

คุณสมบัติของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก เพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตอาหารอิมัลชัน

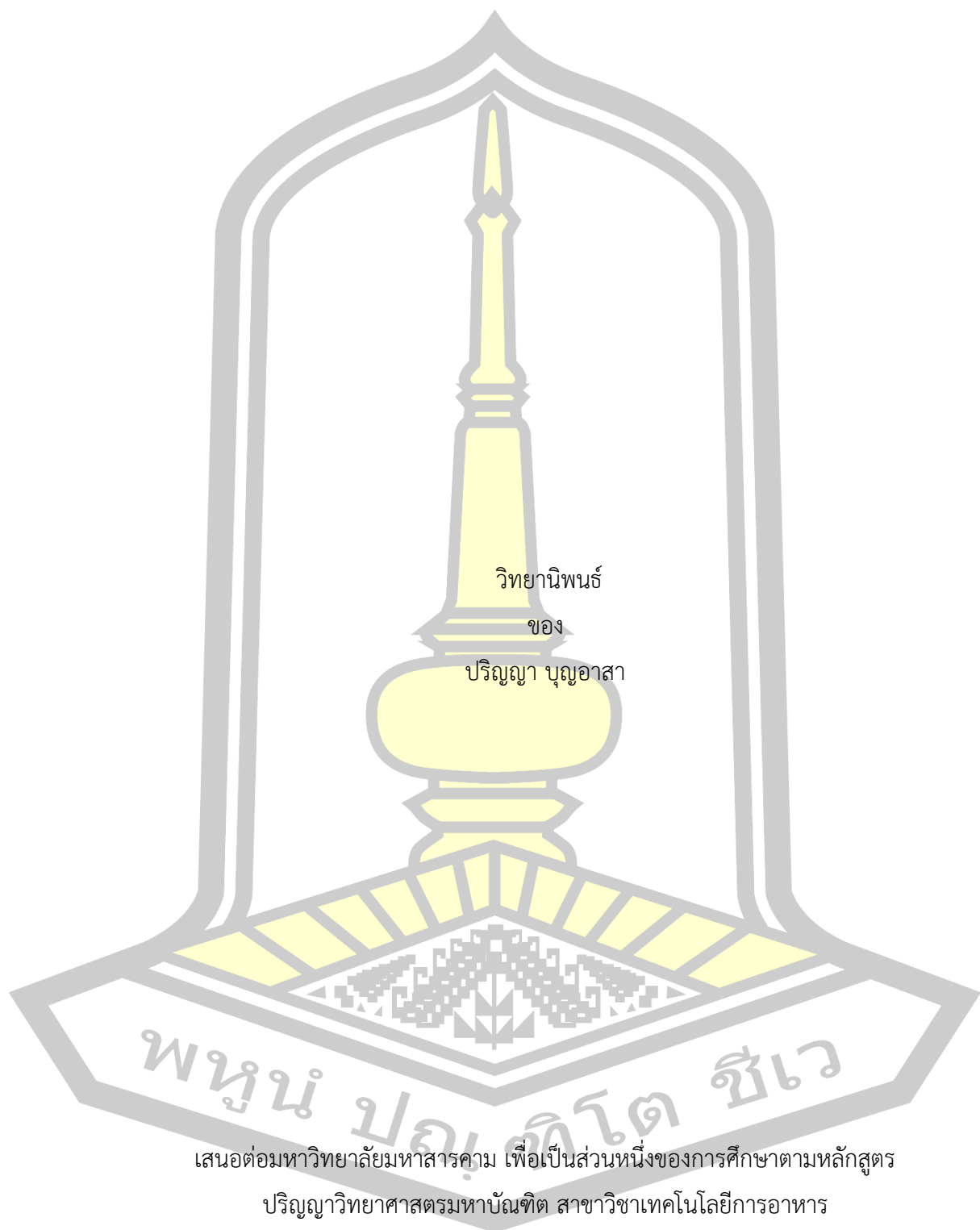
วิทยานิพนธ์
ของ
ปริญญญา บุญอาสา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร

ธันวาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คุณสมบัติของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก เพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตอาหารอิมัลชัน

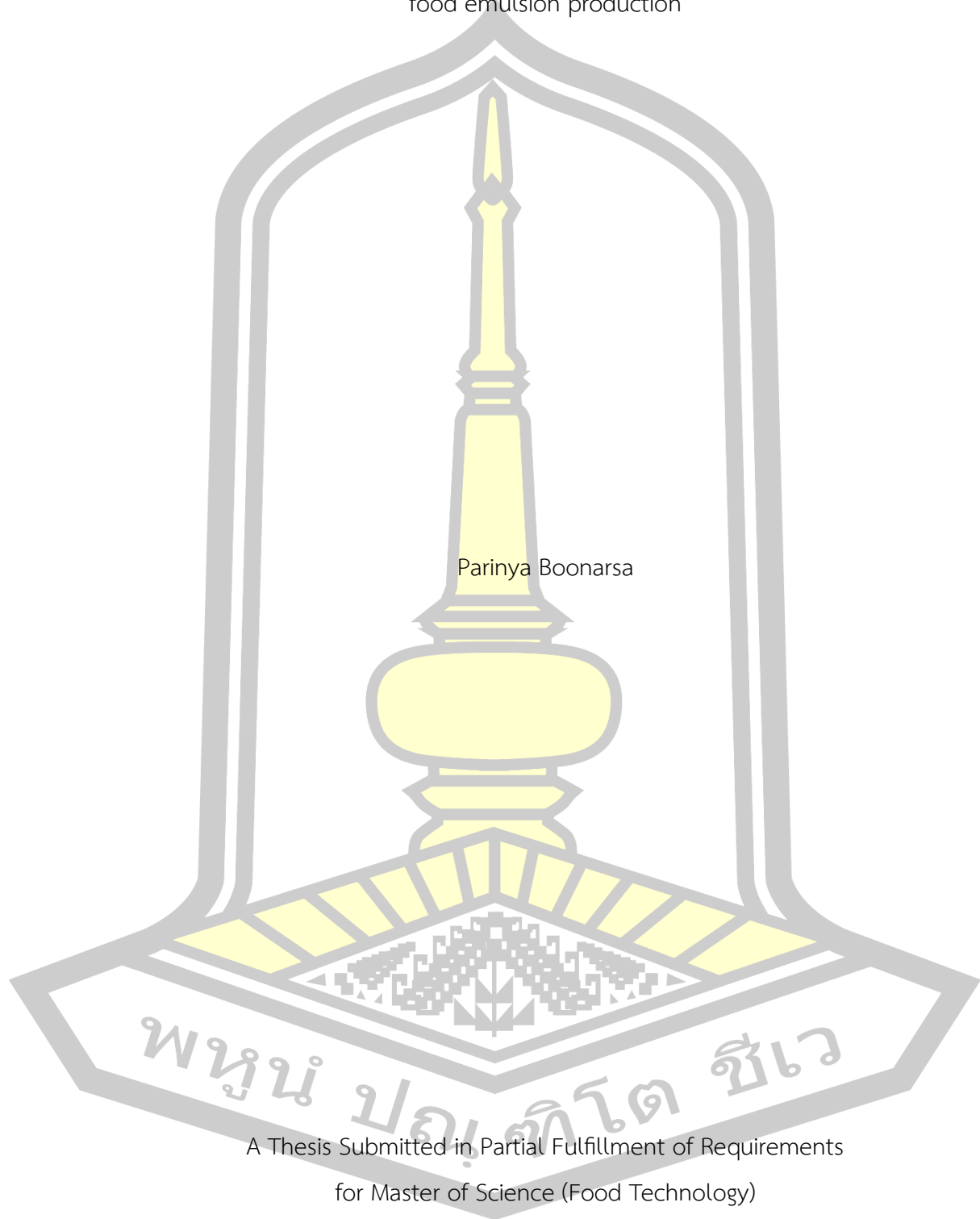


ธันวาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Characterization of proteins and lipids from alternative proteins for application in
food emulsion production

Parinya Boonarsa



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Food Technology)

December 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปริญญา บุญอาสา
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. นาถธิดา วีระปรียากร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. ศิริธร ศิริอมรพรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อ. ดร. อภิษฎา บุญญศิริชัด)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุดาทิพย์ อินทร์ชื่น)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ศรีนวล จันทไทย)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(ผศ. ดร. สุมลวรรณ ชุ่มเชื้อ)

คณบดีคณะเทคโนโลยี

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	คุณสมบัติของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก เพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตอาหารอิมัลชัน		
ผู้วิจัย	ปริญญา บุญอาสา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. ศิริธร ศิริอมรพรรณ อาจารย์ ดร. อภิษฎา บุญญศิริเขต		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	เทคโนโลยีการอาหาร
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพทางเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก โดยทำการศึกษาโปรตีนทางเลือก 3 ชนิด ได้แก่ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ผ่า เพื่อหาวัตถุดิบที่เหมาะสมมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชัน จากผลการศึกษาพบว่า ดักแด้ไหมมีปริมาณไขมันสูงสุด ขณะที่จิ้งหรีดบ้านมีโปรตีนสูงสุด และไข่ผ่ามีใยอาหารและคาร์โบไฮเดรตสูงสุด ดักแด้ไหมมีกรดอะมิโนที่สูง (61.81 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) รองลงมาคือจิ้งหรีดบ้าน และไข่ผ่า ตามลำดับ ดักแด้ไหมมีกรดไขมันในสัดส่วนที่เหมาะสม (SFA:MUFA:PUFA; 1:1:1) รวมถึงมีสมบัติด้านความสามารถในการอุม้ไขมัน (15.83 กรัม/กรัม) และสมบัติของอิมัลชันที่สูง (ร้อยละ 26.25) และมีความคงตัวของอิมัลชันสูงที่สุด (ร้อยละ 92.71) ดักแด้ไหมจึงเหมาะสมที่นำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก โดยนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหมด้วยเทคนิคการแช่แข็งทั้งหมด 4 สูตร คือ สูตรอ้างอิง (โปรตีนล้วนเหลือง) และสูตรที่เติมดักแด้ไหมร้อยละ 5 10 และ 15 ตามลำดับ (SP 5% 10% และ 15%) จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณดักแด้ไหมส่งผลให้ค่าความหนืดและแสดงพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมชั้นเหลวเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียนประเภทซูโดพลาสติก (pseudoplastic fluid) โดยสูตร SP 15% แสดงค่าความหนืดสูงสุด และมีลักษณะคล้ายเจลที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าสูตรอ้างอิง การเพิ่มปริมาณดักแด้ไหมทำให้ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ลดลง ในขณะที่เพิ่มค่าสีแดงและสีเหลือง นอกจากนี้ การเพิ่มดักแด้ไหมสามารถเพิ่มความแน่นเนื้อ ค่าความแข็ง และโครงสร้างเส้นใยภายในที่แน่นขึ้น การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าการเติมดักแด้ไหมเพิ่มปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ และจากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคชี้ให้เห็นว่าสูตร SP 5% ได้รับคะแนนการยอมรับมากที่สุด และเมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงตลอดอายุการเก็บที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 28 วัน พบว่า ระยะเวลาในการเก็บรักษาส่งผลให้ค่าสี ค่า pH และความสามารถในการอุม้ น้ำลดลง ในขณะที่ค่าความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น รวมถึงเมื่อมาทดสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

ยีสต์ และเรา พบว่า ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลา 14 วัน และไม่พบการปนเปื้อนของยีสต์ และเรา งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโปรตีนทางเลือกที่สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร อิมัลชันที่มีคุณภาพ ทั้งยังสะท้อนโอกาสในการขยายผลเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีน ทางเลือกที่ตอบโจทย์ตลาดในอนาคต ทั้งในด้านโภชนาการ ความปลอดภัย และการยอมรับของผู้บริโภค

คำสำคัญ : โปรตีนทางเลือก, คุณสมบัติเชิงหน้าที่, กรดอะมิโน, เนื้อเทียม, คุณสมบัติเชิงรีโอโลยี, อายุ การเก็บรักษา



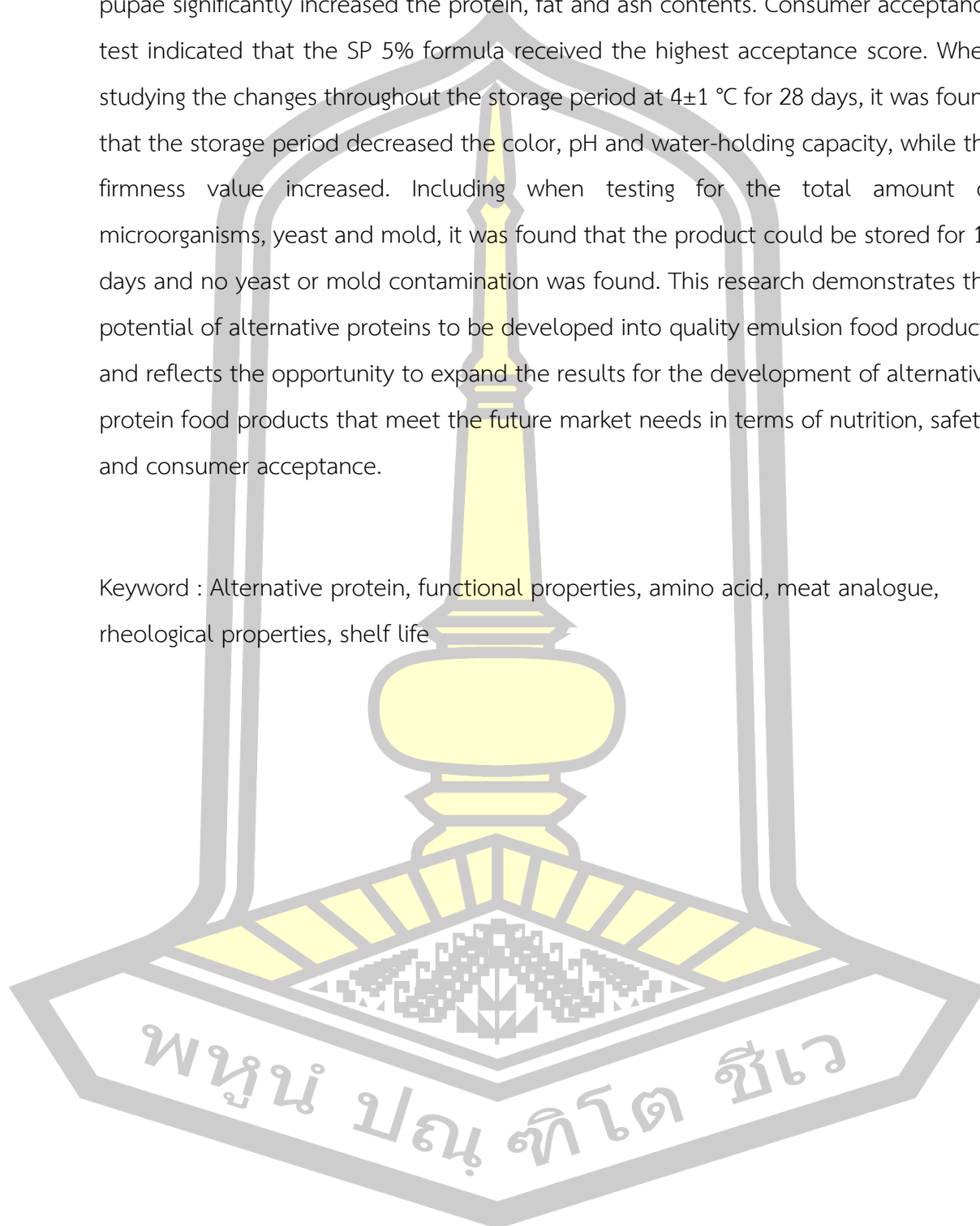
TITLE	Characterization of proteins and lipids from alternative proteins for application in food emulsion production		
AUTHOR	Parinya Boonarsa		
ADVISORS	Professor Sirithon Siriamornpun , Ph.D. Apichaya Bunyatratthata , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Food Technology
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2024

ABSTRACT

This research aimed to study the chemical quality and functional properties of proteins and fats from alternative proteins. Three types of alternative proteins were studied: silkworm pupae, house crickets, and watermeal to find the most suitable raw materials to develop emulsion food products. The results showed that silkworm pupae had the highest fat content, while house crickets had the highest protein content and watermeal had the highest dietary fiber and carbohydrate content. Silkworm pupae had the highest amino acid content (61.81 g/100 g dry weight), followed by house crickets and watermeal, respectively. Silkworm pupae had the most suitable fatty acid ratio (SFA:MUFA:PUFA; 1:1:1), as well as high oil holding capacity (15.83 g/g) and emulsifying properties (26.25%) and the highest emulsion stability (92.71%). Therefore, silkworm pupae were suitable for developing emulsion products from alternative proteins. It was developed into four formulas of meat analogue products from silkworm pupae by freezing technique, namely, reference formula (soy protein) and formulas added with 5, 10 and 15% of silkworm pupae, respectively (SP 5%, 10% and 15%). The study found that increasing the amount of silk pupae resulted in the viscosity and flow behavior of the slurry mixture as a pseudoplastic fluid, with the SP 15% formula showing the highest viscosity and having a gel-like texture with more elasticity than the reference formula. Increasing the amount of silkworm pupae decreased the lightness of the product, while increasing the redness and yellowness. In addition, adding silkworm pupae could increase the firmness, hardness and tighter

internal fiber-like structure. Chemical composition analysis found that adding silkworm pupae significantly increased the protein, fat and ash contents. Consumer acceptance test indicated that the SP 5% formula received the highest acceptance score. When studying the changes throughout the storage period at 4 ± 1 °C for 28 days, it was found that the storage period decreased the color, pH and water-holding capacity, while the firmness value increased. Including when testing for the total amount of microorganisms, yeast and mold, it was found that the product could be stored for 14 days and no yeast or mold contamination was found. This research demonstrates the potential of alternative proteins to be developed into quality emulsion food products and reflects the opportunity to expand the results for the development of alternative protein food products that meet the future market needs in terms of nutrition, safety, and consumer acceptance.

