymers*, *101*, 961–967. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.032>
- Yang, Z. & Zhai, W. (2010). Identification and Antioxidant Activity of Anthocyanins Extracted from the Seed and Cob of Purple Corn (*Zea mays* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *11*(1), 169-176.
- Yeoh, S.-Y., Alkarkhi, A. F. M., & Easa, A. M. (2014). Effect of Cross-Linking Agents on Physicochemical, Textural Properties and Microstructure of Canned Soy Protein Isolate-Yellow Alkaline Noodles Prepared by Retort Processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, *38*(3), 1187-1197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpp.12079>
- Zhao, C.L., Guo, H.C., Dong, Z.Y., & Zhao, Q. (2009). Pharmacological and nutritional activities of potato anthocyanins. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, *2*(10), 463-468.

Zielinski, H., Kozłowska, H., & Lewczuk, B. (2001). Bioactive compounds in the cereal grains before and after hydrothermal processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2(3), 159-169. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(01\)00040-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1466-8564(01)00040-6)





ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์คุณภาพด้านเคมี กายภาพ และจุลชีววิทยา

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

1. ปริมาณความชื้น วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2001)

1.1 อบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้นหลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก

1.2 ชั่งตัวอย่างแห้ง 1-3 กรัม ลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

1.3 นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 5-6 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละความชื้น (โดยน้ำหนักเปียก)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละความชื้น (โดยน้ำหนักแห้ง)} = \frac{\text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก}}{(100 - \text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก})} \times 100$$

2. ปริมาณโปรตีน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2001)

2.1 ชั่งตัวอย่างแห้ง 1 กรัม เติมคະตะลิสต์เจลดतालแบบเม็ด จำนวน 2 เม็ด และกรดซัลฟูริกเข้มข้น (ร้อยละ 98) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดสำหรับย่อย

2.2 นำไปย่อยโดยใช้เครื่องย่อยโปรตีนในตู้ดูดควัน ย่อยจนสารละลายมีสีฟ้าใสหรือไม่มีสี ตั้งทิ้งไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้อง

2.3 เติมสารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 2 ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร และเติมอินดิเคเตอร์ 3 หยด เขย่าให้เข้ากัน

2.4 นำเข้าเครื่องกลั่น โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรด

2.5 นำสารละลายไปไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนได้สารละลายสีชมพู และทำ Blank เช่นเดียวกับตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของโปรตีน} = \frac{[(V_1 - V_2)(M)(1.4007)(5.71)]}{W}$$

V_1 = ปริมาตร (มิลลิลิตร) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง

V_2 = ปริมาตร (มิลลิลิตร) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับ Blank

M = ความเข้มข้น (โมลาร์) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก

W = น้ำหนักตัวอย่างเป็นมิลลิกรัม

5.71 = Conversion factor

3. ปริมาณไขมัน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2001)

3.1 อบ Extraction cup ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้นหลังจากนั้นชั่งน้ำหนักชั่งน้ำหนัก

3.2 ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในหลอดสำหรับใส่ตัวอย่าง (Thimble)

3.3 นำหลอดตัวอย่างใส่เข้าไปใน Extraction Unit เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ลงใน Extraction cup จนเต็ม

3.4 ให้ความร้อนทำการสกัดไขมันจากตัวอย่างนานประมาณ 3-4 ชั่วโมง

3.5 กลับเอาปิโตรเลียมอีเทอร์ออกจากไขมัน นำ Extraction cup และไขมันไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันในตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100$$

4. การสกัดและการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

4.1 สกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ตามวิธีของ Sompong et al. (2011) และ Falleh et al. (2012)