Keyword : Alternative protein, functional properties, amino acid, meat analogue, rheological properties, shelf life



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดีได้รับความช่วยเหลือ และการให้คำปรึกษาจาก คณะอาจารย์ที่ปรึกษา คือ ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ และอาจารย์ ดร.อภิษฎา บัญญัติรัชต ที่แนะนำในทุกขั้นตอนที่ทำการศึกษา การวางแผนการศึกษาตลอดทั้งหลักสูตร การออกแบบการศึกษา กระบวนการศึกษาเพื่อให้ได้คำตอบถูกต้อง ตลอดจนการเขียนรายงานทางวิชาการ การตรวจสอบ แก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การ สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหาร และโภชนศาสตร์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการและ งานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นาถธิดา วีระปรียากร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดาทิพย์ อินทร์ชื่น และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีนวล จันทไทย คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่ง ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพันธ์ จำเริญพัฒน์ คณะแพทย์แผนไทยและแพทย์ทางเลือก มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่ให้คำแนะนำ เกี่ยวกับการศึกษาการวิเคราะห์กรดอะมิโนและเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. พรพิชญ ธรรมปัติย์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำ เกี่ยวกับการศึกษาการวิเคราะห์กรดไขมัน จนสำเร็จลุล่วง

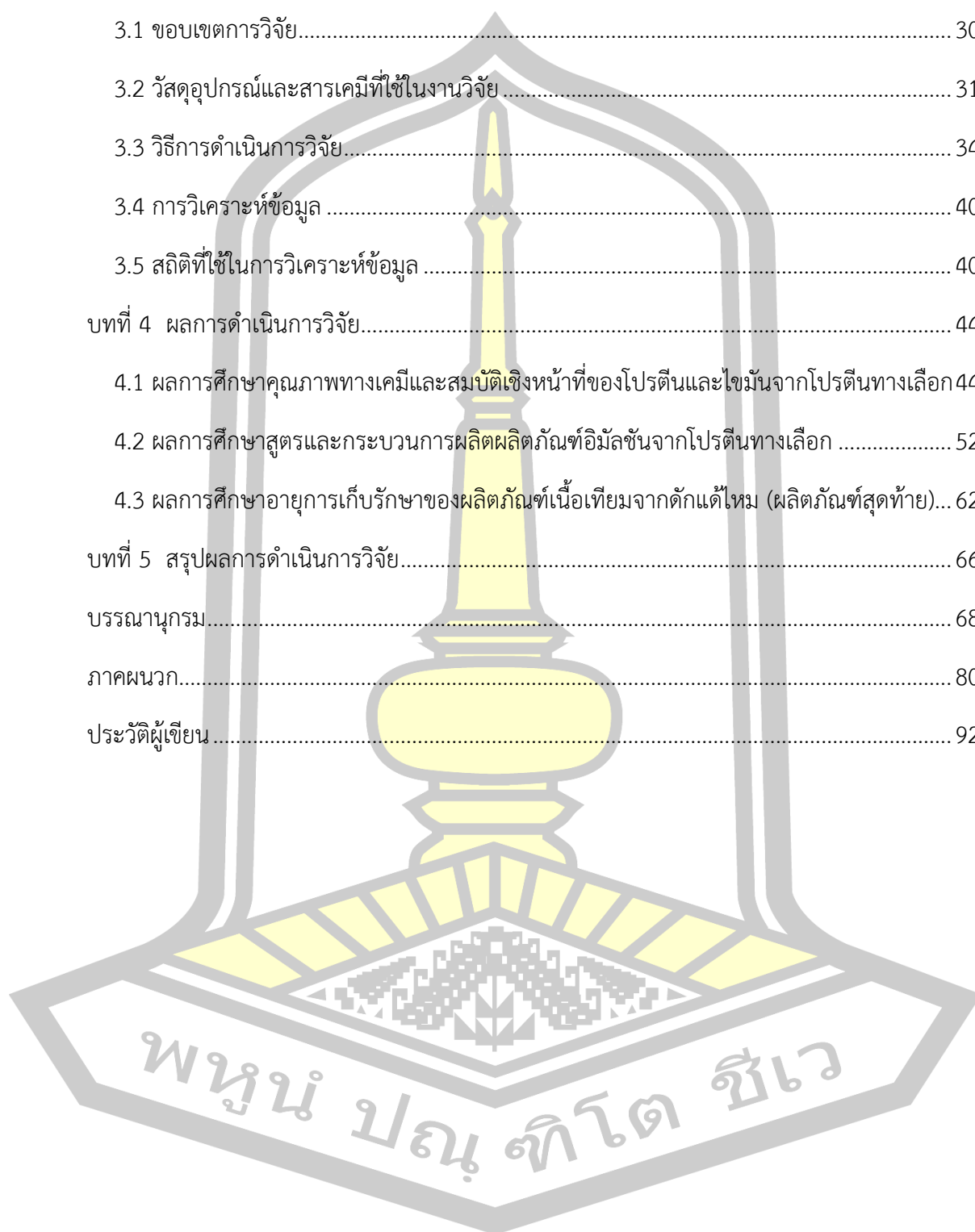
ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชน ศาสตร์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อำนวยความสะดวกเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี และขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อำนวยความสะดวก ในการใช้เครื่องมือ ตลอดจนให้คำแนะนำในการวิเคราะห์และการทำงานของเครื่องมือ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบุพการี ที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจและกำลังทรัพย์ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุกท่านที่คอยแนะนำและช่วยเหลือ จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีทุก ประการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	2
1.4 ความสำคัญของการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 บริบทนเอกสารข้อมูล.....	6
2.1 ดักแด้ไหม (Silkworm pupae).....	6
2.2 จิ้งหรีด (Crickets).....	11
2.3 ไข่ผ้า (Watermeal).....	15
2.4 อิมัลชัน (Emulsion).....	18
2.5 โปรตีน (Protein).....	20
2.6 ลิพิดและกรดไขมัน (Lipid and fatty acid).....	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 ขอบเขตการวิจัย.....	30
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	31
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	40
3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	40
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย.....	44
4.1 ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก.....	44
4.2 ผลการศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก	52
4.3 ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่ (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย)... ..	62
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการวิจัย.....	66
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียน	92

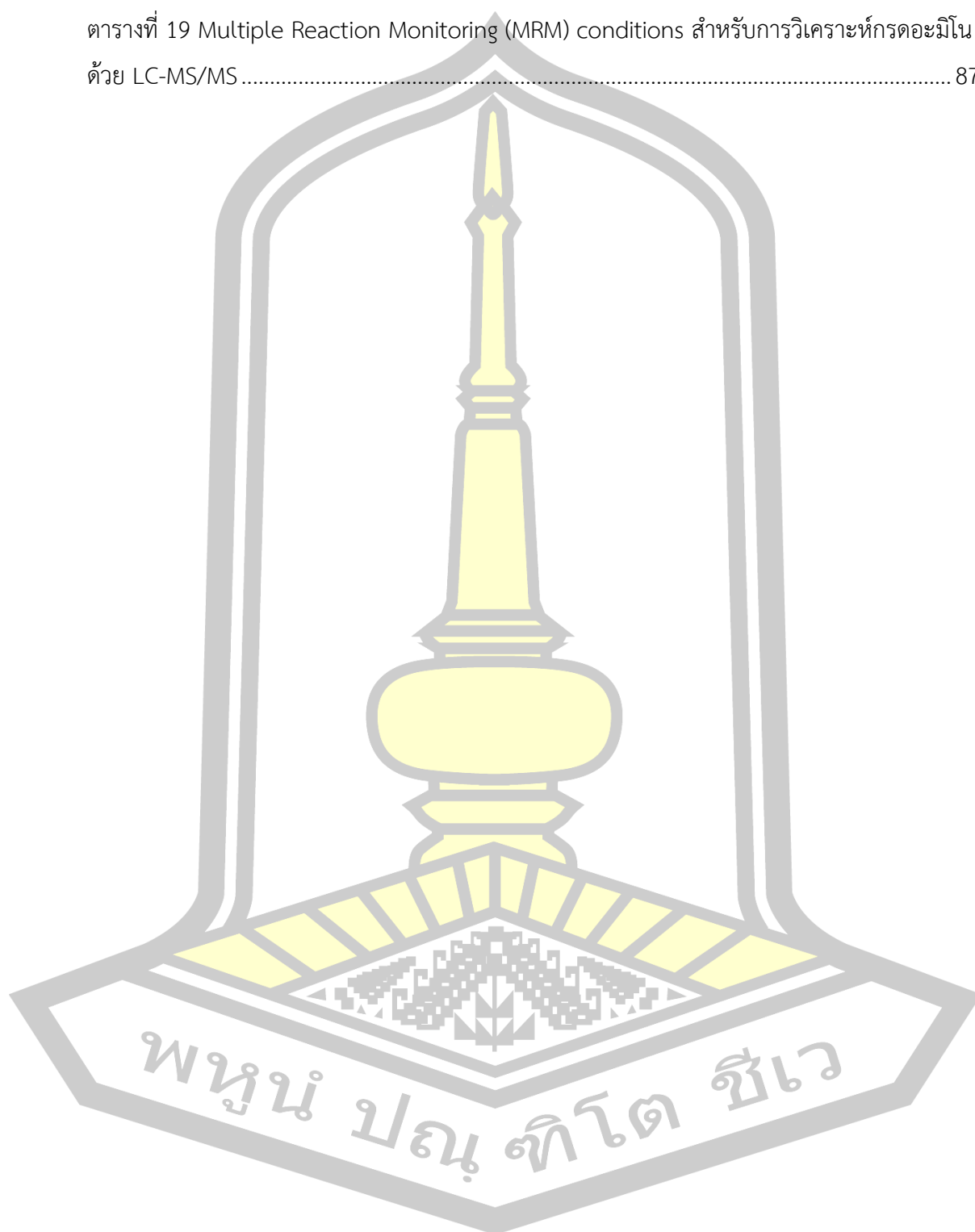


สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของกรดอะมิโนในโปรตีนจากดักแด้ไหมสายพันธุ์ต่าง ๆ.....	8
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันจากดักแด้ไหมสายพันธุ์ต่าง ๆ.....	10
ตารางที่ 3 องค์ประกอบของแร่ธาตุในดักแด้ไหมสายพันธุ์ต่าง ๆ.....	11
ตารางที่ 4 คุณค่าทางโภชนาการในจิ้งหรีดกับแมลงและเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ๆ.....	15
ตารางที่ 5 คุณค่าทางโภชนาการของไข่ผ้า.....	17
ตารางที่ 6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของโปรตีนทางเลือกและการแปรรูปผลิตภัณฑ์ อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก.....	26
ตารางที่ 7 สูตรในการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก.....	37
ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนทางเลือก.....	45
ตารางที่ 9 ปริมาณกรดอะมิโนของโปรตีนจากเลือกเทียบกับเวย์โปรตีน และปริมาณมาตรฐาน ที่แนะนำสำหรับผู้ใหญ่จาก WHO/FAO/UNU.....	46
ตารางที่ 10 องค์ประกอบของกรดไขมันจากโปรตีนทางเลือก.....	49
ตารางที่ 11 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก.....	51
ตารางที่ 12 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหม.....	57
ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหม.....	59
ตารางที่ 14 ปริมาณกรดอะมิโนของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหม เทียบกับกรดอะมิโนที่แนะนำ สำหรับผู้ใหญ่จาก WHO/FAO/UNU.....	61
ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหม.....	62
ตารางที่ 16 ผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหม (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) ตลอดอายุการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 4±1 องศาเซลเซียส.....	64
ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจาก ดักแด้ไหม (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) ตลอดอายุการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 4±1 องศาเซลเซียส.....	65

ตารางที่ 18 รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส..... 82

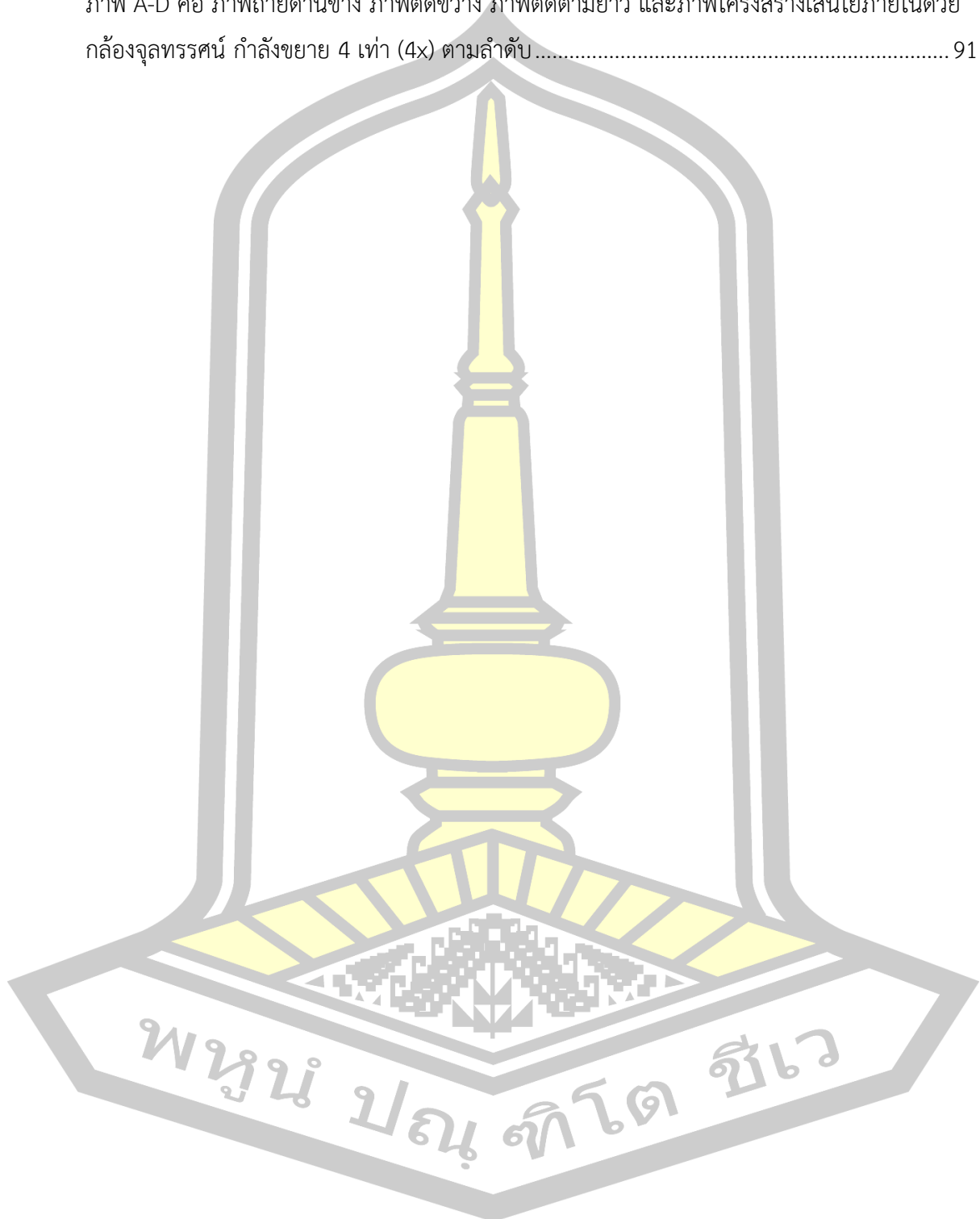
ตารางที่ 19 Multiple Reaction Monitoring (MRM) conditions สำหรับการวิเคราะห์กรดอะมิโน
ด้วย LC-MS/MS 87



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 วงจรชีวิตของหนอนไหม	7
ภาพที่ 2 จิ้งหรีดทองคำ	12
ภาพที่ 3 จิ้งหรีดทองแดง	13
ภาพที่ 4 จิ้งโกร่ง	14
ภาพที่ 5 จิ้งหรีดพันธุ์ทองแดงลาย	14
ภาพที่ 6 ไผ่ผ่า (wolffia)	16
ภาพที่ 7 ความเป็นข้าวของโมเลกุลของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในอาหาร	18
ภาพที่ 8 ระบบอิมัลชัน	19
ภาพที่ 9 การศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันของโปรตีนทางเลือก. 41	
ภาพที่ 10 การศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก.....	42
ภาพที่ 11 การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) . 43	
ภาพที่ 12 ความสามารถในการละลายของโปรตีนทางเลือกที่ pH ต่างๆ	50
ภาพที่ 13 ลักษณะปรากฏของผสมของเหลวกับของแข็งก่อนการแช่แข็ง (A), ลักษณะความหนืดที่ปรากฏ (B) มอดูลัสสะสม (G') และมอดูลัสสูญเสีย (G'') (C) และแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta = G''/G'$) (D) ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดก	54
ภาพที่ 14 ลักษณะปรากฏและโครงสร้างเส้นใยภายในของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดก โดยภาพ A-D คือ ภาพถ่ายด้านข้าง ภาพตัดขวาง ภาพตัดตามยาว และภาพโครงสร้างเส้นใยภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 4 เท่า (4x) ตามลำดับ	58
ภาพที่ 15 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกด้วยหัววัดแบบโบบิน (HDP/BSK) และหัววัดทรงกระบอก (P/6)	82
ภาพที่ 16 ผงโปรตีนทางเลือกจากผักดก จิ้งหรีดบ้าน และไผ่ผ่า	90
ภาพที่ 17 ส่วนผสมของเหลวกับของแข็ง หรือ Slurry ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดก	90

ภาพที่ 18 ลักษณะปรากฏและโครงสร้างเส้นใยภายในของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่ โดย
ภาพ A-D คือ ภาพถ่ายด้านข้าง ภาพตัดขวาง ภาพตัดตามยาว และภาพโครงสร้างเส้นใยภายในด้วย
กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 4 เท่า (4x) ตามลำดับ 91



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสนใจในสุขภาพและการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้น ทำให้ตลาดอาหารเพื่อสุขภาพมีการแข่งขันที่ค่อนข้างสูงและมีการพัฒนาตลอดเวลา โดยเฉพาะอาหารประเภทโปรตีนทางเลือก (Alternative protein) โดยโปรตีนทางเลือกมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปี 2563 มีปริมาณบริโภคมากถึง 587 ล้านตันโปรตีน และคาดว่าในปี 2568 จะมีอัตราเติบโตเป็นร้อยละ 3 และในปี 2565 มูลค่าทางการตลาดโปรตีนทางเลือกที่มาจากนวัตกรรมอาหารใหม่ของไทยอยู่ที่ 4,100 ล้านบาท หรือขยายตัวจากเดิมร้อยละ 5.1 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2563 (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย, 2565) โดยแหล่งของโปรตีนทางเลือก อาทิ โปรตีนจากพืช แมลง ถั่ว เชื้อราที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และโปรตีนจากการเพาะเลี้ยงในห้องทดลอง เป็นต้น ซึ่งโปรตีนทางเลือกเป็นอาหารที่ช่วยสร้างความยั่งยืนให้โลกมากขึ้น สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศได้ (สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมแห่งชาติ, 2564) และโปรตีนดังกล่าวมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลาย อาทิ ความสามารถในการละลายของโปรตีน ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน สมบัติของโฟม และสมบัติของอิมัลชัน ซึ่งสมบัติเหล่านี้สามารถนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด โดยเฉพาะสมบัติของอิมัลชันที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารประเภทอิมัลชันซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารอย่างมาก

อิมัลชันในอาหาร เป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบหนึ่งที่ประกอบด้วยของเหลวอย่างน้อย 2 ชนิด เป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสูงสำหรับการเพิ่มสมบัติในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้ในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ดีต่อสุขภาพ ซึ่งอาหารที่มีสมบัติเป็นอิมัลชันเป็นส่วนประกอบ เช่น นม น้ำสลัด มายองเนส และไอศกรีม เป็นต้น แต่ปัญหาที่พบคือการเกิดการแยกกระหว่างน้ำกับน้ำมันในระหว่างการเก็บรักษา การเติมอิมัลซิไฟเออร์ที่มีส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือชอบไขมันหรือส่วนประกอบที่มีกรดไขมันผสม สามารถลดแรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลของน้ำกับไขมันได้ ในอุตสาหกรรมอาหารการเติมอิมัลซิไฟเออร์สามารถช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาและสามารถยืดอายุของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ ซึ่งอิมัลซิไฟเออร์ในธรรมชาติ เช่น โปรตีนในนม โปรตีนจากถั่วเหลือง เลซิทีนในไข่แดง และพอลิแซ็กคาไรด์ (คันสนีย์ อุดมระติ, 2561) และโปรตีนทางเลือกก็เป็นแหล่งของอิมัลซิไฟเออร์จากธรรมชาติที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหารประเภทอิมัลชันได้เป็นอย่างดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาคุณภาพทางเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก เพื่อศึกษาสูตรและ