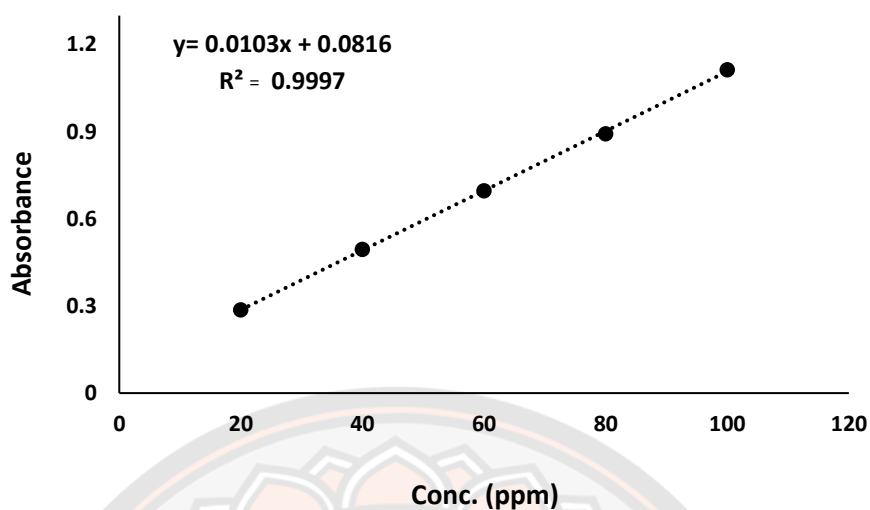
ชั่งตัวอย่าง 2-5 กรัม ใส่หลอดปั่นหมุนเหวี่ยง 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำหลอดปั่นหมุนเหวี่ยงวางในอ่างน้ำอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที โดยทำการเขย่าทุก ๆ 5 นาที เมื่อครบเวลานำไปแยกตะกอนด้วยเครื่องปั่นหมุนเหวี่ยงที่ 6,000 รอบ/นาที นาน 10 นาที จากนั้นนำส่วนใสไประเหยด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และนำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จากนั้นปรับปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 5 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 50 เก็บสารละลายตัวอย่างในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

4.2 สกัดแอนโทไซยานินทั้งหมดเพื่อวิเคราะห์แอนโทไซยานินด้วยวิธี pH differential (อรุษา เขาวนลิขิต, 2554)

ชั่งตัวอย่าง 2-5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 1 N HCl:Methanol (v/v) ในอัตราส่วน 15:85 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นปิดปากขวดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 230 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบกำหนดนำไปแยกส่วนใสด้วยเครื่องปั่นหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบ/นาที นาน 10 นาที นำส่วนใสไประเหยเครื่องระเหยสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และนำมากรองด้วย Syringe Filter ที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน จากนั้นปรับปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 2 มิลลิลิตร เก็บสารละลายตัวอย่างในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

4.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Shao et al., 2014)

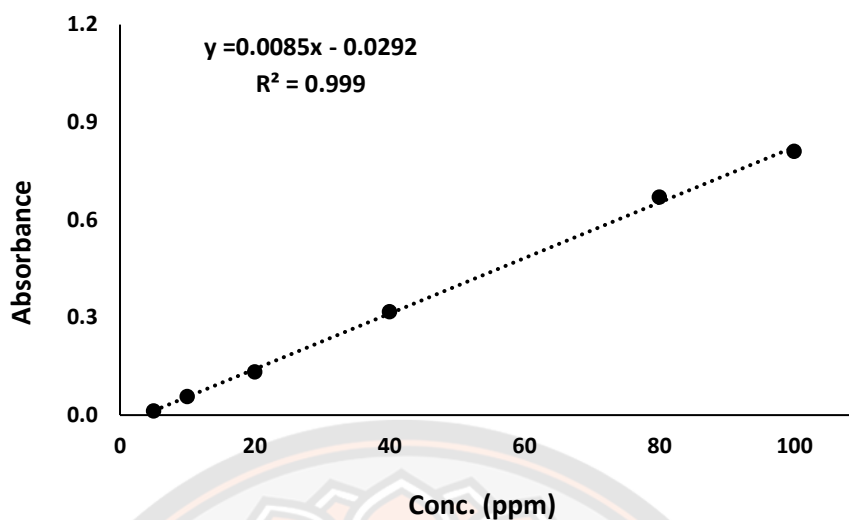
ปิเปตสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 300 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ร้อยละ 10 (v/v) ปริมาตร 1.5 mL เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 หลังจากนั้นเติมสารละลาย Sodium carbonate ปริมาตร 1.2 mL เขย่าให้เข้ากัน ตั้งเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยใช้ gallic acid ที่ความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ($R^2=0.9997$) เป็นสารมาตรฐาน และนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบสารสกัดตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด โดยรายงานผลในหน่วยของ mg gallic acid equivalents/100g DW