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกที่มีคุณภาพทางกายภาพ เคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัสจากผู้บริโภค รวมถึงเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก และเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณภาพทางเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณภาพทางกายภาพ เคมี และการยอมรับของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก
- 1.2.4 เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 คุณภาพทางเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันของวัตถุดิบที่แตกต่างกันมีปริมาณที่แตกต่างกัน
- 1.3.2 ได้ผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกที่มีคุณภาพทางกายภาพ เคมี การยอมรับทางประสาทสัมผัสจากผู้บริโภค และสามารถเก็บรักษาได้นาน

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

- 1.4.1 ทำให้ทราบแหล่งของโปรตีนทางเลือกที่มีคุณค่าทางโภชนาการและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก
- 1.4.2 ทำให้ทราบสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก มีคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสจากผู้บริโภค และได้ผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกที่มีอายุการเก็บรักษาได้นาน
- 1.4.3 เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกในเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 การศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันของโปรตีนทางเลือก ได้แก่ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ม้วน

1. คุณภาพทางเคมี

- ตัวแปรต้น คือ โปรตีนทางเลือก 3 ชนิด ได้แก่ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ม้วน
- ตัวแปรตาม ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน ไยอาหาร คาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน และกรดไขมัน

- ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระ (ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 และปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6)

2. สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมัน

- ตัวแปรต้น คือ โปรตีนทางเลือก 3 ชนิด ได้แก่ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ม้วน
- ตัวแปรตาม ได้แก่ ความสามารถในการละลายของโปรตีน ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน สมบัติของโฟม และสมบัติของอิมัลชัน
- ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระ (ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 และปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6)

การทดลองที่ 2 การศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก

- ตัวแปรต้น คือ ปริมาณโปรตีนทางเลือก และส่วนผสมอื่น ๆ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน
 - ตัวแปรตาม คือ คุณภาพทางกายภาพ เคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ได้แก่ สมบัติเชิงรีโอโลยี ค่าสี ความสามารถในการอุ้มน้ำ ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด ลักษณะเนื้อสัมผัส โครงสร้างเส้นใยภายใน องค์ประกอบทางเคมี และการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส
 - ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ระยะเวลาในการผสม อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษา
- การทดลองที่ 3 การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย)

- ตัวแปรต้น ได้แก่ ผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก
- ตัวแปรตาม คือ คุณภาพทางกายภาพ เคมี และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ ค่าสี pH ความสามารถในการอุ้มน้ำ ลักษณะเนื้อสัมผัส ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา
- ตัวแปรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการเก็บรักษา

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 โปรตีนทางเลือก คือ โปรตีนที่ไม่ได้มาจากเนื้อปศุสัตว์ โดยผลิตจากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น พืช สาหร่าย ถั่ว แมลง เชื้อราที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และโปรตีนจากการเพาะเลี้ยงในห้องทดลอง เป็นต้น ซึ่งเรามักพบเห็นการกินโปรตีนจากพืชได้ง่าย ๆ ในเทศกาลกินเจ หรือพบได้ในหมวดอาหารสำหรับผู้กินมังสวิรัต ซึ่งโปรตีนทางเลือกเป็นอาหารที่ช่วยสร้างความยั่งยืนให้โลกมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื้อจากพืช (Plant-Based Meat) มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมกระบวนการผลิตมาใช้ เช่น กระบวนการหมักที่เกิดจากการนำยีสต์และโปรตีนที่สังเคราะห์ได้จากรากของพืชตระกูลถั่ว เพื่อทำให้เกิดฮีม (Heme) ที่มีลักษณะคล้ายกล้ามเนื้อของสัตว์ หรือกระบวนการหมักจากถั่วเหลือง ยีสต์และสารสกัดจากเมล็ดดอกทานตะวัน เพื่อผลิตเนื้อที่มีความใกล้เคียงอาหารทะเล เป็นต้น โปรตีนทางเลือกถูกให้ความสำคัญขึ้นเพราะเราเริ่มตระหนักว่าประชากรโลกเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว และเร็วกว่าความเร็วในการผลิตอาหาร ทำให้โปรตีนจากเนื้อสัตว์อาจผลิตได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการ นอกจากนี้การเลี้ยงปศุสัตว์ยังก่อให้เกิดก๊าซมีเทนซึ่งทำลายชั้นบรรยากาศ อีกทั้งยังช่วยลดพื้นที่ในการเลี้ยงสัตว์ ซึ่งมีการคำนวณไว้ว่า 1 คนรับประทานเนื้อสัตว์ใช้พื้นที่ 4 ไร่ แต่ถ้า 1 คนรับประทานผักในปริมาณเท่ากัน ใช้พื้นที่ 1 ไร่ ซึ่งก็แน่นอนว่าจะส่งผลให้มีพื้นที่เพียงพอในการผลิตอาหารให้กับประชากร แหล่งโปรตีนอื่น ๆ จึงเป็นทางเลือกที่จะมาทดแทนเนื้อปศุสัตว์ (สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมแห่งชาติ, 2564)

1.6.2 ดักแด้ไหม ชื่อวิทยาศาสตร์ *Bombyx mori* ดักแด้ไหมเป็นผลพลอยได้หลักอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมไหม และส่วนใหญ่ใช้เป็นอาหารสัตว์และปุ๋ยซึ่งนิยมในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ญี่ปุ่น เกาหลี และอินเดีย ดักแด้ไหมยังใช้เป็นอาหารแมลงโดยเฉพาะในประเทศจีนซึ่งกินดักแด้ไหมมานานกว่า 2,000 ปี ดักแด้ไหมคือแหล่งที่มาของอาหารของหนอนไหมและระดับของการเลี้ยง ตัวอย่างเช่น พวกหนอนไหมซึ่งกินใบหม่อนเป็นหนอนไหมที่เคยเลี้ยงและเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในฟาร์ม อุดมไปด้วยโปรตีน น้ำมัน โคโคซาน วิตามิน เอมีน โพลีฟีนอล และสารอาหารอื่น ๆ ดักแด้ไหมเป็นแหล่งที่มาที่สำคัญของโปรตีนและลิพิดคุณภาพสูง โปรตีนดักแด้ไหมประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด และอุดมไปด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อสุขภาพของมนุษย์ นอกจากนี้ตัวดักแด้ไหมมีการดัดไขมันที่อิมมิตัวจำนวนมากโดยเฉพาะกรดไขมันโอเมก้า 3 (Zhou et al., 2022)

1.6.3 จิ้งหรีด เป็นแมลงที่มีลำตัวขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ขาคู่หลังส่วนต้นมีขนาดใหญ่ และแข็งแรง ใช้สำหรับกระโดด ขาคู่หน้ามีขนาดเล็กกว่าขาคู่หลังมากใช้สำหรับเดินและเขี่ยอาหาร มีหนวดยาว 2 เส้น ขนาดเท่าเส้นผมคนเรา ความยาวหนวดประมาณ 3-5 เซนติเมตร และมากกว่า

ลำตัว หนวดมีหน้าที่รับความรู้สึกและรับกลืนอาหาร มีปากเป็นแบบกัดกิน ปีกขวาทับปีกซ้าย ปีกคู่หน้าปกคลุมด้วยฟิล์มบาง ๆ จึงหืดมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Acheta Testacea* Walker วงศ์ Orthoptera เป็นแมลงที่มีลำตัวขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ขาคู่หลังส่วนต้นขนาดใหญ่และแข็งแรง ใช้สำหรับกระโดด ขาคู่หน้ามีขนาดเล็กกว่าคู่หลังมากใช้สำหรับเดินและเขี่ยอาหาร มีหนวดยาว 2 เส้น ขนาดเท่าเส้นผมคนเรา ความยาวหนวดประมาณ 3-5 เซนติเมตร หนวดมีหน้าที่รับความรู้สึกและรับกลืนอาหาร มีปากเป็นแบบกัดกิน ปีกขวาทับปีกซ้าย ปีกคู่หน้าปกคลุมด้วยฟิล์มบาง ๆ

1.6.4 ไข่ฝ้า ชื่อสามัญ watermeal, wolffia ชื่อวิทยาศาสตร์ *Wolffia globosa* (Roxb.) Hartog & Plas มีแหล่งกำเนิดตามแหล่งน้ำธรรมชาติในทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือของประเทศไทย ไข่ฝ้าเป็นพืชดอกที่มีขนาดเล็กที่สุดในโลก มีรูปร่างกลม หรืออาจจะมีลักษณะคล้ายรูปไข่สีเขียว ไม่มีราก ลอยอยู่บนผิวน้ำ มีความยาวประมาณ 0.5-1.5 มิลลิเมตร ไข่ฝ้าเป็นพืชชั้นสูงเป็นพืชล้มลุกใบเลี้ยงเดี่ยว ไม่มีระบบท่อลำเลียง มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศโดยใช้เมล็ดซึ่งห่อหุ้มด้วยรังไข่ และสามารถสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศได้ด้วยการแตกหน่อ (วิลาสินี ดีปัญญา, 2555)

1.6.5 อิมัลชัน คือ ระบบหนึ่งที่ของเหลวเป็นทั้งอนุภาคคอลลอยด์และตัวกลาง กล่าวคือของเหลวชนิดหนึ่งกระจายอยู่ในของเหลวชนิดหนึ่ง ของเหลวที่กระจายตัวเป็นหยดเล็กเรียก droplet ซึ่งเป็นส่วนที่กระจายตัว (dispersed phase) แทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง (Continuous phase) ซึ่งอาหารที่มีสมบัติเป็นอิมัลชันเป็นส่วนประกอบ เช่น นม น้ำสลัด มายองเนส เนย และมาการีน อาหารเหล่านี้จะพบปัญหาคือ เกิดการแยกวัฏภาค (phase separation) ของน้ำมันและน้ำในระหว่างการเก็บรักษาไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันเพราะอิมัลชันเป็นระบบไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamically unstable system) เนื่องจากการผสมระหว่างน้ำและน้ำมันซึ่งเป็นของเหลวที่มีแรงดึงดูดต่างกันมาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมีค่าสูงจนโมเลกุลของน้ำมันไม่สามารถแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของน้ำได้ ของเหลวทั้งสองชนิดจึงไม่สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ การเติมอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) หรือคาร์บอกซิล (carboxyl) และส่วนที่ชอบไขมัน (lipophilic) เช่น stearic, palmitic, oleic, linoleic acid หรือกรดไขมันผสม อิมัลซิไฟเออร์ช่วยลดแรงดึงดูดระหว่างน้ำและน้ำมันเอื้อต่อการกระจายตัวของโมเลกุล

บทที่ 2

ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล

ปรีทัศน์เอกสารข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยแบ่งเป็นหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

- 2.1 ดักแด้ไหม (Silkworm pupae)
- 2.2 จิ้งหรีด (Cricket)
- 2.3 ไข่ฝ้า (Watermeal)
- 2.4 อิมัลชัน (Emulsion)
- 2.5 โปรตีน (Protein)
- 2.6 ลิพิดและไขมัน (Lipids and oil)
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดักแด้ไหม (Silkworm pupae)

ดักแด้ไหม ชื่อวิทยาศาสตร์ *Bombyx mori* ดักแด้ไหมเป็นผลพลอยได้หลักอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมไหม และส่วนใหญ่ใช้เป็นอาหารสัตว์และปุ๋ยซึ่งนิยมในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ญี่ปุ่น เกาหลี และอินเดีย ดักแด้ไหมยังใช้เป็นอาหารแมลงโดยเฉพาะในประเทศจีนซึ่งกินดักแด้ไหมมานานกว่า 2,000 ปี ดักแด้ไหมมีหลายชนิด ได้แก่ *Bombyx mori*, *Antheraea pernyi*, *Antheraea yamamai*, *Samia ricini*, *Antheraea mylitta* และ *Antheraea roylei* ดักแด้ไหมคือแหล่งที่มาของอาหารของหนอนไหมและระดับของการเลี้ยง ตัวอย่างเช่น พวกหนอนไหมซึ่งกินใบหม่อนเป็นหนอนไหมที่เคยเลี้ยงและเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในฟาร์ม อุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน ไคโตซาน วิตามิน เอมีน โพลีฟีนอล และสารอาหารอื่น ๆ ดักแด้ไหมเป็นแหล่งที่มาที่สำคัญของโปรตีนและลิพิดคุณภาพสูง โปรตีนดักแด้ไหมประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด และอุดมไปด้วยกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อสุขภาพของมนุษย์ นอกจากนี้ตัวดักแด้ไหมมีกรดไขมันที่อิ่มตัวจำนวนมากโดยเฉพาะกรดไขมันโอเมก้า 3 (Zhou et al., 2022)

2.1.1 ลักษณะทางกายภาพและวงจรชีวิต

ไหมเป็นผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่งมีขนาดกางปีกประมาณ 2 นิ้ว ตัวสีครีม ลำตัวอ้วน บินไม่ได้ระยะที่เป็นผีเสื้อจะไม่กินอาหาร มีอายุสั้นประมาณ 2-3 วัน สามารถวางไข่ได้ถึง 400-500 ฟอง หนอนไหมลำตัวเรียบไม่มีขน กินใบหม่อน (*Morus alba* และ *M. nigra*) ผีเสื้อไหมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) แบ่งออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ไข่ ตัวหนอน ดักแด้ และผีเสื้อ มีเพียงระยะตัวหนอนเท่านั้นที่กินอาหาร ซึ่งจะนำสารชนิดต่าง ๆ

จากใบหม่อนไปสร้างการเจริญเติบโต โดยผ่านการย่อยและดูดซึมเป็นปริมาณ 1 ใน 3 ของสารอาหาร ทั้งหมดโปรตีนส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนใยไหม เมื่อถึงวันแรกของวัยที่ 5 ทำให้ต่อมไหม (Silk gland) จะหนักเพียงร้อยละ 6 ของน้ำหนักตัวไหม เมื่อไหมสุกก่อนเข้าทำรัง ต่อมไหมจะหนักถึงร้อยละ 41 ซึ่งช่วงปลายวัยที่ 5 จะมีสารอาหารโดยเฉพาะโปรตีนเกือบทั้งหมด ถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่จะชักใย ทำรังหรือเส้นไหม วงจรชีวิตของตัวไหมเริ่มจากไข่ฟักเป็นตัวหนอนไหมในระยะที่เป็นหนอนจะมีการลอกคราบ 4 ครั้ง พอไหมสุกจะพันเส้นใยทอหุ้มตัวเองแล้วตัวหนอนจะเข้าดักแด้อยู่ภายในรังนั้น เมื่ออายุครบดักแด้ก็จะกลายเป็นผีเสื้อเจาะรังไหมออกมา เพื่อการผสมพันธุ์และวางไข่ต่อไป ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรชีวิตของหนอนไหม

ที่มา : Zhou et al. (2022)

2.1.2 คุณค่าทางโภชนาการของดักแด้ไหม

ดักแด้ไหมประกอบด้วยสารอาหารมากมาย อาทิ โปรตีน ไขมัน และน้ำตาล ตลอดจนแร่ธาตุ วิตามิน สารประกอบโพลีฟีนอล และสารอาหารอื่น ๆ

2.1.2.1 โปรตีนในดักแด้ไหม

ดักแด้ไหม มีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 55.6 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นสารที่พบมากที่สุด ในดักแด้ไหม ประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด โปรตีนจากดักแด้ไหมสามารถไฮโดรไลซ์เพื่อผลิตเปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้หลายชนิดซึ่งมีสมบัติเชิงหน้าที่ทางเภสัชวิทยาได้ ดักแด้ไหมประกอบไปด้วยกรดอะมิโนทั้ง 18 ชนิด และมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย 8 ชนิด ตามคำแนะนำของ WHO/FAO/UNU นอกจากนี้ยังมีกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นอีก

10 ชนิด (ตารางที่ 1) ที่ยังสนองความต้องการของมนุษย์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับไข่ไก่ พบว่า ดักแด้ไหมมีปริมาณของฟีนอลอะลานีนและโพรลีนที่สูงกว่า ดังนั้น ดักแด้ไหมจึงเป็นแหล่งของโปรตีนที่ คุณภาพสูงและเป็นแหล่งของสารอาหารที่สำคัญที่จำเป็นต่อมนุษย์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของกรดอะมิโนในโปรตีนจากดักแด้ไหมสายพันธุ์ต่าง ๆ

กรดอะมิโน	<i>Bombyx</i>	<i>Eri</i> Silkworm	Mulberry	<i>Antheraea</i>	ไข่ไก่
(กรัม/100 กรัม)	<i>mori</i>	Pupae	Silkworm Pupae	<i>pernyi</i>	
Aspartic acid	9.1	9.89	10.9	6.41	8.92
Threonine	3.9	4.75	5.4	4.64	4.47
Serine	3.7	5.25	4.7	4.64	6.72
Glutamic acid	9.5	12.9	14.9	12.74	12.13
Glycine	3.6	4.94	4.6	4.42	3.02
Alanine	3.9	6.05	5.5	6.26	5.03
Cysteine	1.4	0.53	1.4	1.5	1.90
Valine	4.7	5.36	5.6	6.63	5.42
Methionine	3.4	2.31	4.6	1.47	2.81
Isoleucine	3.4	4.42	5.7	7.95	4.88
Leucine	6.2	6.63	8.3	3.24	8.11
Tyrosine	5.6	6.4	5.4	2.06	3.81
Phenylalanine	4.6	5.24	5.1	8.10	4.82
Lysine	6.1	6.54	7.5	4.54	6.59
Histidine	2.7	2.67	2.5	2.94	2.09
Arginine	4.7	4.41	6.8	4.12	5.70
Proline	7.0	6.46	4.0	12.22	3.38
Tryptophan	1.5	NA	0.9	4.05	1.72

ที่มา : Zhou et al. (2022)

2.1.2.2 ไขมันในดักแด้ไหม

ดักแด้ไหมมีไขมันเป็นคุณค่าทางโภชนาการอันดับที่สองรองจากโปรตีน ในดักแด้ไหมทั้งหมด 4 สายพันธุ์ พบว่า ดักแด้ไหมอีรีมีปริมาณที่มันที่สูงที่สุดประมาณร้อยละ 26.2 (Longvah et al., 2011) ดังตารางที่ 2 ซึ่งดักแด้ไหมมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงถึงร้อยละ 77.71 นอกจากนี้ยังมีกรด eicosapentaenoic และกรด docosahexaenoic ซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดโอเมก้า-3 ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมสุขภาพของมนุษย์ (Venkatesh Kumar et al., 2020) น้ำมันถือเป็นสารอาหารที่สำคัญ ซึ่งดักแด้ไหมไม่เพียงแต่อุดมไปด้วยน้ำมันเท่านั้น แต่ยังมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวในระดับสูง โดยเฉพาะกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน ซึ่งมีส่วนช่วยในการป้องกันโรคหลอดเลือดหัวใจในการลดความเสี่ยงของการเสียชีวิตจากหัวใจกะทันหัน (Albert, 1998; Leaf & Kang, 1996) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการป้องกันภาวะหัวใจห้องล่างเต้นผิดปกติ (Leaf & Kang, 1996; Nair et al., 1997) นอกจากนี้ยังมีข้อบ่งชี้บางประการว่า PUFAs อาจมีผลดีต่อการทำงานของสมองต่าง ๆ เช่น โรคลมชัก (Vreugdenhil et al., 1996) โรคซึมเศร้า (Hibbeln, 1998) หรือโรคอารมณ์สองขั้วและพฤติกรรมอื่น ๆ (Stoll et al., 1999)

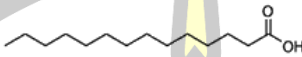
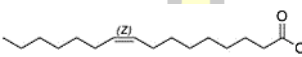
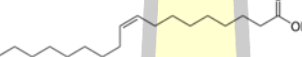
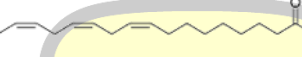
2.1.2.3 แร่ธาตุในดักแด้ไหม

แร่ธาตุมีบทบาทที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิต โดยดักแด้ไหมมีแร่ธาตุที่หลากหลายมากถึง 25 ชนิด ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้มีหน้าที่ทางสรีรวิทยาบางอย่างในสิ่งมีชีวิต ดังตารางที่ 3 ที่แสดงปริมาณแร่ธาตุ 8 ชนิดในดักแด้ไหม 3 ชนิด ระบุว่าดักแด้ไหมเป็นแหล่งของฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สูง ชนิดและปริมาณของแร่ธาตุในดักแด้ไหมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดักแด้ไหมและสภาพแวดล้อมที่ดักแด้ไหมเจริญเติบโต ที่น่าสนใจคืออัตราส่วนของโซเดียมต่อโพแทสเซียม (Na:K) ในดักแด้ไหมนั้นน้อยมากจึงสันนิษฐานได้ว่าการบริโภคดักแด้ไหมอาจลดโอกาสการเกิดโรคไม่ติดต่อได้ ได้แก่ โรคหลอดเลือดสมอง ความดันโลหิตสูง โรคหัวใจและหลอดเลือดเป็นต้น (Lim et al., 2012; Rodrigues et al., 2014)

2.1.2.4 องค์ประกอบอื่น ๆ ในดักแด้ไหม

ดักแด้ไหมอุดมไปด้วยวิตามินมากมาย มีวิตามินเอ สูงถึง 5 มิลลิกรัม/กรัม รวมถึงอุดมไปด้วย วิตามินบี1 บี2 บี3 บี5 บี7 บี9 บี12 วิตามินซี และวิตามินอี (Paul & Dey, 2014) รวมถึงดักแด้ไหมยังมีฟอสโฟลิพิดและโทโคฟีรอล 5 ชนิด ได้แก่ α -Tocopherol, β -tocopherol, γ -tocopherol, γ -tocotrienol และ δ -tocopherol (Wang, W., 2020) นอกจากนี้ดักแด้ไหมยังมีโพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์ เช่น contain (+)-catechin, (-)-epicatechin, rutin, quercetin, myricetin, trans-resveratrol, luteolin, naringenin และ kaempferol (Deori et al., 2014)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันจากดักแด้ไหมสายพันธุ์ต่าง ๆ

Fatty Acids (Percentage of Fatty Acids)	Chemical Structure	<i>Bombyx mori</i>	<i>Eri Silkworm Pupae</i>	<i>Mulberry Silkworm Pupae</i>	<i>Antheraea pernyi</i>
Myristic acid (C14:0)		0.1	ND	0.18	NA
Palmitic acid (C16:0)		24.2	26.98	23.18	17.25
Palmitoleic acid (C16:1)		1.7	1.82	1.07	1.14
Stearic acid (C18:0)		4.5	4.73	4.69	2.23
Oleic acid (C18:1)		26.0	15.89	28.32	29.15
Linoleic acid (C18:2)		7.3	5.4	3.88	7.14
Alpha- Linoleic acid (C18:3)		36.3	44.73	38.25	40.28
Saturated fatty acids	-	28.8	31.71	28.05	19.48
Monounsaturated fatty acids	-	27.7	17.71	29.39	30.29
Polyunsaturated fatty acids	-	43.6	50.22	42.13	47.42

ที่มา : Zhou et al. (2022)

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของแร่ธาตุในดักแด้ไหมสายพันธุ์ต่าง ๆ

แร่ธาตุ (มิลลิกรัม/100 กรัม)	<i>Bombyx mori</i>	<i>Eri</i> Silkworm Pupae	Mulberry Silkworm Pupae
Phosphorus	474	584	272
Iron	26	24	4
Calcium	158	74.2	63
Zinc	23	7.24	3.57
Copper	0.15	1.75	0.73
Magnesium	207	178	154
Manganese	0.71	2.54	NA
Chromium	1.69	NA	9.84

ที่มา : Zhou et al. (2022)

2.2 จิ้งหรีด (Crickets)

จิ้งหรีด เป็นแมลงที่มีลำตัวขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ขาคู่หลังส่วนต้นมีขนาดใหญ่ และแข็งแรง ใช้สำหรับกระโดด ขาคู่หน้ามีขนาดเล็กกว่าขาคู่หลังมากใช้สำหรับเดินและเขี่ยอาหาร มีหนวดยาว 2 เส้น ขนาดเท่าเส้นผมคนเรา ความยาวหนวดประมาณ 3-5 เซนติเมตร และมากกว่าลำตัว หนวดมีหน้าที่รับความรู้สึกและรับกลิ่นอาหาร มีปากเป็นแบบกัดกิน ปีกขวาทับปีกซ้าย ปีกคู่หน้าปกคลุมด้วยฟิล์มบาง ๆ

จิ้งหรีดมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Acheta Testacea* Walker วงศ์ Orthoptera เป็นแมลงที่มีลำตัวขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ขาคู่หลังส่วนต้นขนาดใหญ่และแข็งแรง ใช้สำหรับกระโดด ขาคู่หน้ามีขนาดเล็กกว่าขาคู่หลังมากใช้สำหรับเดินและเขี่ยอาหาร มีหนวดยาว 2 เส้น ขนาดเท่าเส้นผมคนเรา ความยาวหนวดประมาณ 3-5 เซนติเมตร หนวดมีหน้าที่รับความรู้สึกและรับกลิ่นอาหาร มีปากเป็นแบบกัดกิน ปีกขวาทับปีกซ้าย ปีกคู่หน้าปกคลุมด้วยฟิล์มบาง ๆ

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของจิ้งหรีด

2.2.1.1 รูปร่างลักษณะจิ้งหรีด

จิ้งหรีดเป็นแมลงที่มีลักษณะปากเป็นแบบปากกัด มีตารวม หนวดยาว ขาคู่หลังมีขนาดใหญ่และแข็งแรง กระโดดเก่ง เพศเมียปีกเรียบและมีอวัยวะวางไข่ยาวแหลมคล้ายเข็มนอกมาจากส่วนท้องเพศผู้มีปีกคู่หน้ายื่น สามารถทำเสียงได้

2.2.1.2 วงจรชีวิตของจิ้งหรีด

การเจริญเติบโตของจิ้งหรีด จิ้งหรีดมีการถอดรูปแบบไม่สมบูรณ์ ประกอบด้วย 3 ระยะ ได้แก่ ระยะไข่ ระยะตัวอ่อน และระยะตัวเต็มวัย (ปิยะวรรณ สุทธิประพันธ์, 2565)

1. ระยะไข่ จิ้งหรีดมีไข่สีเหลืองอ่อน ลักษณะเรียวยาวคล้ายเมล็ดข้าวสาร จิ้งหรีดเพศเมียมีไข่วางไข่ยาวคล้ายเข็มประมาณ 1.0-2.5 เซนติเมตร วางลงในวัสดุวางไข่ใช้เวลาในการฟักตัวประมาณ 7-11 วัน

2. ระยะตัวอ่อน ตัวอ่อนแรกฟักมีลักษณะคล้ายมด รูปร่างเหมือนจิ้งหรีดตัวเต็มวัยแต่ ไม่มีปีก มีการลอกคราบทั้งหมด 8 ครั้ง เมื่อลอกครั้งที่ 5 สามารถจำแนกเพศได้ มีไข่วางไข่ที่ยังไม่สมบูรณ์ยื่นออกมา เมื่อลอกคราบครั้งที่ 6 จะมีตุ่มปีกงอกออกมาเหมือนเสื้อกั๊ก ลอกคราบครั้งที่ 7 มีติ่งปีกยาวออกมาเรียกว่า “กิ้งใหญ่” และลอกคราบครั้งที่ 8 เข้าสู่ระยะตัวเต็มวัย ใช้เวลาประมาณ 35-55 วัน

3. ระยะตัวเต็มวัย สามารถแยกเพศได้ จิ้งหรีดมีอวัยวะสืบพันธุ์สมบูรณ์ มีปีกยาวเจริญดี เพศผู้มีปีกหน้ายื่น บริเวณโคนด้วยในของปีกคู่หน้ามีอวัยวะทำเสียงเมื่อปีกถูหรือสีกันจะทำให้เกิดเสียงขึ้น เพศเมียมีปีกคู่หน้าเรียบและมีไข่วางไข่ยาวแหลมคล้ายเข็มยื่นออกมาจากส่วนท้อง ระยะเต็มวัยประมาณ 30-40 วัน

2.2.1.2 ชนิดจิ้งหรีด

จิ้งหรีดที่พบในประเทศไทย ซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มี 4 ชนิด ดังนี้

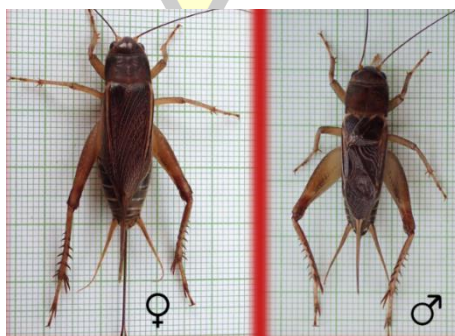
1. จิ้งหรีดทองดำ (Field cricket: จิ้งหรีดทุ่ง) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Gryllus bimaculatus* De Geer เป็นจิ้งหรีดขนาดกลาง บางพื้นที่เรียก จิโหล่น ประกอบด้วย ส่วนหัว ส่วนอก และส่วนท้อง ลำตัวและปีกมีสีดำ หรือน้ำตาลปนดำทั้งตัว มีหนวดยาว ตัวผู้ส่วนหัวและอกมีสีดำ ปีกคู่หน้ายื่น ปีกมีสีน้ำตาลออกเหลืองเล็กน้อย โดยเฉพาะโคนปีกมีสีเหลืองแกม ตัวเมียส่วนหัวและอกมีสีดำ ปีกคู่หน้าเรียบ ปีกมีสีดำสนิท โคนปีกมีแต้มสีเหลือง 2 จุด ปลายปีกคู่หลังทั้งตัวผู้และตัวเมียนั้นยาวกว่าลำตัว ปลายท้องมีแถบทางยาว 1 คู่ ขอบอาศัยตามกองไม้ กองใบไม้ ร่องดิน ออกหากินเวลากลางคืน และไม่ขุดรูอาศัย



ภาพที่ 2 จิ้งหรีดทองดำ

ที่มา : ฤกษ์ เรืองฤทธิ์ และคณะ (2566)

2. จิ้งหรีดทองแดง (Gold cricket : จิ้งหรีดทอง, House cricket : จิ้งหรีดบ้าน) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Gryllus testaceus* Walker บางพื้นที่เรียก จิ้งหรีดนิล จินาย จิ้งหรีดพม่า เป็นจิ้งหรีดขนาดกลาง ประกอบด้วยส่วนหัว ส่วนอก และส่วนท้อง โตเต็มวัยลำตัวกว้างประมาณ 0.5-0.6 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2.5-2.8 เซนติเมตร ลำตัวทุกส่วน มีสีน้ำตาลเข้ม บริเวณหัวเหนือขอบตามีแถบสีน้ำตาลเข้มรูปตัว U ตัวผู้มีสีลำตัวทุกส่วนเข้มกว่าตัวเมีย ด้านล่างท้องมีสีครีม เคลื่อนที่ได้ว่องไว ชอบอาศัยตามกองไม้ กองใบไม้ ร่องดิน ออกหากินในเวลากลางคืน และไม่ขุดรูอาศัย



ภาพที่ 3 จิ้งหรีดทองแดง

ที่มา : กฤษณะ เรืองฤทธิ์ และคณะ (2566)

3. จิ้งโกร่ง (Brown cricket) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Brachytrupes Portentosus* Lichtenstein จิ้งหรีดชนิดนี้บางพื้นที่เรียก จิโป่ม จิ้งกุ่ม จินาย เป็นจิ้งหรีดขนาดใหญ่ ประกอบด้วยส่วนหัว ส่วนอก และส่วนท้อง ลำตัวทุกส่วนมีสีน้ำตาล ออกปล้องแรกมีลักษณะคล้ายปลอกคอ แยกออกจากอกปล้องที่ 2 และ 3 อย่างชัดเจน ยกเว้นขาคู่หลังส่วนบนมีสีเหลืองและส่วนท้องมีสีครีม โตเต็มวัยลำตัวกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 3.5-4.0 เซนติเมตร มีหนวดยาว ขุดรูตามดินร่วนปนทราย ภายในรูมีความลึก 5-10 เซนติเมตร มีรูแยก 1 รู เพื่อหลบภัยบริเวณรอยแยกของรูเป็นโพรงใหญ่สำหรับเก็บอาหาร กลางวันจะปิดปากรูและอาศัยอยู่ภายใน กลางคืนออกหากินและส่งเสียงร้องดัง มีนิสัยดุร้าย มีการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้ช้า มีไข่น้อยและวางไข่ปีละ 1 ครั้ง ในช่วงต้นฤดูฝน

พูน ปณ จิต ชเว

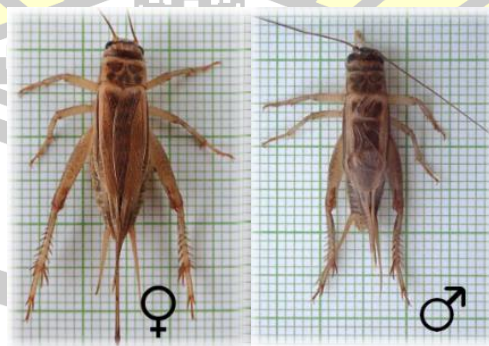


ภาพที่ 4 จิ้งโกร่ง

ที่มา : อนุรักษ์ สร้อยทองดี (2561)

จิ้งหรีดนั้นสามารถแบ่งออกเป็นได้หลายสายพันธุ์ด้วยกัน โดยเราจะสังเกตแต่ละสายพันธุ์ได้จากลักษณะตัวและลักษณะสีของตัวจิ้งหรีดแต่ที่นิยมนำมารับประทานมากก็คือ จิ้งหรีดสายพันธุ์ทองแดงลาย หรือจะเรียกจิ้งหรีดทองแดงก็ได้เช่นกัน ด้วยลักษณะตัวที่เล็กและมีสีน้ำตาลเข้ม และขนาดตัวที่ไม่เล็กไม่ใหญ่จนเกินไป ทำให้เป็นที่นิยมของผู้ที่ชอบรับประทานจิ้งหรีด อีกหนึ่งความนิยมในตัวจิ้งหรีดพันธุ์นี้ก็คือไข่ที่เต็มท้องของจิ้งหรีดพันธุ์นี้

4. จิ้งหรีดพันธุ์ทองแดงลาย (อังกฤษ: House cricket; ชื่อวิทยาศาสตร์: *Acheta domestica*) จิ้งหรีดทองแดงลาย หรือ จิ้งหรีดบ้าน หรือ แมงสะตัง ในภาษาอีสานเป็นแมลงชนิดหนึ่งจำพวกจิ้งหรีด (Gryllidae) เป็นจิ้งหรีดขนาดเล็ก มีลำตัวสีน้ำตาล ลักษณะคล้ายกับจิ้งหรีดทองแดง (*Gryllus testaceus*) แต่มีขนาดเล็กกว่า ตัวเมียมีปีกคู่หน้าสั้นครึ่งลำตัว ไม่ชอบบิน เคลื่อนไหว ไม่รวดเร็วเท่าจิ้งหรีดชนิดอื่น ๆ โดยทั่ว ๆ ไปลำตัวกว้างประมาณ 0.5 เซนติเมตร ยาว 2.05 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 0.53 กรัม หรือประมาณ 1,890-2,235 ตัว ต่อ 1 กิโลกรัม



ภาพที่ 5 จิ้งหรีดพันธุ์ทองแดงลาย

ที่มา : กฤษณะ เรืองฤทธิ์ และคณะ (2566)

2.2.2 คุณค่าทางโภชนาการของจังหวัด

จังหวัดจัดเป็นอาหารที่มีสารอาหารครบถ้วน ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน แร่ธาตุ โดยเฉพาะโปรตีน เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคุณค่าทางโภชนาการในจังหวัดกับแมลงและเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ๆ พบว่าจังหวัดมีปริมาณโปรตีนที่สูงกว่าเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณค่าทางโภชนาการในจังหวัดกับแมลงและเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ๆ

ตัวอย่าง	พลังงาน (กิโลแคลอรี)	โปรตีน (กรัม)	ไขมัน (กรัม)	คาร์โบไฮเดรต (กรัม)
จังหวัด (จังหวัดน้ำตาล)	188	17.5	1	2.4
จังหวัด (จังหวัดดำ)	133	18.6	6	1
ดักแด้ใหม่	152	14.7	8.3	4.7
ดักแด้น้ำพริก	157	27.6	4.7	1.2
ตัวอ่อนของต่อ	140	14.8	6.8	4.8
แมลงกินุน	98	18.1	1.8	2.2
แมลงป่อง	130	24.5	2.3	2.8
หนอนไม้ไผ่	231	9.2	20.4	2.5
เนื้อไก่	110	20.8	2.4	0
เนื้อวัวไม่มีมัน	150	20.0	7.2	0
เนื้อหมูไม่มีมัน	376	14.1	35.0	0
เนื้อหมูติดมัน	457	11.9	45.0	0

ที่มา : กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2530, 2547)

2.3 ไข่ฝ้า (Watermeal)

ไข่ฝ้า ชื่อสามัญ watermeal, wolffia, ชื่อวิทยาศาสตร์ *Wolffia globosa* มีแหล่งกำเนิดตามแหล่งน้ำธรรมชาติในทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือของประเทศไทย ไข่ฝ้าเป็นพืชดอกที่มีขนาดเล็กที่สุดในโลก มีรูปร่างกลม หรืออาจจะมียักษ์คล้ายรูปไข่สีเขียว ไม่มีราก ลอยอยู่บนผิวน้ำ มีความยาวประมาณ 0.5-1.5 มิลลิเมตร ไข่ฝ้าเป็นพืชชั้นสูง เป็นพืชล้มลุก ใบเลี้ยงเดี่ยว ไม่มีระบบท่อลำเลียง มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศโดยใช้เมสทีซึ่งห่อหุ้มด้วยรังไข่ และสามารถสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศได้ด้วยการแตกหน่อ (วิลาลีนี ดิปัญญา, 2555)

2.3.1 การจำแนกของไข่ฝำ

ขนาดและรูปร่างของไข่ฝำเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการจำแนกชนิดของไข่ฝำ ไข่ฝำพบมากทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปัจจุบันไข่ฝำที่พบในสกุล *Wolffia* มีทั้งหมด 16 ชนิด ดังนี้ *W. angusta*, *W. Warrhiza*, *W. borealis*, *W. brasiliensis*, *W. Columbiana*, *W. denticulate*, *W. gladiata*, *W. globoas*, *W. hyaline*, *W. lingulata*, *W. microsvopica*, *W. netropica*, *W. oblonga*, *W. reanda*, *W. roanda* และ *W. welwitschii* แต่ที่ปรากฏในประเทศไทยมี 2 ชนิดได้แก่ *Wolffia arrhiza* (L.) wimm และ *Wolffia globosa* (Roxb.) Hartog & Plas (วิลาสินี ดีปัญญา, 2555)



ภาพที่ 6 ไข่ฝำ (wolffia)

ที่มา : นานาสาระเกษตร (2555)