ภาพ 44 กราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกในการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

4.4 การวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ (Jia et al., 1998)

ปีเปตสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 250 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำละลาย Sodium nitrite ร้อยละ 5 ปริมาตร 75 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งไว้ในที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำละลาย Aluminium chloride ปริมาตร 150 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งไว้ในที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเติมน้ำละลาย Sodium hydroxide ปริมาตร 500 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยใช้ Catechin ที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 40, 80 และ 100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ($R^2=0.999$) เป็นสารมาตรฐาน และนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบสารสกัดตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อคำนวณหาปริมาณฟลาโวนอยด์ โดยรายงานผลในหน่วยของ mg catechin equivalents/100g DW



ภาพ 45 กราฟมาตรฐานของคาเทชินในการวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

4.5 การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินด้วยวิธี pH differential

นำสารสกัดตัวอย่างมาเจือจางด้วย สารละลาย KCl buffer pH 1.0 และสารละลาย Sodium acetate pH 4.5 สกัดส่วนตามตารางด้านล่าง

Dilution factor	ปริมาณตัวอย่าง (mL)	ปริมาณบัฟเฟอร์ ทั้ง 1.0 และ 4.5 (mL)
3	1	2
6	0.5	2.5
9	0.6	5.34
12	0.5	5.5
15	0.4	5.6

โดยเลือกสกัดส่วนตามความเหมาะสมของตัวอย่างนั้น ๆ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่มีดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ และรายงานผลในหน่วยของ mg cyanidin-3-glucoside /100g DW จากการคำนวณดังนี้

$$\text{Anthocyanin (mg/L)} = (A \times \text{MW} \times \text{DF} \times 1000) / \epsilon \times l$$

โดย $A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH 1.0}} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH 4.5}}$
 $= (\text{ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสูงสุดของสารตัวอย่างที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.0} - \text{ค่าการดูดกลืนที่ความยาว 700 nm ของสารตัวอย่างที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.0}) - (\text{ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสูงสุดของสารตัวอย่างที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.5} - \text{ค่าการดูดกลืนที่ความยาว 520 nm ของสารตัวอย่างที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.5})$

MW = ค่ามวลโมเลกุล ปกติ ใช้ 449.2 g/mol for cyanidin-3-glucoside (cyd-3-glu)

DF = Dilution factor (คิดโดย; ปริมาตรรวม/ปริมาตรตัวอย่าง)