2.3.2 การใช้ประโยชน์ของไข่ฝำ

ไข่ฝำสามารถนำมาประกอบอาหารเพื่อใช้ในการดำรงชีพทั้งมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากไข่ฝำเป็นแหล่งอาหารของมนุษย์ เนื่องจากพืชบางชนิดในวงศ์นี้มักจะมีการสะสมแคลเซียมออกซาเลตสูงซึ่งอยู่ในรูปคริสตัล ทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมเพื่อนำไปใช้สร้างประโยชน์ได้ เป็นสาเหตุทำให้เกิดนิ่วในกระเพาะปัสสาวะ แต่จากการศึกษาวิจัยได้รับการยืนยันแล้วว่าในไข่ฝำนั้นไม่พบการสะสมแคลเซียมออกซาเลตจึงไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายเมื่อนำมารับประทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยนิยมรับประทานกันอย่างแพร่หลายมากทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ มีรสชาติเหมือนผักทั่วไปโดยเฉพาะไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจจะมีส่วนที่ยุ่งยากที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะการล้างทำความสะอาดเพราะเป็นพืชน้ำก่อนนำมาปรุงอาหาร สามารถปรุงอาหารได้ทั้งคาวและหวาน (ภาณุมาศ ทองคำ, ม.ป.ป.) ดังนี้

1. การนำมาปรุงเป็นอาหารคาว การนำไข่ฝำมาปรุงอาหารมีแค่ขั้นตอนก่อน นำมาประกอบอาหารเท่านั้นที่ยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากเป็นพืชขนาดเล็กขั้นตอนการทำความสะอาดเลยต้องใช้น้ำและเทคนิคการทำความสะอาดโดยเฉพาะแต่ทำให้ทำได้แค่ข้าวบางพร้อมทั้งยังเพิ่ม

รสชาติให้กับอาหารให้เป็นอย่างดี เช่นแกงอ่อม แกงปลา แกงไก่ แกงเนื้อหรือตำกินสดไข่ผำสดตำ คล้ายส้มตำหรือเป็นส่วนผสมของต้มยำ และเป็นส่วนประกอบในข้าวเกรียบกุ้งหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ไข่ผำแผ่นทอดกรอบ เพื่อเพิ่มมูลค่าของไข่ผำให้สูงขึ้น ทั้งนี้ชนิดและปริมาณส่วนผสมที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับแต่ละท้องถิ่น

2. ส่วนผสมของเครื่องจิ้ม ด้วยลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะคือเม็ดสีเขียวเล็ก ใส่โปรงแสง จึงใช้เป็นส่วนผสมของเครื่องจิ้มอาหารหลายชนิด

3. ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบบางชนิด เช่น เค้ก มัลเฟิน แชนวิส เป็นต้น

2.3.3 คุณค่าทางโภชนาการของไข่ผำ

ไข่ผำเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะสารอาหารประเภทโปรตีนที่มีมากกว่าโปรตีนจากเนื้อสัตว์และโปรตีนจากถั่วเหลือง ซึ่งปริมาณคุณค่าทางโภชนาการของไข่ผำแสดงดังตารางที่ 5 (วิลาสินี ดีปัญญา, 2555)

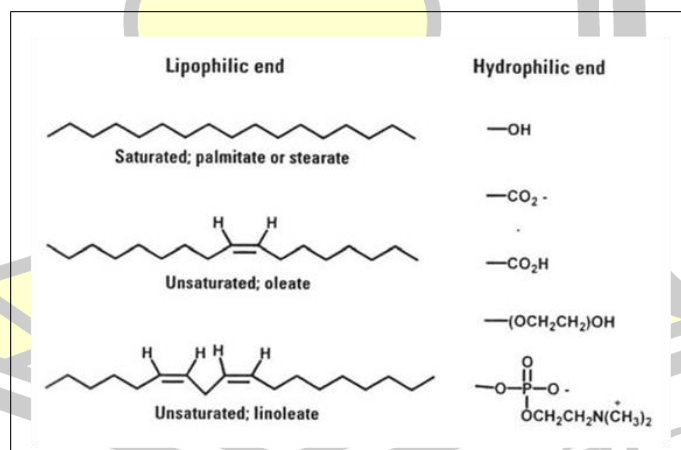
ตารางที่ 5 คุณค่าทางโภชนาการของไข่ผำ

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	8.00
โปรตีน (กรัม/100 กรัม)	6.80-45.0
ไขมัน (กรัม/100 กรัม)	1.80-9.2
ใยอาหาร (กรัม/100 กรัม)	5.70-16.20
แคลเซียม (มิลลิกรัม/100 กรัม)	59.00
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/100 กรัม)	25.00
เหล็ก (มิลลิกรัม/100 กรัม)	6.60
วิตามินเอ (IU/100 กรัม)	5,346.00
วิตามินบี (มิลลิกรัม/100 กรัม)	0.03

ที่มา : วิลาสินี ดีปัญญา (2555)

2.4 อิมัลชัน (Emulsion)

อิมัลชัน คือ ระบบหนึ่งที่ของเหลวเป็นทั้งอนุภาคคอลลอยด์และตัวกลาง กล่าวคือของเหลวชนิดหนึ่งกระจายอยู่ในของเหลวชนิดหนึ่ง ของเหลวที่กระจายตัวเป็นหยดเล็กเรียกว่า droplet ซึ่งเป็นส่วนที่กระจายตัว (dispersed phase) แทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง (continuous phase) ซึ่งอาหารที่มีสมบัติเป็นอิมัลชันเป็นส่วนประกอบ เช่น นม น้ำสลัด มายองเนส เนย และมาการีน อาหารเหล่านี้จะพบปัญหาคือ เกิดการแยกวัฏภาค (phase separation) ของน้ำมันและน้ำในระหว่างการเก็บรักษา ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันเพราะอิมัลชันเป็นระบบไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamically unstable system) เนื่องจากการผสมระหว่างน้ำและน้ำมันซึ่งเป็นของเหลวที่มีแรงดึงดูดต่างกันมาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมีค่าสูงจนโมเลกุลของน้ำมันไม่สามารถแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของน้ำได้ ของเหลวทั้งสองชนิดจึงไม่สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (ปาริฉัตร หงสประภาส, 2555) การเติมอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) หรือคาร์บอกซิล (carboxyl) และส่วนที่ชอบไขมัน (lipophilic) เช่น stearic, palmitic, oleic, linoleic acid หรือกรดไขมันผสมอิมัลซิไฟเออร์ช่วยลดแรงดึงดูดระหว่างน้ำและน้ำมัน เอื้อต่อการกระจายตัวของโมเลกุล น้ำมันให้แทรกระหว่างโมเลกุลของน้ำได้ โมเลกุลอิมัลซิไฟเออร์แสดงดังภาพที่ 7 ในระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion)



ภาพที่ 7 ความเป็นขั้วของโมเลกุลของอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ในอาหาร

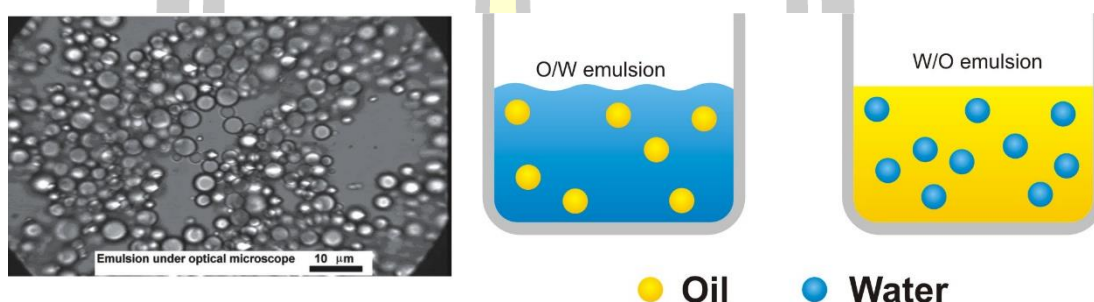
ที่มา : Hartel et al. (2018)

2.4.1 ประเภทของอิมัลชัน อิมัลชันแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

2.4.1.1 อิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water emulsion, O/W) มีน้ำมันเป็นวัฏภาคภายในและน้ำเป็นวัฏภาคภายนอก เช่น นมข้น ขมิ้นชัน หรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ

สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำมีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ที่สูงกว่าสามารถผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำ (water soluble dye)

2.4.1.2 อิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water-in-oil emulsion, W/O) มีน้ำเป็นวัฏภาคภายในและน้ำมันเป็นวัฏภาคภายนอก เช่น เนย (butter) มายองเนส (mayonnaise) น้ำสลัด (salad dressing) ไส้กรอก (sausage) ซอสสังเกตุ หรือวิธีทดสอบอิมัลชันประเภทนี้คือ สามารถทำให้เจือจางได้ด้วยการเติมน้ำมันมีค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ต่ำกว่า สามารถผสมได้กับสีชนิดที่ละลายน้ำมัน (oil soluble dye)



ภาพที่ 8 ระบบอิมัลชัน

ที่มา : พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์ (2567)

2.4.2 กลไกการเกิดอิมัลชัน

2.4.2.1 การทำให้ของเหลวแตกตัว กระจายเป็นหยดขนาดเล็ก ๆ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลว 2 ชนิด สามารถทำได้ด้วยการใช้แรงกล เช่น การผสม (mixing) ด้วยเครื่องผสม (mixer) การโฮโมจิไนซ์ (homogenization) ด้วยเครื่องโฮโมจิไนซ์ (homogenizer) เครื่องบดคอลลอยด์ (colloid mill)

2.4.2.2 การทำให้อิมัลชันคงตัว เพื่อไม่ให้แยกชั้นเมื่อตั้งทิ้งไว้ ด้วยการลดแรงตึงผิวของของเหลวทั้งสองส่วน โดยการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier)

2.4.3 การไม่คงตัวของอิมัลชัน

การไม่คงตัวของอิมัลชัน อาจเกิดจากการรวมตัวกัน (coalescence) หรือการจับกลุ่ม (flocculation) ของวัฏภาคภายใน มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น ในน้ำมัน ความร้อนทำลายฟิล์มของโปรตีนที่ห่อหุ้มวัฏภาคภายในทำให้แยกชั้นครีม

2.5 โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยปกติแล้วโปรตีนจะมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน เป็นส่วนประกอบในปริมาณมาก ส่วนธาตุที่ประกอบในปริมาณน้อยได้แก่ กำมะถัน ฟอสฟอรัส เหล็ก (สมปอง ธรรมศิริรักษ์, 2550) นอกจากนี้โปรตีนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตเนื่องจากเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่เป็นเอนไซม์ซึ่งทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับระบบการทำงานของเซลล์รวมทั้งเป็นระบบภูมิคุ้มกันของสิ่งมีชีวิต โปรตีนสามารถพบในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด สัตว์ต้องการใช้โปรตีนตลอดชีวิตเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต และซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ อีกทั้งสัตว์ยังต้องการโปรตีนเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของเลือด เนื้อ เอนไซม์ (enzyme) ภูมิคุ้มกัน (immune) และฮอร์โมน (hormone) และยังนำไปสร้างผลผลิตเพื่อการสืบพันธุ์ซึ่งในสัตว์ต่างชนิดกัน โปรตีนจะมีความจำเพาะเจาะจงกับสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ ทั้งนี้ในเซลล์และเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว พบว่าโปรตีนจะมีความแตกต่างและมีความหลากหลายมาก โปรตีนสามารถพบในธรรมชาติได้ (Riis, 1983; McDonald et al., 2011) การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธีเจตดาห์ลมักจะต้องสมมุติฐานว่าโปรตีนประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 16 และหน่วยที่เล็กที่สุดของโปรตีนคือกรดอะมิโน

2.5.1 โปรตีนในอาหาร

แหล่งอาหารโปรตีนที่สำคัญคือ เนื้อสัตว์รวมถึงทั้งสัตว์บก และสัตว์น้ำ นอกจากนี้ก็มี ไข่ นม และจากพืช อาหารอื่นจะมีโปรตีนในสัดส่วนที่น้อยมีกรดอะมิโนชนิดที่จำเป็นต่อร่างกาย หน้าที่ของโปรตีนในอาหาร โปรตีนมีสมบัติต่าง ๆ เช่น การละลาย การดูดซับ การเกิดเจล การให้ความยืดหยุ่น และการเกิดโฟม เป็นต้น จึงนำสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในอาหารชนิดต่าง ๆ

2.5.2 โปรตีนเนื้อสัตว์

เนื้อสัตว์ (Meat) หมายถึง ชิ้นส่วนของร่างกายสัตว์ที่มนุษย์สามารถนำมาบริโภค ประกอบด้วย ส่วนของเนื้อเยื่ออวัยวะภายใน ทั้งกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อต่าง ๆ เนื้อสัตว์จัดเป็นแหล่งของโปรตีนที่สำคัญมีกรดอะมิโนที่จำเป็นครบถ้วน นอกจากโปรตีนแล้วเนื้อสัตว์ยังมีสารอาหารจำพวกไขมัน เกลือแร่ และวิตามิน โดยเฉพาะธาตุเหล็ก ซีลีเนียม วิตามินเอ วิตามินบี 12 และกรดโฟลิกที่ไม่สามารถพบได้ในอาหารจำพวกพืชหรือมีอยู่แต่ร่างกายจะนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย (poor bioavailability)

2.5.3 โปรตีนจากพืช

โปรตีนจากพืชมักได้จากเมล็ดพืชน้ำมัน เช่น ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ทานตะวัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเมล็ดพืชที่สามารถผลิตได้ในประเทศ ยกเว้นถั่วเหลืองที่ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เพราะความต้องการใช้ภายในประเทศมีมาก ซึ่งโปรตีนจากพืชโดยเฉพาะในพืชตระกูลถั่วประกอบไปด้วยสารสำคัญหลายชนิด ได้แก่ สารจำพวกฟลาโวนอยด์และกลุ่มอื่น ๆ เช่น สารในกลุ่มไอโซฟลาโวนอยด์

(isoflavonoids) ที่ให้ผลในการป้องกันมะเร็ง สารในกลุ่มฮอร์โมนพืช (phytoestrogen) ซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ สารเหล่านี้เป็นสารเสริมสุขภาพที่พบได้เฉพาะในพืชในขณะที่ยังมีชีวิต หรือโปรตีนจากนมมีแนวโน้มทำให้เกิดอาการแพ้หรือรบกวนภูมิคุ้มกันด้านทานของโรคบางอย่างได้ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้โปรตีนจากพืชเพื่อเพิ่มบทบาทเชิงหน้าที่ของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในอาหาร เช่น สมบัติการดูดซับน้ำ การเกิดโฟม โดยเฉพาะสมบัติการเกิดอิมัลชัน และการเกิดเจล ซึ่งมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต และแปรรูปอาหาร (Chabanon et al., 2007; สุภาวดี ทรัพย์ศิริไพบูลย์, 2550)

2.5.4 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน

สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน คือ สมบัติทางเคมีหรือทางกายภาพที่มีผลต่อพฤติกรรมของโปรตีน ในอุตสาหกรรมอาหารมีการนำโปรตีนมาใช้เป็นส่วนประกอบอาหารอย่างมากมาย โดยใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพและรสชาติของอาหารหรือเพิ่มคุณประโยชน์ให้แก่อาหาร ซึ่งโปรตีนมีสมบัติที่หลากหลาย ได้แก่ การจับกับน้ำ (water binding) การเกิดโฟม (foaming ability) การเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) และการเกิดเจล (gelation) (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์, ม.ป.ป.)

2.5.4.1 สมบัติการจับกับน้ำ (water binding properties) โปรตีนเป็นพอลิเพปไทด์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกรดอะมิโน (amino acid) ในโมเลกุลของกรดอะมิโนมีหมู่ R ที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ดังนั้นการจับกับน้ำของโปรตีนจึงขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และลำดับการจัดเรียงตัวของกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบ โปรตีนที่สามารถยึดจับน้ำหรือละลายน้ำได้จึงสามารถรวมตัวเข้ากับอาหารและแสดงสมบัติเชิงหน้าที่ได้โปรตีนที่นำมาใช้ประโยชน์เชิงหน้าที่จึงควรมีความสามารถในการละลาย การวิจัยส่วนมากจึงใช้ความสามารถในการละลายของโปรตีนบ่งชี้คุณภาพของโปรตีนหรือโครงสร้างของโปรตีนทางอ้อม ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายและการจับน้ำของโปรตีน คือ สัดส่วนของส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำของผิวหน้าโปรตีน ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ค่าความแรงของไอออน (ionic strength) ค่าความเข้มข้นของโปรตีน และสารประกอบอื่น ๆ เช่น โลหะ หรือ ตัวทำละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ปริมาณไขมันที่มีอยู่ในโปรตีนก็มีผลต่อความสามารถในการละลายเช่นกัน โดยถ้ามีปริมาณไขมันอยู่มากจะ ทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.5.4.2 สมบัติการเกิดโฟม (foaming properties) หมายถึง ความสามารถของโปรตีนที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับของเหลว และรักษาความคงตัวของฟิล์มไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก ผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการสมบัติการเกิดโฟม ได้แก่ ไอศกรีม เค้ก และเมอร์แรงจ์ เป็นต้น สมบัติการเกิดโฟมจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำของโปรตีน ประจุและค่าจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) ของโปรตีน เช่น globular protein จะเพิ่มความคงตัวของโฟม (foaming stability) ในขณะที่ fibrous protein จะช่วย

ให้เกิด Interfacial ของโปรตีนระหว่างอากาศกับของเหลวอย่างรวดเร็วทำให้เกิด foaming activity สูง (Damodaran & Paraf, 2017) โปรตีนทำหน้าที่สร้างความคงตัวให้กับโครงสร้างของโฟม ซึ่งกลไกการเกิดโฟมของโปรตีน คือโปรตีนละลายในของเหลวและละลายตัวออกเป็นรูปร่างแหวนตรงยาว หรือปลายอน เมื่อตีอัดอากาศเข้าไปโปรตีนจะห่อหุ้มโมเลกุลของก๊าซไว้ในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม โดยหันด้านไม่มีขั้วสู่อากาศหันด้านมีขั้วสู่น้ำซึ่งโครงสร้างของโฟม โดยทั่วไปจะไม่เสถียรถ้าโฟมมีขนาดเล็กเกินไป เพราะโปรตีนแต่ละสายพยายามจะจัดเรียงตัวเองเข้าที่เดิมหากโมเลกุลอยู่ใกล้กัน ในทางกลับกันหากโฟมมีขนาดใหญ่เกินไปโฟมจะยุบตัวได้ง่าย เกิดการแตกของโครงสร้างได้รวดเร็ว ทั้งนี้เพราะฟิล์มโปรตีนไม่หนาแน่นและแข็งแรงพอ ทำให้อากาศภายในดันออกได้ง่าย ได้สรุปลักษณะของโปรตีนที่มีสมบัติการเกิดโฟมได้ดี และช่วยให้โฟมมีความคงตัว ดังนี้ คือ ละลายได้ดี ยึดอยู่ในชั้นระหว่างอากาศและน้ำได้ดี คลายเกลียวและเรียงตัวเป็นระเบียบในชั้นระหว่างอากาศและน้ำได้ตลอดเวลา และยึดโมเลกุลข้างเคียงได้หนาแน่นแต่ยืดหยุ่นรองรับแรงอัดอากาศเข้าและออกได้ดีจะได้โฟมที่มีความคงตัว สมบัติการเกิดโฟมของโปรตีนพิจารณาจาก formability หรือ foam capacity ของโปรตีน