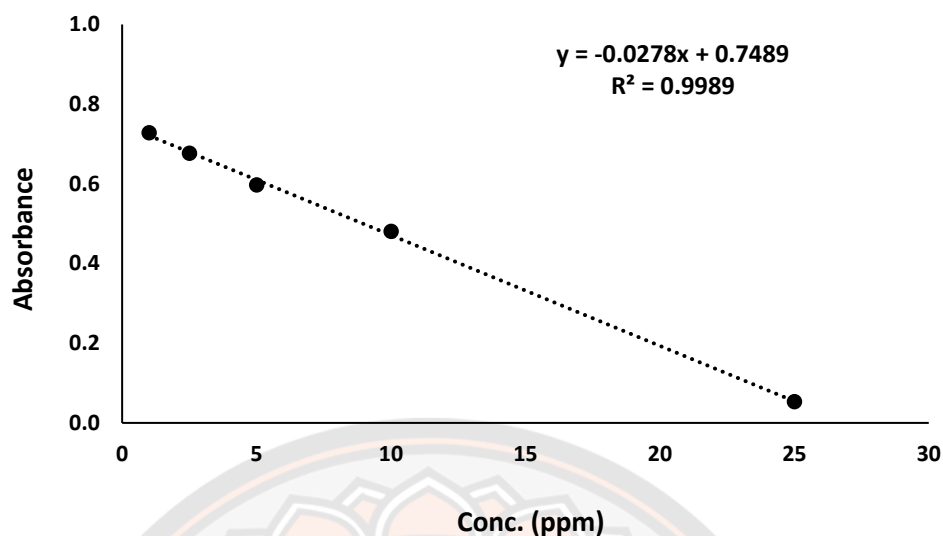
ϵ = โมลาร์แอบซอบติวิตี (Molar absorptivity) ค่านี้จะขึ้นกับชนิดของแอนโทไซยานิน และตัวทำละลาย โดยทั่วไปมักใช้ค่าของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (Cyanidin-3-glucoside) ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.0 ซึ่งเท่ากับ $26,900 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

l = ขนาดความกว้างของคิวเวต (เซนติเมตร) ที่ใช้วัดค่าดูดกลืนแสง

4.6 การวัดฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ

ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH[•] assay (Shao et al., 2014)

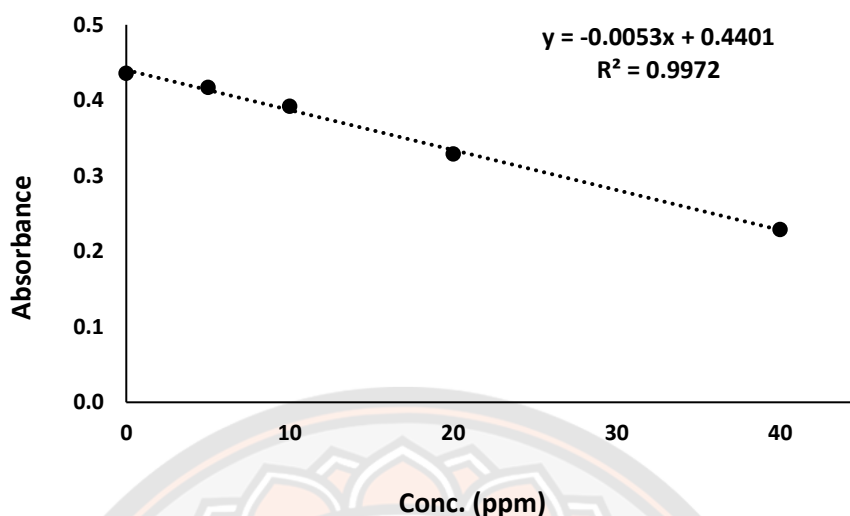
ปีเปตสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เดิมสารละลาย DPPH[•] เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยใช้ Trolox ที่ความเข้มข้น 0, 2.5, 5, 10 และ 25 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ($R^2=0.9989$) เป็นสารมาตรฐาน และนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบสารสกัดตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระโดยรายงานผลในหน่วยของ mg Trolox equivalents/100g DW



ภาพ 46 กราฟมาตรฐานของโพลลอกซ์ในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH'

ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS^{•+} assay (Roberta et al., 1999)

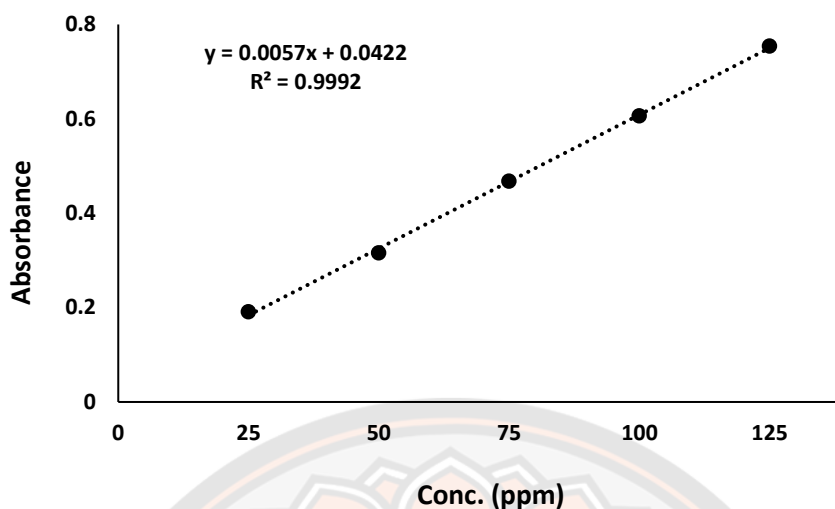
ปีเปตสารสกัดตัวอย่างปริมาณ 100 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำละลาย ABTS^{•+} เข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ (สารละลาย ABTS^{•+} มีค่าการดูดกลืนแสง 0.70 ± 0.02 nm) ปริมาตร 1.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยใช้ Trolox ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 20 และ 40 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ($R^2=0.9972$) เป็นสารมาตรฐาน และนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบสารสกัดตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระโดยรายงานผลในหน่วยของ mg Trolox equivalents/100g DW



ภาพ 47 กราฟมาตรฐานของโทรลอกซ์ในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS^{•+}

ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก FRAP assay (Thitipramote et al., 2016)

ปิเปตสารละลายตัวอย่างปริมาตร 50 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย FRAP (300 mM acetate buffer (pH 3.6):20 mM Ferric chloride solution:10 mM TPTZ ในอัตราส่วน 10:1:1) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยใช้ Trolox ที่ความเข้มข้น 25, 50, 75, 100 และ 125 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ($R^2=0.9992$) เป็นสารมาตรฐาน และนำไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบสารสกัดตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ โดยรายงานผลในหน่วยของ mg Trolox equivalents/100g DW



ภาพ 48 กราฟมาตรฐานของโพลีลอสซีในการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ

1. ดัชนีการละลายน้ำ (WSI) และดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)

ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index; WAI and Water Solubility Index: WSI) ตามวิธีของ Anderson et al. (1969) ซึ่งตัวอย่างแป้ง 2.5 กรัม ใส่ตัวอย่างแป้งในหลอดปั่นหมุนเหวี่ยง 50 มิลลิลิตร ที่ทราบน้ำหนัก เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และเขย่าทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 5,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้งสนิทและมีน้ำหนักคงที่ นำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก และชั่งน้ำหนักตะกอนแป้งในหลอดเหวี่ยง

การคำนวณ

$$\text{ดัชนีการละลายน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างส่วนที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{ดัชนีการดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมตะกอน} - \text{น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

2. กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and solubility)

โดยชั่งตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม ใส่ตัวอย่างแป้งในหลอดปั่นหมุนเหวี่ยง 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตร นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ความเร็วรอบ 5,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเทส่วนใสด้านบนใสในภาชนะ (Moisture can) ที่ทราบน้ำหนัก นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้งสนิทและมีน้ำหนักคงที่ นำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก ส่วนที่ตกตะกอนนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาคำนวณอัตราการพองตัวและการละลาย

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละกำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งที่พองตัว}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} \times (100 - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น})}$$

3. คุณสมบัติด้านความหนืด

โดยใช้เครื่อง RVA (Model 4500, Perten Instruments Australia Pty Ltd. s., Australia) ตามวิธีการของ AACC International Method 61-02.01 (2000) โดยเตรียมตัวอย่าง 3 กรัม ใส่ใน Aluminum RVA sample canister เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร และทำการวิเคราะห์ดังนี้