2.5.4.3 สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier properties) โปรตีนมีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่สำคัญในอาหาร โดยโปรตีนที่ละลายน้ำสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่อยู่ระหว่างเฟสของน้ำและน้ำมันและโปรตีนจะจัดเรียงตัวระหว่างเฟส โดยหันเอาส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าสู่ส่วนน้ำมันและหันด้านที่ชอบน้ำไปยังเฟสน้ำ โดยโปรตีนอาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่บริเวณระหว่างเฟสและอาจจัดรูปแบบโครงสร้างต่าง ๆ กัน เช่น เทรนลูป (train loop) หรือเทรล (tail) ซึ่งล้วนมีผลต่อสมบัติการเกิดอิมัลชันรวมทั้งความคงตัวของอิมัลชัน ปัจจัยที่มีผลหรือมีบทบาทกำหนดสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีน ได้แก่ ความสามารถในการละลายของโปรตีน สมบัติการไม่ชอบน้ำบริเวณพื้นผิว (surface hydrophobicity) การสูญเสียสภาพของโปรตีนรวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ เมื่อโปรตีนถูกย่อยเกิดเป็นเปปไทด์ที่มีโมเลกุลสายสั้นลงทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็ว และเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวเมื่อน้ำมัน โดยหันส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาเม็ดน้ำมันและหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาเฟสน้ำทำให้เกิดอิมัลชันขึ้น ความสามารถในการเกิดอิมัลชันของโปรตีนจะขึ้นอยู่กับระดับการย่อยโปรตีน ความเป็นกรด-ด่างของเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยโปรตีน และสมบัติการไม่ชอบน้ำบริเวณพื้นผิว (surface hydrophobicity : S_0) เป็นต้น โดยความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนจะมีค่าต่ำ ณ จุดไอโซอิเล็กทริก (Witteck et al., 2021) สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์พิจารณาจากค่า emulsifying activity index (EAI) ซึ่งจะใช้ประมาณความสามารถของโปรตีนในการช่วยให้เกิดอิมัลชันและประมาณความคงตัวของอิมัลชันโดยใช้ค่า Emulsion stability index (ESI) โดยทั้งสองค่าคำนวณมาจากการตรวจวัดความขุ่นของอิมัลชันที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

2.5.4.4 สมบัติการเกิดเจล (gelling properties) เป็นความสมดุลระหว่างแรงผลักระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลโปรตีนเกิดการรวมตัวกันอย่างต่อเนื่องของโมเลกุลที่เสียสภาพทางธรรมชาติทำให้เกิดโครงข่ายที่ต่อเนื่อง โดยการเกิดเจลมีพื้นฐานอยู่ที่ 2 ขั้นตอน คือ การเสียสภาพทางธรรมชาติ และการรวมตัวกันของโปรตีนที่เสียสภาพทางธรรมชาติ การเกิดเจลของโปรตีนทำให้อาหารมีลักษณะที่ดี แม้ว่าการเกิดเจลนั้นมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่าง ๆ เช่น ปริมาณโปรตีน อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณเกลือแร่ เป็นต้น

2.6 ลิพิดและกรดไขมัน (Lipid and fatty acid)

ลิพิด (lipid) เป็นสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ มีบทบาทสำคัญในการใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองของร่างกาย และเป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยลิพิดที่เป็นพลังงานสำรองของร่างกายมนุษย์และสัตว์ ได้แก่ ไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol) ซึ่งประกอบไปด้วยกรดไขมัน (fatty acid) และกลีเซอรอล (glycerol) ส่วนลิพิดที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ เนื้อเยื่อสมองและประสาท ได้แก่ ฟอสโฟลิพิด (phospholipid) สฟิงโกลิพิด (sphingolipid) และคอเลสเตอรอล (cholesterol) เป็นต้น (นัยนา บุญทวีวัฒน์, 2553)

2.6.1 สมบัติของลิพิด

ลิพิด ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน แต่สัดส่วนของทั้ง 3 ธาตุจะแตกต่างกันไป (บุญล้อม ชีวะอิสระกุล, 2546) โดยปกติลิพิดจะมีจำนวนธาตุออกซิเจนน้อยกว่าคาร์บอนและไฮโดรเจนมาก ลิพิดมีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่ละลายได้ในตัวทำละลายไม่มีขั้ว (nonpolar) คือตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ โพรพานอน เบนซีน เป็นต้น ในขณะที่บางกลุ่มของลิพิดมีทั้งโครงสร้างที่แสดงการมีขั้ว (polar) ด้วย ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) ดังนั้นอาจเรียกกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่แสดงสมบัติทั้ง 2 อย่าง คือทั้งชอบน้ำและไม่ชอบน้ำอยู่ในโมเลกุลเดียวกันหรือแอมฟิไฟล์ (amphiphile) โดยทั่วไปลิพิดมีสมบัติไม่ละลายในน้ำ แต่มีลิพิดบางชนิด เช่น ฟอสโฟกลีเซอไรด์ และสฟิงโกลิพิด ที่มีสมบัติเป็นแอมฟิไฟล์ คือ มีส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำมาละลายน้ำลิพิดเหล่านั้นจะมีโครงสร้างได้ 3 แบบคือ

2.6.1.1 แบบไมเซลล์ (micelle) โดยลิพิดจะหันส่วนที่มีขั้ว (หมู่คาร์บอกซิล) ไว้ด้านนอกเพื่อสัมผัสกับน้ำ และจะเอาส่วนหาง (สายไฮโดรคาร์บอน) ที่ไม่ชอบน้ำเอาไว้ด้านใน

2.6.1.2 แบบแผ่นชั้นเดียว (monolayer) จะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มชั้นเดียว ลอยอยู่บนผิวน้ำ ส่วนที่มีขั้วจะสัมผัสกับน้ำ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะชี้ขึ้นไปในอากาศ

2.6.1.3 แบบแผ่นสองชั้น (bilayer) ลิพิดจะหันส่วนที่ชอบน้ำไว้ด้านนอกผิว 2 ด้าน และเอาส่วนที่ไม่ชอบน้ำไว้ตรงกลาง ลักษณะเช่นนี้จะพบได้ในเยื่อหุ้มเซลล์

2.6.2 กรดไขมัน

กรดไขมัน คือ กรดแอลิแฟติกคาร์บอกซิลิก (aliphatic carboxylic acid) ที่มีสายของไฮโดรคาร์บอนยาวขนาดต่าง ๆ กัน มีสูตรโครงสร้างโดยทั่วไปเป็น $R-COOH$ โดย R คือสายไฮโดรคาร์บอน กรดไขมันที่พบในไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเอสเทอร์ (ester) เป็นลิพิดชนิดต่าง ๆ ส่วนกรดไขมันที่พบในพลาสมาจะอยู่ในรูปเสรีโดยจับอยู่กับแอลบูมิน กรดไขมันมักมีโครงสร้างเป็นสายตรง ไม่แตกแขนงและมีคาร์บอนเป็นจำนวนคู่ สายไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันอาจจะมีพันธะคู่หรือไม่มีก็ได้ ดังนั้นจึงแบ่งกรดไขมันออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid)

2.6.2.1 กรดไขมันอิ่มตัว เป็นกรดไขมันที่มีโครงสร้างอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเดี่ยวตลอดสาย กรดไขมันอิ่มตัวที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ คือ กรดพาลมิติก (palmitic acid: C_{16}) รองลงมา คือ กรดสเตียริก (stearic acid: C_{18}) ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้ร่างกายได้รับจากอาหารหรือสังเคราะห์ขึ้นได้เอง

2.6.2.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว เป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่อยู่บนโครงสร้างคาร์บอนตรงตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีโครงสร้าง 2 แบบ คือ แบบ *cis* และ *trans* ส่วนใหญ่กรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่อยู่ในรูปแบบ *cis* ในธรรมชาติจะพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากที่สุดและมักพบว่าพันธะคู่จะอยู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่ 9 หรือ 10 (Mapato et al., 2010) โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของโครงสร้างและจำนวนพันธะคู่ ดังนี้

1. กรดไขมันที่มี 1 พันธะคู่ (monounsaturated fatty acids) เป็นกลุ่มที่พันธะคู่เพียง 1 พันธะ กรดไขมันที่มีมากที่สุดในร่างกาย คือ กรดพาล์มิโทเลอิก (palmitoleic, $C_{16:1}$) และกรดโอเลอิก (oleic acid, $C_{18:2}$) จากการศึกษาวิจัยของ Mapato et al. (2010) พบว่าการเสริมน้ำมันมะพร้าวที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบอยู่ โดยทำการเสริมที่ระดับร้อยละ 3 ในสูตรอาหารชั้น สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำมันในโคนมได้

2. กรดไขมันที่มีมากกว่า 1 พันธะคู่ (polyunsaturated fatty acids) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่มากกว่า 2 พันธะขึ้นไป ปกติพันธะคู่ของกรดไขมันจะไม่อยู่ชิดกันมีหมู่

methylene ($-\text{CH}_2-$) คั่นกลาง ตัวอย่างเช่น กรดลิโนเลอิก (linoleic, $\text{C}_{18}:2$) กรดลิโนเลนิก (linolenic, $\text{C}_{18}:3$) และกรดอะราชีดิก (arachidonic, $\text{C}_{20}:4$) เป็นต้น (Park et al., 2013)

2.6.3 สมบัติของกรดไขมัน

2.6.3.1 ลักษณะทางกายภาพของกรดไขมันขึ้นอยู่กับความยาวของสายไฮโดรคาร์บอน และความอิ่มตัวหรือไม่อิ่มตัว โดยปกติแล้วจุดหลอมเหลวของกรดไขมันจะแปรผันตรงตามความยาวของสายไฮโดรคาร์บอน ในขณะที่จะแปรผกผันกับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน กล่าวคือในกรดไขมันที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันที่มีขนาดเล็ก และในกรดไขมันที่อิ่มตัวจะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว ดังนั้นจะเห็นว่าน้ำมันพืชซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลจะมีสภาพเป็นของเหลวแม้ว่าจะมีอุณหภูมิลดลงถึง 4 องศาเซลเซียสก็ตาม

2.6.3.2 กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ส่วนมากจะเป็นประเภทที่ไม่อิ่มตัว เนื่องจากในเยื่อหุ้มเซลล์มีความจำเป็นที่จะต้องประกอบด้วยไขมันที่มีสถานะภาพเป็นของเหลวเพื่อทำหน้าที่ทางชีวภาพได้ ในขณะที่ไขมันที่เป็นองค์ประกอบของลิพิดที่จะถูกเก็บสะสมเป็นพลังงานสำรอง จะมีความอิ่มตัวมากกว่าที่พบในเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นต้น

2.6.3.3 กรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีการจัดเรียงตัวตรงตำแหน่งพันธะคู่ได้ 2 แบบ คือแบบ *cis*-form และ *trans*-form กรดไขมันแบบ *trans* จะมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าแบบ *cis* กรดไขมันไม่อิ่มตัวเกือบทั้งหมดมีโครงสร้างแบบ *cis*-form

2.6.3.4 กรดไขมันไม่สามารถดูดแสงในช่วง visible light และ near ultraviolet light แต่ถ้าใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และให้ความร้อนกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะ สามารถเปลี่ยนพันธะคู่ให้เป็นแบบคอนจูเกต (conjugated double bond, $-\text{CH}=\text{CHCH}=\text{CH}-$) ซึ่งสามารถดูดแสงได้ในช่วงคลื่นแสง 230-260 นาโนเมตร จึงใช้เป็นวิธีหาปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะได้

2.6.3.5 กรดไขมันสามารถเติมธาตุหมู่ฮาโลเจน (halogen) เช่น ไอโอดีนหรือคลอรีน ลงในพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้ และใช้วิธีนี้หาจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมันหรือลิพิดได้ ขณะที่กรดไขมันในสิ่งมีชีวิตจะอยู่ในรูปเอสเทอร์ (ester) หรือเอไมด์ (amide) และกรดไขมันอิสระมีค่า pK_a ประมาณ 4.85 จึงสามารถแตกตัวได้ที่ physiological pH และพบปริมาณน้อยในพลาสมาสามารถจับกับโปรตีนอัลบูมินได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนทางเลือกและการพัฒนาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก พบว่า มีการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน และการวิจัยทั้งในด้านกระบวนการแปรรูป การปรับปรุงคุณภาพ คุณค่าทางโภชนาการ รวมถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์อิมัลชันในหลากหลายประเด็น รวมถึงการนำสมบัติของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือกมาผลิตเป็นอาหารอิมัลชัน และมีการประยุกต์ใช้กับวัตถุดิบและการทดลองอื่น ๆ เกี่ยวข้องดังรายละเอียดในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของโปรตีนทางเลือกและการแปรรูปผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก

งานวิจัย	ชนิดของผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ	วิธีการ/สูตร/สภาวะ ที่ดีที่สุด
Nutritional Value of the Duckweed Species of the Genus <i>Wolffia</i> (Lemnaceae) as Human Food (Appenroth, 2010)	-	ไข่ผ่า	- ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของไข่ผ่าเพื่อให้เป็นอาหารสำหรับมนุษย์ พบว่า ไข่ผ่ามีปริมาณโปรตีนร้อยละ 20-30 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 10-20 ไขมันร้อยละ 1-5 และใยอาหารร้อยละ 25 มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนมากกว่าร้อยละ 60 ของไขมันทั้งหมด และปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน n-3 นั้นสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน n-6
Pre-treated mealworm larvae and silkworm pupae as a novel protein ingredient in emulsion sausages. (H.-W. Kim et al., 2016)	ไส้กรอกอิมัลชัน	หนอนนก และผักตบชวา	- ศึกษาผลของการเติมผงหนอนนก และผักตบชวาต่อคุณค่าทางโภชนาการ กายภาพ เคมี และเนื้อสัมผัสของไส้กรอกอิมัลชัน แผลงทั้งสองชนิดผ่านการบดเป็นผง ขจัดไขมัน และไฮโดรไลซ์ด้วยกรด -สูตรไส้กรอก ได้แก่ เนื้อหมูไม่ติดมันร้อยละ 60 น้ำแข็งร้อยละ 20 ไขมันส่วนหลังร้อยละ 20 และทดแทนเนื้อหมูไม่ติดมันด้วยผงแมลงร้อยละ 10

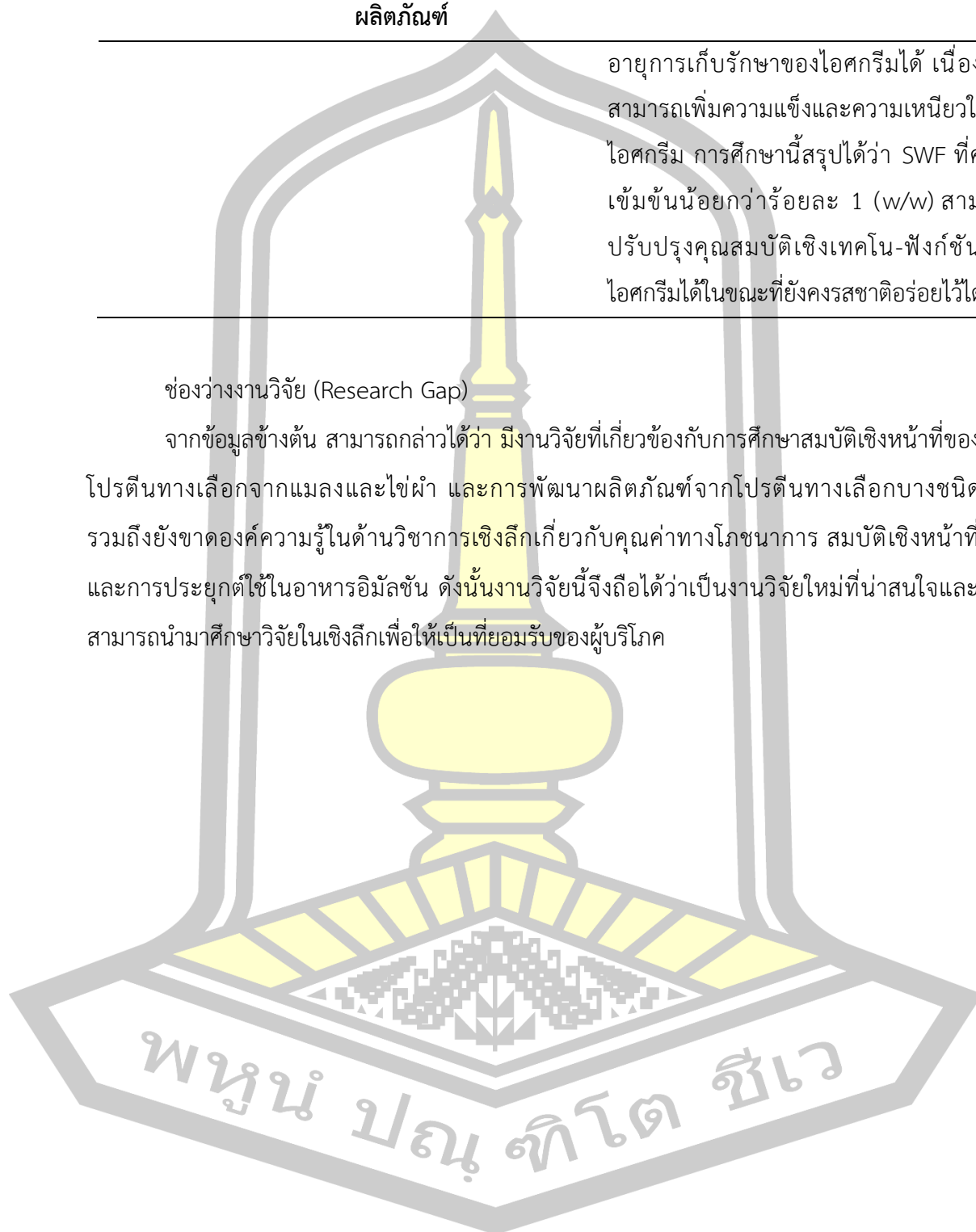
งานวิจัย	ชนิดของ ผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ	วิธีการ/สูตร/สภาวะ ที่ดีที่สุด
			- การขจัดไขมันและการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดสามารถเพิ่มปริมาณโปรตีนของผงแมลงได้ แต่ลดค่า pH ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง และความสามารถในการละลายลดลง แต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตเป็นไส้กรอกอิมัลชัน พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน นั้นแสดงว่าแมลงผงเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นไส้กรอกอิมัลชันได้ โดยไม่กระทบต่อคุณค่าทางโภชนาการ
Comparison of functional properties of edible insects and protein preparations thereof (Zielińska et al., 2018)	-	ตัวอ่อน หนอนนก ตั๊กแตนตัวเต็มวัย และจิ้งหรีดบ้าน ตัวเต็มวัย	- ประเมินจากความสามารถความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน ความสามารถในการละลาย และคุณสมบัติของโฟมและอิมัลชันของแมลงทั้ง 3 ชนิด -แมลงทั้ง 3 ชนิดจากประเทศโปแลนด์ทำการอดอาหารเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อล้างอาหารในระบบทางเดินอาหาร แล้วทำการแช่แข็ง ทำให้แห้ง และบดเป็นผง - ความสามารถในการละลายโปรตีนแสดงค่าต่ำสุดที่ pH 5 ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมันจะเห็นได้ชัดเจนในโปรตีนของแมลง <i>T. molitor</i> (3.95 กรัม/กรัม) และโปรตีน <i>G. sigillatus</i> (3.33 กรัม/กรัม) ตามลำดับ โปรตีนจาก <i>G. sigillatus</i> ยังแสดงให้เห็นความสามารถในการทำให้เกิดโฟมสูงสุด รองลงมาคือความคงตัวของโฟม และกิจกรรมอิมัลชัน (ร้อยละ 99.0, 92.0 และ 72.62 ตามลำดับ) ในขณะที่ <i>S. gregaria</i> มีความคงตัวของอิมัลชันสูงสุด (ร้อยละ 51.31)