เวลา	ประเภท	อุณหภูมิ
0:00:00	อุณหภูมิ	50 องศาเซลเซียส
0:00:00	ความเร็วรอบ	960 รอบต่อนาที
0:00:10	ความเร็วรอบ	160 รอบต่อนาที
0:01:00	อุณหภูมิ	50 องศาเซลเซียส
0:04:48	อุณหภูมิ	95 องศาเซลเซียส
0:07:18	อุณหภูมิ	95 องศาเซลเซียส
0:11:06	อุณหภูมิ	50 องศาเซลเซียส
0:12:30	สิ้นสุดการวิเคราะห์	-

บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด (Pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Break down) ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าการคืนตัว (Setback viscosity)

การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

1. จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ตามวิธีของ American Public Health Association. (2012)

เตรียมตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ในถุง Stomacher เติมเปปโตนร้อยละ 1 ปริมาตร 45 มิลลิลิตร นำไปตีผสมให้เข้ากันนาน 1 นาที สารละลายตัวอย่างที่ได้จะมีความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} และ 10^{-8} โดยปิเปตตัวอย่างที่ความเจือจาง 10^{-1} จำนวน 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดไมโครทิวป์ที่มีเปปโตนร้อยละ 1 ปริมาตร 0.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เชื้อกระจายทั่วกัน จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10^{-2} และทำเช่นเดียวกันในการเตรียมตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นอื่น ๆ จากนั้นทำการทดสอบโดยปิเปตตัวอย่างความเข้มข้นละ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อที่ปลอดเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (เทใส่จานเพาะเชื้อที่ปลอดเชื้อ และวางให้แห้งตัวที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน) ความเข้มข้นละ 2 จาน โดยทำการ Spread plate ใน Laminar Flow กลับจานเพาะเชื้อให้อาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ทางด้านบน นำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ตรวจนับจุลินทรีย์ในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนประมาณ 25-250 โคโลนี บันทึกและรายงานผลการทดลองเป็นจำนวนโคโลนีต่อกรัมตัวอย่าง (CFU/g)

2. จำนวนยีสต์และรา ตามวิธีของ Bacteriological Analytical Manual Online, 2001. Chapter 18, Yeasts, Molds and Mycotoxins. USFDA, 4 pp.

เตรียมตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ในถุง Stomacher เติมเปปโตนร้อยละ 1 ปริมาตร 45 มิลลิลิตร นำไปตีผสมให้เข้ากันนาน 1 นาที สารละลายตัวอย่างที่ได้จะมีความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} โดยปิเปตตัวอย่างที่ความเจือจาง 10^{-1} จำนวน 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดไมโครทิวป์ที่มีเปปโตนร้อยละ 1 ปริมาตร 0.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เชื้อกระจายทั่วกัน จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10^{-2} และทำเช่นเดียวกันในการเตรียมตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นอื่น ๆ ทำการทดสอบโดยปิเปตสารละลายตัวอย่างในแต่ละระดับความเจือจางลงบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ Rose bengal agar (เทใส่จานเพาะเชื้อที่ปลอดเชื้อ และวางให้แห้งตัวที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน) จานละ 0.1 มิลลิลิตร จำนวน 2 จาน จากนั้น Spread plate ใน Laminar Flow นำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยที่จานเพาะเชื้อต้องซ้อนกันไม่เกิน 3 จาน และไม่กลับด้านจานเพาะเชื้อ บ่มนาน 5 วัน ถ้าไม่มีโคโลนีขึ้น ให้บ่มต่ออีก 48 ชั่วโมง จึงตรวจนับจุลินทรีย์ นับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญบนจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนประมาณ 10-150 โคโลนี บันทึกและรายงานผลการทดลองเป็นจำนวนโคโลนีต่อกรัมตัวอย่าง (CFU/g)

3. จำนวนการอยู่รอดของสปอร์ *B. coagulans* ตัดแปลงวิธีจาก Kim et al. (2021)

เตรียมตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ในถุง Atomacher เติมเปปโตนร้อยละ 1 ปริมาตร 45 มิลลิลิตร แล้วนำไปตีผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที สารละลายตัวอย่างที่ได้จะมีความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} และ 10^{-8} โดยปิเปตตัวอย่างที่ความเจือจาง 10^{-1} จำนวน 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดไมโครทิวบ์ที่มีเปปโตนร้อยละ 1 ปริมาตร 0.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เชื้อกระจายทั่วกัน จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10^{-2} และทำเช่นเดียวกันในการเตรียมตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นอื่น ๆ จากนั้นทำการทดสอบโดยปิเปตตัวอย่างความเข้มข้นละ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อที่ปลอดเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ De Man Rogosa and Sharpe agar (MRS agar) (เทใส่จานเพาะเชื้อที่ปลอดเชื้อ และวางให้แห้งตัวที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน) ความเข้มข้นละ 2 จาน โดยทำการ Spread plate ใน Laminar Flow กลับจานเพาะเชื้อให้อาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ทางด้านบน นำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง ตรวจนับจุลินทรีย์ในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนประมาณ 25-250 โคโลนี บันทึกและรายงานผลการทดลองเป็นจำนวนโคโลนีต่อกรัมตัวอย่าง (CFU/g)

ภาคผนวก ข ภาพแสดงตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพ 49 ข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทและข้าวหักพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

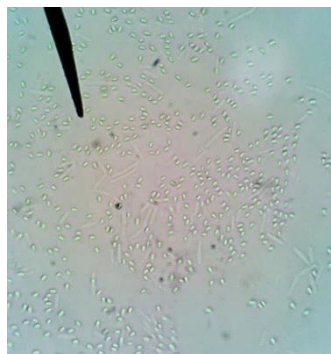
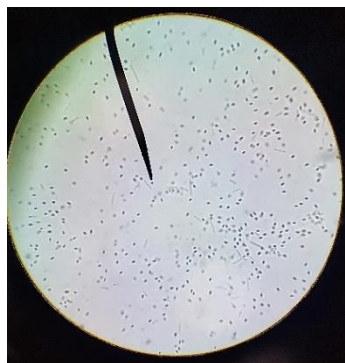


ภาพ 50 แป้งหมักข้าวพันธุ์ชัยนาทและแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์

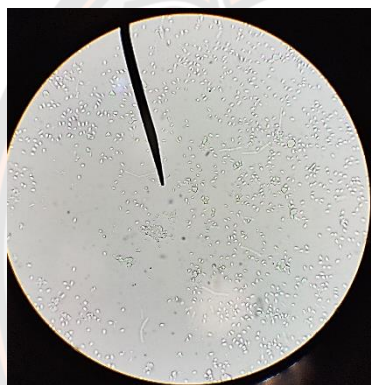


ร้อยละ 0 ร้อยละ 10 ร้อยละ 20 ร้อยละ 30

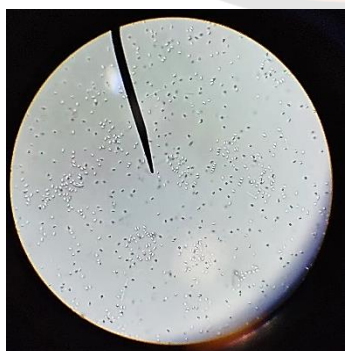
ภาพ 51 เส้นขนมจีนแป้งหมักที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งหมักข้าวพันธุ์มะลิสีสุรินทร์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



ภาพ 52 สปอร์ *B. coagulans* เลี้ยงบนอาหาร MRS agar เป็นเวลา 7 วัน ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า



ภาพ 53 สปอร์ *B. coagulans* เลี้ยงบนอาหาร MRS agar เป็นเวลา 14 วัน ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า



ภาพ 54 สปอร์ *B. coagulans* เลี้ยงบนอาหาร MRS agar เป็นเวลา 21 วัน ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า