งานวิจัย	ชนิดของ ผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ	วิธีการ/สูตร/สภาวะ ที่ดีที่สุด
Characterization of protein in cricket (<i>Acheta domesticus</i>), locust (<i>Locusta migratoria</i>), and silk worm pupae (<i>Bombyx mori</i>) insect powders (Brogan et al., 2021)	-	จิ้งหรีด ตั๊กแตน และดักแด้ ไหม	- ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการและสมบัติหน้าที่ของโปรตีนจากจิ้งหรีด ตั๊กแตน และดักแด้ไหม ประกอบด้วยกรดอะมิโนทั้งหมด pH ในการละลายของโปรตีน - จิ้งหรีด ตั๊กแตน และดักแด้ไหม ทำให้แห้งด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง และบดเป็นผง - EAAs ทั้งหมด (21.8-23.7 กรัม EAAs/100 กรัม ตัวอย่างแห้ง) สูงกว่าคำแนะนำของ FAO/WHO/UNU สำหรับผู้ใหญ่ถึง 2 เท่า (12.7 กรัม EAAs/100 กรัม ตัวอย่างแห้ง) แต่เหมาะสมสำหรับทารกเพียงครึ่งเดียว (46.0 กรัม/ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) โปรตีนแมลงเกือบร้อยละ 70 ละลายใน pH ที่แตกต่างกัน ในขณะที่เพียงร้อยละ 7 ที่ละลาย pH 4-6
Impact of silkworm pupae (<i>Bombyx mori</i>) powder on cream foaming, ice cream properties and palatability (David-Birman et al., 2022)	ไอศกรีม ดักแด้ไหม	ดักแด้ไหม (SFW)	- ศึกษาปริมาณของผงดักแด้ไหม (SWF) ต่อคุณสมบัติทางรีโอโลยี เนื้อสัมผัส และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของการขึ้นฟูและไอศกรีมดักแด้ไหม - ศึกษาอัตราส่วนของ SWF ร้อยละ 1, 4 และ 7 (w/w) ผสมกับนม 200 มิลลิลิตร วิปครีม 250 มิลลิลิตร น้ำตาล 100 กรัม เกลือ 0.36 กรัม และกลีเซอรีน 0.3 มิลลิลิตร ผสมและแช่แข็งที่อุณหภูมิ -22 องศาเซลเซียส - การเสริม SWF ในไอศกรีมส่งผลทำให้อัตราการขึ้นฟูของครีม (Cream overrun) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สามารถเพิ่มความหนืดของไอศกรีม และช่วยลดการแยกตัวของโฟมได้ จึงมีความสามารถในการช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส

งานวิจัย	ชนิดของ ผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ	วิธีการ/สูตร/สภาวะ ที่ดีที่สุด
			อายุการเก็บรักษาของไอศกรีมได้ เนื่องจากสามารถเพิ่มความแข็งและความเหนียวให้แก่ไอศกรีม การศึกษานี้สรุปได้ว่า SWF ที่ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 1 (w/w) สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงเทคโนโลยี-ฟังก์ชันของไอศกรีมได้ในขณะที่ยังคงรสชาติอร่อยไว้ได้

ช่องว่างงานวิจัย (Research Gap)

จากข้อมูลข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนทางเลือกจากแมลงและไข่ผ่า และการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากโปรตีนทางเลือกบางชนิด รวมถึงยังขาดองค์ความรู้ในด้านวิชาการเชิงลึกเกี่ยวกับคุณค่าทางโภชนาการ สมบัติเชิงหน้าที่ และการประยุกต์ใช้ในอาหารอิมัลชัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงถือได้ว่าเป็นงานวิจัยใหม่ที่ น่าสนใจและสามารถนำมาศึกษาวิจัยในเชิงลึกเพื่อให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) เพื่อศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่โปรตีนและไขมันของโปรตีนทางเลือก 3 ชนิด ได้แก่ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ฝำ คัดเลือกโปรตีนทางเลือกที่เหมาะสมนำมาศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภค และอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) ดำเนินการวิจัยตามลำดับต่อไปนี้

- 3.1 ขอบเขตการวิจัย
- 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย
- 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล
- 3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ขอบเขตการวิจัย

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทำวิจัยจากแหล่งโปรตีนทางเลือก 3 ชนิด ได้แก่ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ฝำ โดยแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 การศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก การทดลองที่ 2 การศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก และการทดลองที่ 3 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย)

การทดลองที่ 1 การศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่โปรตีนและไขมันของโปรตีนทางเลือก จากดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ฝำ เพื่อศึกษาและประเมินคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือกทั้ง 3 ชนิด โดยนำวัตถุดิบมาผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช แล้วเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอวิเคราะห์ จากนั้นนำมาศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร และคาร์โบไฮเดรต ศึกษาปริมาณกรดอะมิโนด้วยเครื่อง LC-MS/MS ศึกษาปริมาณกรดไขมันด้วยเครื่อง GC และศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมัน ได้แก่ ความสามารถในการละลายของโปรตีน ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน สมบัติของโฟม และสมบัติของอิมัลชัน และ

คัดเลือกโปรตีนทางเลือกที่มีสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันที่ดีที่สุดนำมาศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันในการทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 การศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก โดยนำวัตถุดิบที่มีคุณภาพมากที่สุดจากการทดลองที่ 1 มาศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก คือ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากโปรตีนทางเลือก โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของโปรตีนทางเลือก แล้วนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี ได้แก่ สมบัติเชิงรีโอโลยี ค่าสี ความสามารถในการอุ้มน้ำ ปริมาณซัลไฟดริลทั้งหมด ลักษณะเนื้อสัมผัส โครงสร้างเส้นใยภายใน องค์ประกอบทางเคมี กรดอะมิโน และการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก โดยประเมินลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Rating Scale (1 = ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9 = ชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ประเมินจำนวน 30 คน คัดเลือกสูตรที่ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุดนำมาศึกษาอายุการเก็บรักษาในการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 3 การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก โดยทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ทุก ๆ 7 วัน (วันที่ 0 7 14 21 และ 28) โดยวิเคราะห์ค่าสี pH ความสามารถในการอุ้มน้ำ ลักษณะเนื้อสัมผัส และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ยีสต์และรา

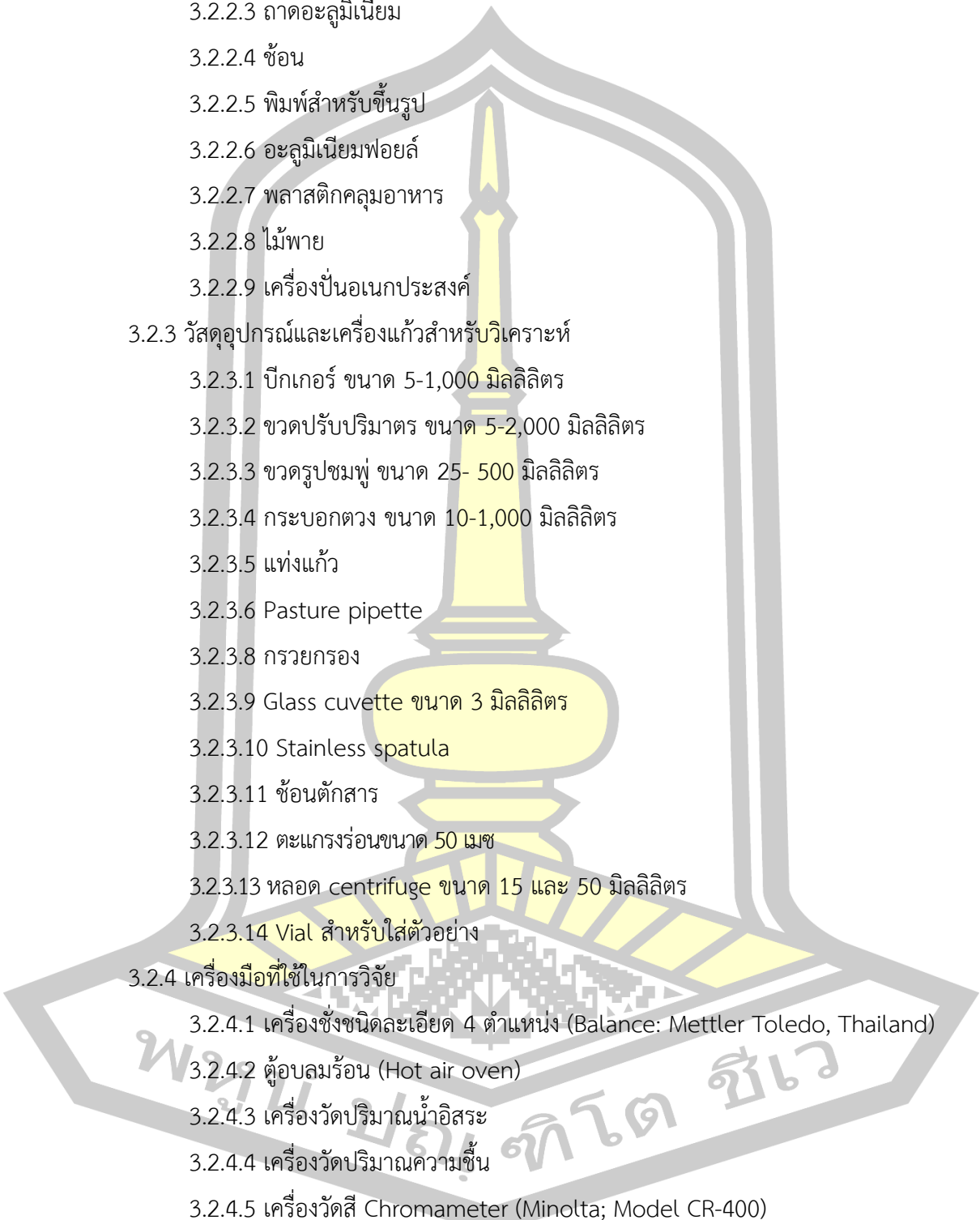
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 วัตถุดิบ

- 3.2.1.1 ดักแด้ไหม
- 3.2.1.2 จิ้งหรีดบ้าน
- 3.2.1.3 ไข่ผ่า
- 3.2.1.4 เกลือ ตรา ประทีพ
- 3.2.1.5 น้ำมันรำข้าว ตรา คิง
- 3.2.1.6 น้ำตาลทรายขาว ตรา ไร่ทิพย์
- 3.2.1.7 ผงชูรส ตรา आयुष्मान
- 3.2.1.8 พริกไทย ตรา ไร่ทิพย์
- 3.2.1.9 โซเดียมอัลจิเนต บริษัท กรุงเทพเคมี
- 3.2.1.10 น้ำสะอาด

3.2.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการผลิตเนื้อเทียมเสริมดักแด้ไหม

- 3.2.2.1 ชามผสม

- 
- 3.2.2.2 หม้อ
 - 3.2.2.3 ถาดอะลูมิเนียม
 - 3.2.2.4 ช้อน
 - 3.2.2.5 พิมพ์สำหรับขึ้นรูป
 - 3.2.2.6 อะลูมิเนียมฟอยล์
 - 3.2.2.7 พลาสติกคลุมอาหาร
 - 3.2.2.8 ไม้พาย
 - 3.2.2.9 เครื่องปั่นเนกประสงค์
 - 3.2.3 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์
 - 3.2.3.1 ปีกเกอร์ ขนาด 5-1,000 มิลลิลิตร
 - 3.2.3.2 ขวดปรับปริมาตร ขนาด 5-2,000 มิลลิลิตร
 - 3.2.3.3 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 25- 500 มิลลิลิตร
 - 3.2.3.4 กระบอกตวง ขนาด 10-1,000 มิลลิลิตร
 - 3.2.3.5 แท่งแก้ว
 - 3.2.3.6 Pasture pipette
 - 3.2.3.8 กรวยกรอง
 - 3.2.3.9 Glass cuvette ขนาด 3 มิลลิลิตร
 - 3.2.3.10 Stainless spatula
 - 3.2.3.11 ช้อนตักสาร
 - 3.2.3.12 ตะแกรงร่อนขนาด 50 เมช
 - 3.2.3.13 หลอด centrifuge ขนาด 15 และ 50 มิลลิลิตร
 - 3.2.3.14 Vial สำหรับใส่ตัวอย่าง
 - 3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
 - 3.2.4.1 เครื่องชั่งชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง (Balance: Mettler Toledo, Thailand)
 - 3.2.4.2 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
 - 3.2.4.3 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ
 - 3.2.4.4 เครื่องวัดปริมาณความชื้น
 - 3.2.4.5 เครื่องวัดสี Chromameter (Minolta; Model CR-400)
 - 3.2.4.6 Micropipette and Tips
 - 3.2.4.7 เครื่องกวนสาร
 - 3.2.4.8 เครื่อง vortex (VTX-3000L)

3.2.4.9 เครื่อง centrifuge (Universal 320)

3.2.4.10 เครื่องเขย่าสาร

3.2.4.11 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.2.4.12 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน (Kjeldath apparatus)

3.2.4.13 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณไขมัน (Soxhlet apparatus)

3.2.4.14 เตาอบความร้อนสูงวิเคราะห์หาปริมาณเส้นใย (Fibre Analyzer)

3.2.4.15 เครื่อง Liquid Chromatography-Mass Spectro (LC-MS/MS)

3.2.4.16 เครื่องวิเคราะห์ Gas Chromatography (GC)

3.2.4.17 เครื่องวิเคราะห์พฤติกรรมกรไหล (HAAKE MARS 40)

3.2.4.18 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (SPECTROstar Nano BMG LABTECH's, Germany)

3.2.4.19 เครื่อง rotary evaporator (Buchi R-3, Vacuum Pump v-700, Switzerland)

3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.5.1 Sodium hydroxide (NaOH) (Analytical grade)

3.2.5.2 Ethanol (Analytical grade)

3.2.5.3 Methanol (Analytical grade)

3.2.5.4 Bradford assay (Analytical grade)

3.2.5.5 Petroleum Ether (Analytical grade)

3.2.5.6 Boric acid (Analytical grade)

3.2.5.7 Sulfuric acid (Analytical grade)

3.2.5.8 Copper sulphate (Analytical grade)

3.2.5.9 Formic acid (Analytical grade)

3.2.5.10 Acetone nitrite (HPLC grade)

3.2.5.11 Hydrochloric acid (Analytical grade)

3.2.5.12 Phosphate buffer (Analytical grade)

3.2.5.13 5-5'-dithiobis-2-nitrobenzoic acid (DTNB) (Analytical grade)

3.2.5.14 Urea (Analytical grade)

3.2.5.15 Sodium dodecyl sulfate (SDS) (Analytical grade)

3.2.5.16 Bradford assay (Analytical grade)

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันของโปรตีนทางเลือก

โดยนำโปรตีนทางเลือก 3 ชนิด ได้แก่ ตักแต้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ผ่า โดยนำวัตถุดิบมาผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช แล้วเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณกรดอะมิโน ปริมาณกรดไขมัน และศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมัน

3.3.1.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนทางเลือก ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน โยอาหาร และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2000)

3.3.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโนด้วยเครื่อง LC-MS/MS (LCMS-8030, Shimadzu, Kyoto, Japan) โดยนำตัวอย่าง 5 กรัม ชั่งไขมันด้วย n-hexane 50 มิลลิลิตร (ดัดแปลงจาก T.-K. Kim et al (2020) แล้วทำให้เซลล์แตกด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการขจัดไขมันด้วย n-hexane ทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นกำจัด n-hexane ออกจากตัวอย่างโดยวางในตู้ดูดควันทิ้งไว้ข้ามคืน ทำการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างตามวิธีของ Ladrón De Guevara et al. (1995) ตัวอย่างที่ผ่านการขจัดไขมัน 0.5 กรัม มาไฮโดรไลซ์ด้วย 6 N HCl 10 มิลลิลิตร แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ในตู้อบลมร้อน (model FED 115, WTB Binder, Germany) จากนั้นทำการระเหย HCl ด้วยเครื่อง rotary evaporator (Buchi R-3, Vacuum Pump v-700, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารสกัดออก แล้วเจือจางตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นอัตราส่วน 1:10 ส่วนใสกรองผ่านกระดาษกรองแบบไนลอนขนาด 0.22 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC-MS/MS ตามวิธีการของ Chumroenphat et al. (2021) คอลัมน์ชนิด C-18 (InertSustain® C-18 (2.1 × 150 mm, 3 µm) โดยใช้เฟสเคลื่อนที่คือ กรดฟอร์มิกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในน้ำกลั่น (Line A) และกรดฟอร์มิกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 (Line B) รายงานผลปริมาณกรดอะมิโนเป็นกรัมของกรดอะมิโนต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง คำนวณค่าดัชนีกรดอะมิโนที่จำเป็น (Essential Amino Acid Index; EAAI) คำนวณตามวิธีการของ Yi et al. (2013) โดยเทียบปริมาณกรดอะมิโนที่แนะนำต่อวันตาม WHO/FAO/UNU (2017) ดังสมการที่ 1

$$EAAI = \sqrt[10]{\left(\frac{\text{mg of f lysine in 1 g of test protein}}{\text{mg of lysine in 1 g reference protein}}\right) \times \text{etc.: for the other 9 essential amino acid}} \quad (1)$$

3.3.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันด้วยเครื่อง GC โดยการเตรียม Fatty-acid methyl esters (FAMES) ของสารสกัดไขมันด้วย transesterification ใน H_2SO_4 (0.9 M ใน เมทานอล) กรองผ่านคอลัมน์ Sep-pak ซิลิกา (Alltech Associates, Inc., Deerfield, IL) FAMES ได้รับการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้ระบบ GC (GC-2014, Shimadzu, Tokyo, Japan) ด้วย flame ionization detector และ silica capillary column (30 m $\times$ 0.25 mm, 25 μm ; DB-Wax, USA) กรดไขมันจะถูกแยกตามระยะเวลาของ FAMES (Yang et al., 2006)

3.3.1.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมัน ได้แก่ ความสามารถในการละลายของโปรตีน ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน สมบัติของโฟม และสมบัติของอิมัลชัน

1. ความสามารถในการละลายของโปรตีน ดัดแปลงจาก Castellani et al. (2003) โดยละลายตัวอย่าง 0.2 กรัม ลงในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และปรับ pH เป็น 2 ถึง 11 ด้วย 0.1 หรือ 1N HCl และ 0.1 หรือ 1N NaOH กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที และเก็บตัวอย่างเหนือตะกอนเพื่อวัดความเข้มข้นของโปรตีนโดยวิธีเบรดฟอร์ด (Bradford, 1976) โดยแต่ละหลุมเติมสารละลายตัวอย่าง 10 ไมโครลิตร และสารละลายเบรดฟอร์ด 250 ไมโครลิตร และเขย่าเป็นเวลา 30 วินาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (SPECTROstar Nano BMG LABTECH's, Germany) คำนวณความเข้มข้นของโปรตีนที่ละลายน้ำ เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงกับกราฟมาตรฐานที่สร้างเป็นด้วย Bovine Serum Albumin (BSA) ที่ความเข้มข้น 0.125 ถึง 1.0 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

2. ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน

2.1 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity; WHC) ตามวิธีของ Diniz & Martin (1997) โดยเตรียมตัวอย่าง 0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร และกวนด้วยเครื่องกวนสารที่ความเร็ว 540 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วปั่นเหวี่ยงที่ 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที บันทึกน้ำหนักตะกอน คำนวณความแตกต่างของน้ำหนัก และรายงานผลกรัมของน้ำที่ดูดซับต่อกรัมตัวอย่าง

2.2 ความสามารถในการอุ้มน้ำมัน (Oil holding capacity; OHC) ดัดแปลงจาก Haque & Mozaffar (1992) โดยเตรียมตัวอย่าง 0.5 กรัม ละลายในน้ำมันรำข้าว 10 มิลลิลิตร และกวนด้วยเครื่องกวนสารที่ความเร็ว 540 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วปั่นเหวี่ยงที่ 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที บันทึกน้ำหนักตะกอน คำนวณความแตกต่างของน้ำหนักและรายงานผลกรัมของน้ำมันที่ดูดซับต่อกรัมตัวอย่าง (กรัม/กรัม)

3. สมบัติของโฟม ความสามารถในการเกิดโฟม (FC) และความคงตัวของโฟม (FS) ดัดแปลงจาก Guo et al. (2015) เริ่มจากการเตรียมตัวอย่าง 0.2 กรัม ละลายในน้ำ

20 มิลลิลิตร ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยโฮโมจีไนเซอร์ (AM-8 nissei Ace HOMOGENIZER, Japan) ที่ความเร็ว 16,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที นำโฟมที่ได้ใส่ลงในกระบอกตวง แล้วบันทึกปริมาตรของโฟมหลังจากผสมที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) 30 และ 60 นาที และคำนวณหาการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟม และคำนวณหาการเกิดโฟมและความคงตัวของโฟมจากสมการที่ 2-3

$$\text{Foaming capacity (FC) (\%)} = [(V_0 - V)/V] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Foam stability (FS) (\%)} = (V_{30}/V_0) \times 100 \quad (3)$$

โดย V คือ ปริมาตรก่อนเกิดโฟม (มิลลิลิตร)

V_0 คือ ปริมาตรหลังการเกิดโฟม (มิลลิลิตร)

V_{30} คือ ปริมาตรของโฟมหลังจากทิ้งไว้ 30 นาที (มิลลิลิตร)

4. สมบัติของอิมัลชัน ดัดแปลงจาก Pearce & Kinsella (1978) และ Wu et al. (2009) โดยตัวอย่าง 0.2 กรัม ผสมกับ 0.1M phosphate buffer pH 7.0 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วทำให้เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำมันรำข้าว 1 มิลลิลิตร ที่ความเร็ว 20,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที ด้วยโฮโมจีไนเซอร์ (AM-8 nissei Ace HOMOGENIZER, Japan) แล้วปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที บันทึกปริมาตรของแต่ละชั้น และความคงตัวของอิมัลชันจะประเมินหลังจากผสมที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) 30 และ 60 นาที แล้วคำนวณหากิจกรรมของอิมัลชันและความคงตัวของอิมัลชันจากสมการที่ 4-5

$$\text{Emulsion activity (EA) (\%)} = (V_e/V) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Emulsion stability (ES) (\%)} = (V_{30}/V_e) \times 100 \quad (5)$$

โดย V คือ ปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมด

V_e คือ ปริมาตรหลังการเกิดอิมัลชัน

V_{30} คือ ปริมาตรของอิมัลชันหลังจากทิ้งไว้ 30 นาที (มิลลิลิตร)

คัดเลือกวัตถุดิบที่มีคุณภาพและมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกต่อไป

3.3.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก โดยนำวัตถุดิบที่มีคุณภาพและมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 1 มาศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก คือ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกด้วยเทคนิคการแช่แข็ง (Freezing aliment technique) โดยใช้สูตรอ้างอิงและดัดแปลงสูตรจาก Nakagawa et al. (2024) โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของโปรตีนทางเลือก (ร้อยละ 5-15) ดังตารางที่ 7 รวมกับการผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ ได้แก่ โซเดียมอัลจิเนต เกลือผงชูรส พริกไทย น้ำมันรำข้าว และน้ำ

การเตรียมเนื้อเทียมอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกด้วยเทคนิคการแช่แข็ง โดยดัดแปลงจาก Chantanuson et al., 2023 และ Nakagawa et al., 2024 โดยผสมส่วนผสมดังตารางที่ 7 ด้วยเครื่องปั่นอาหารอเนกประสงค์ด้วยความเร็วสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 นาที จะได้ของส่วนผสมของเหลวกับของแข็ง หรือ Slurry แล้วนำของเหลวที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติเชิงรีโอโลยี จากนั้นเทส่วนที่ได้ลงพิมพ์ซิลิโคน ($3.5 \times 3.5 \times 3.5$ เซนติเมตร) แล้วนำมาแช่แข็งที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (การแช่แข็งครั้งที่ 1) หลังจากการแช่แข็งตัวอย่างจะถูกนำออกจากพิมพ์ แล้วนำมาแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาแช่แข็งรอบที่ 2 เพื่อเพิ่มความเสี่ยงของผลิตภัณฑ์อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (การแช่แข็งครั้งที่ 2) แล้วนำตัวอย่างที่แช่แข็งมาละลายที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เพื่อจัดฟลักน้ำแข็งออกจากโครงสร้างของตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และการยอมรับทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ 7 สูตรในการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก

ส่วนผสม (ร้อยละ)	REF*	SP 5%	SP 10%	SP 15%
โปรตีนถั่วเหลือง	5	-	-	-
ผงผักต้ม	-	5	10	15
โซเดียมอัลจิเนต	2	2	2	2
เกลือ	1	1	1	1
ผงชูรส	0.1	0.1	0.1	0.1
พริกไทย	0.2	0.2	0.2	0.2
น้ำมันรำข้าว	8.2	8.2	8.2	8.2
น้ำ	83.5	83.5	78.5	73.5

หมายเหตุ : *ดัดแปลงสูตรอ้างอิงจาก Nakagawa et al. (2024)

3.3.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่

1. การศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีส่วนผสมของเหลวกับของแข็ง (slurry) โดยศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยี ดำเนินการตามวิธีการของ Nakagawa et al. (2024) โดยศึกษาพฤติกรรมการไหลของส่วนผสมของเหลวกับของแข็งด้วยเครื่อง Haake MARS II rheometer ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ cone-plate sensor (C35/1 Ti polished) ระยะห่างระหว่าง cone และ plate 1 มิลลิเมตร และศึกษาอัตราเฉือนตั้งแต่ 0.1-100 วินาที⁻¹ และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่ปรากฏ (Apparent viscosity; Pa.s) กับอัตราเฉือน (Shear rate; s⁻¹)

ศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกแบบการทดสอบเฉือนเป็นรอบ (Oscillatory Shear Test) โดยทดสอบเฉือนเป็นรอบด้วยการกวาดความถี่ (Frequency Sweep test) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในช่วงความถี่เชิงมุมที่ 0.1-10 Hz โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ มอดุลัสสะสม (Storage modulus; G') มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus; G'') และแทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent; tan δ) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G', G'' (Pa) และ tan δ กับความถี่ (Frequency; Hz)

2. ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ด้วยเครื่อง Chroma meter (Minolta; Model CR-400, Japan)

3. การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ ดัดแปลงวิธีการจาก Zheng et al. (2017) โดยตัดตัวอย่างขนาด 1 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น ($W_{initial}$) แล้วห่อด้วยกระดาษกรอง จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วบันทึกน้ำหนักหลังปั่นเหวี่ยง (W_{final}) แล้วคำนวณหาร้อยละในการอุ้มน้ำต่อน้ำหนักทั้งหมด ดังสมการที่ 6

$$WHC (\text{ร้อยละ}) = [(W_{initial} - W_{final}) / W_{initial}] \times 100 \quad (6)$$

4. การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่องมือ TA-XT plus (Stable Micro Systems, UK) วิเคราะห์แบบ TPA โดยดัดแปลงวิธีจาก Barbanti และ Pasquini (2005) นำมาวิเคราะห์ค่าความแน่นเนื้อด้วยหัววัดแบบไบเมด (HDP/BSK) ค่าความแข็ง ค่าการเกาะติด ค่าการยึดติด ค่าความยืดหยุ่น และความเคี้ยวได้ โดยใช้หัววัดทรงกระบอก (P/6)

5. การศึกษาโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อศึกษาโครงสร้างภายในของเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OLYMPUS รุ่น CHS, Japan) ที่กำลังขยาย 4 เท่า

3.3.2.2 การศึกษาคุณภาพทางเคมี ได้แก่

1. การวิเคราะห์ปริมาณซัลไฮโดรลทั้งหมด ดัดแปลงจาก Ellman (1959) โดยใช้ 5-5'-dithiobis-2-nitrobenzoic acid (DTNB) ตัวอย่าง 0.1 กรัม ในสารละลาย 8M urea, SDS ร้อยละ 2, 10 mM EDTA, 0.1M phosphate (pH 7) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร ผสมเข้าด้วยกันโดยใช้ไฮโมจิไนเซอร์ (Heidolph RZR 2052 control, Germany) ที่ความเร็ว 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 นาที จากนั้นดูดตัวอย่างปริมาตร 4 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับ DTMB 0.4 มิลลิลิตร บ่มในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที วัดค่าความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 นาโนเมตร (HACH, Model DR 2700, Germany) และคำนวณหาปริมาณซัลไฮโดรลทั้งหมด รายงานเป็นไมโครโมลต่อกรัม ($\mu\text{mol/g}$) ดังสมการที่ 7

$$\text{ปริมาณซัลไฮโดรลทั้งหมด } (\mu\text{mol/g}) = (A \times D)/(C \times B) \quad (7)$$

โดย A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของส่วนผสม

B คือ ความเข้มข้นของโปรตีน (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียโมลาร์ ($13,600 \text{ โมล}^{-1} \cdot \text{ซม}^{-1} \cdot \text{ลิตร}$)

D คือ อัตราส่วนการเจือจาง

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน โยอาหาร และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2005)

3. การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโน ด้วยเครื่อง LC-MS/MS

3.3.2.3 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Rating Scale (1 = ไม่ชอบมากที่สุด, 9 = ชอบมากที่สุด) โดยประเมินทั้งหมด 5 คุณลักษณะ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม กับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนทั้งหมด 30 คน เพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์สุดท้ายมาศึกษาในการทดลองที่ 3 การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย)

3.3.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ และอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) โดยทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ทุก 7 วัน (วันที่ 0 7 14 21 และ 28) โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมี

ได้แก่ ค่าสี ค่า pH ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ และลักษณะเนื้อสัมผัส ตลอดจนวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

3.3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเคมีทางกายภาพ

1. ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ด้วยเครื่อง Chroma meter
2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย pH meter
3. ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ ดัดแปลงวิธีการจาก Zheng et al. (2017)
4. ลักษณะเนื้อสัมผัส ได้แก่ ค่าความแน่นเนื้อ ค่าความแข็ง ค่าการเกาะติด ค่าการยึดติด ค่าความยืดหยุ่น และความเคี้ยวได้

3.3.3.2 วิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา

โดยศึกษาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา โดยควบคุมปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ไม่เกิน 1×10^4 cfu/g ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลูกชิ้นเนื้อวัว ลูกชิ้นหมู และลูกชิ้นไก่ (มอก. 1009-2533) และยีสต์และรา ไม่เกิน 10 cfu/g

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิจัยนี้แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นดังนี้

- 3.4.1 นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ร้อยละ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- 3.4.2 สรุปผลการวิเคราะห์และรายงานในตาราง รูปภาพ และกราฟ

3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการวิจัยข้อมูลดังนี้

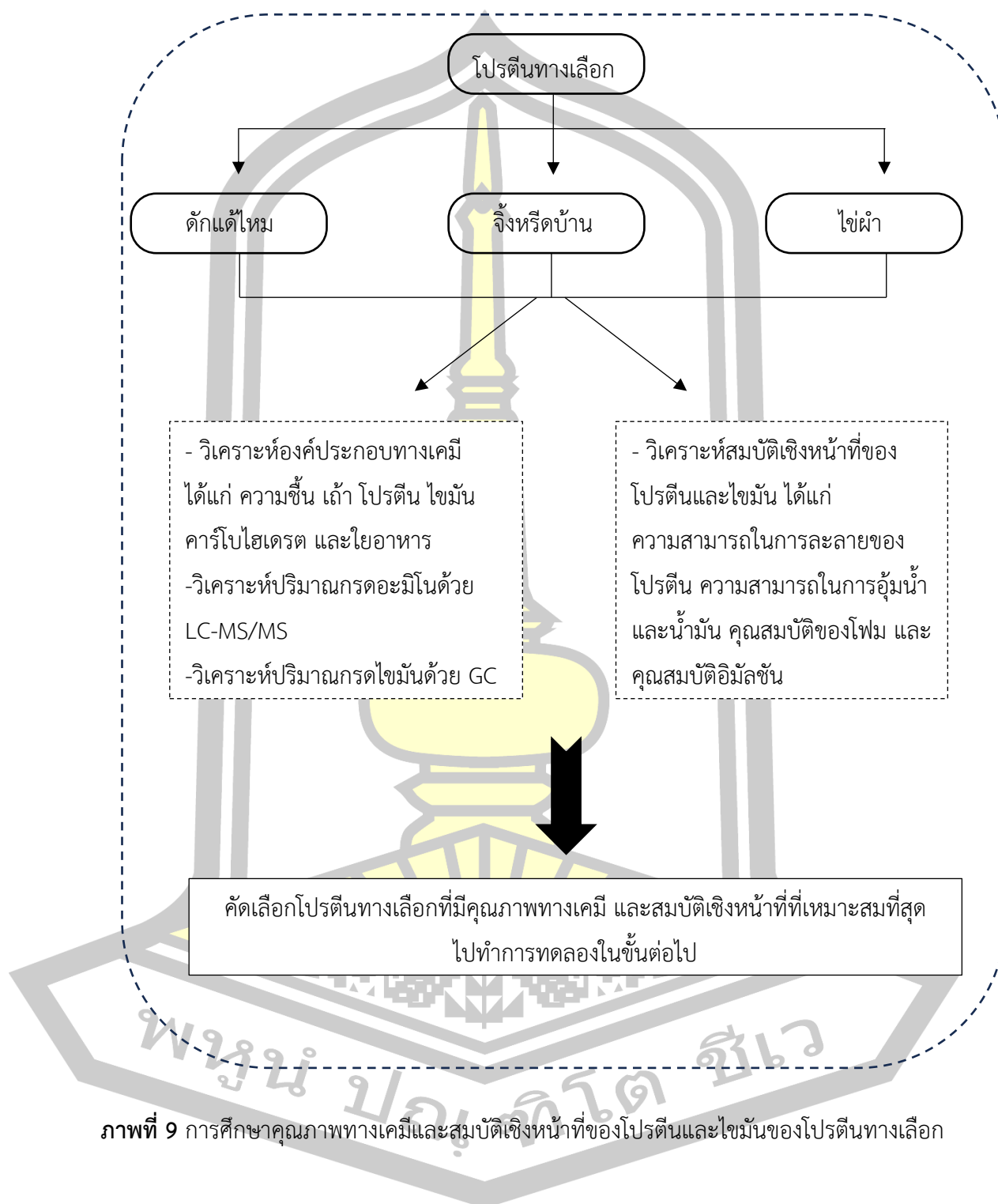
3.5.1 สถิติพื้นฐาน ได้แก่

- 3.5.1.1 ค่าเฉลี่ย
- 3.5.1.2 ร้อยละ
- 3.5.1.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.5.2 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและเคมี แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

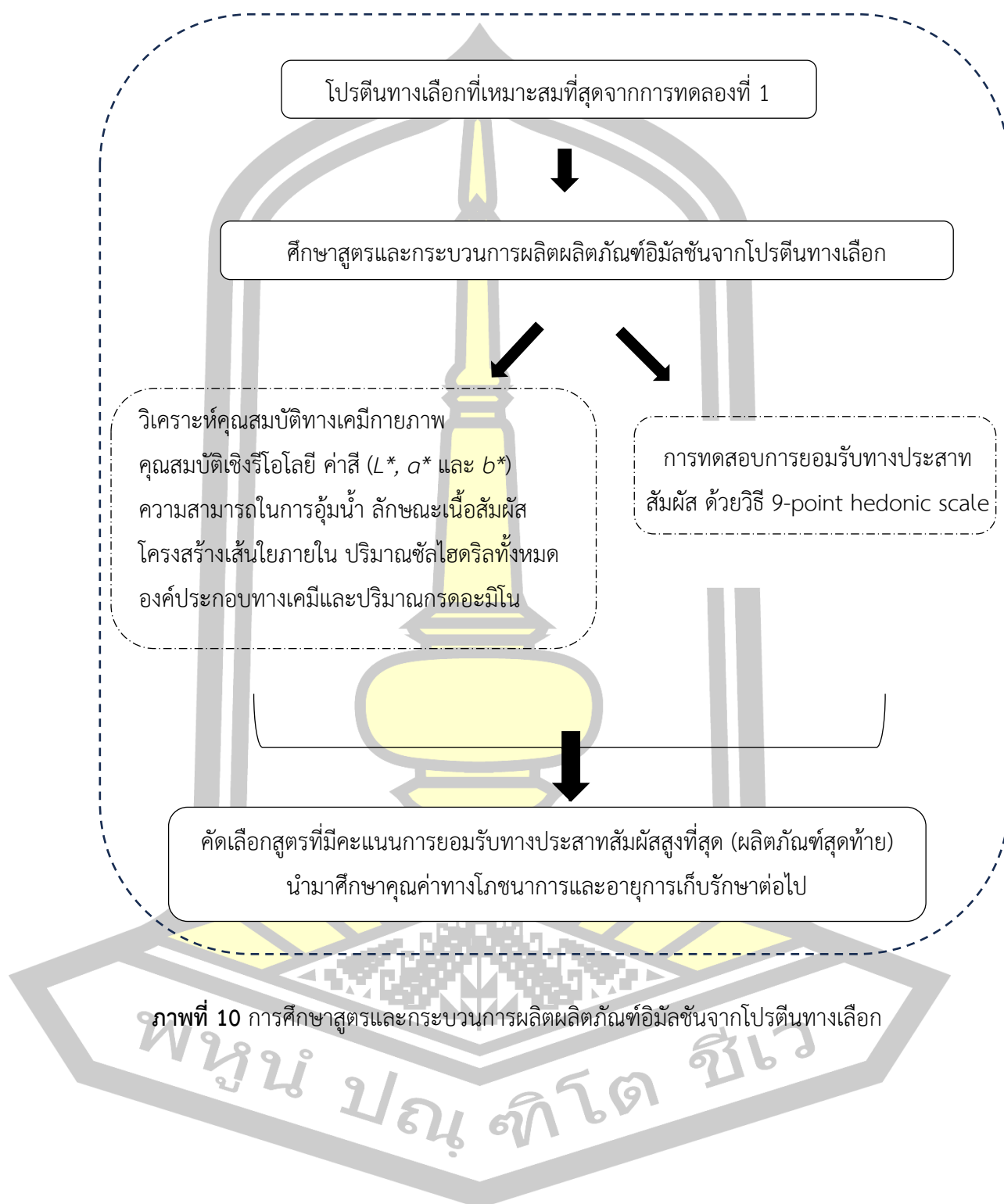
(Completely randomized design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย Analysis of Variance (ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) การทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้การวางแผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics V22.0

แผนการดำเนินการวิจัย การทดลองที่ 1

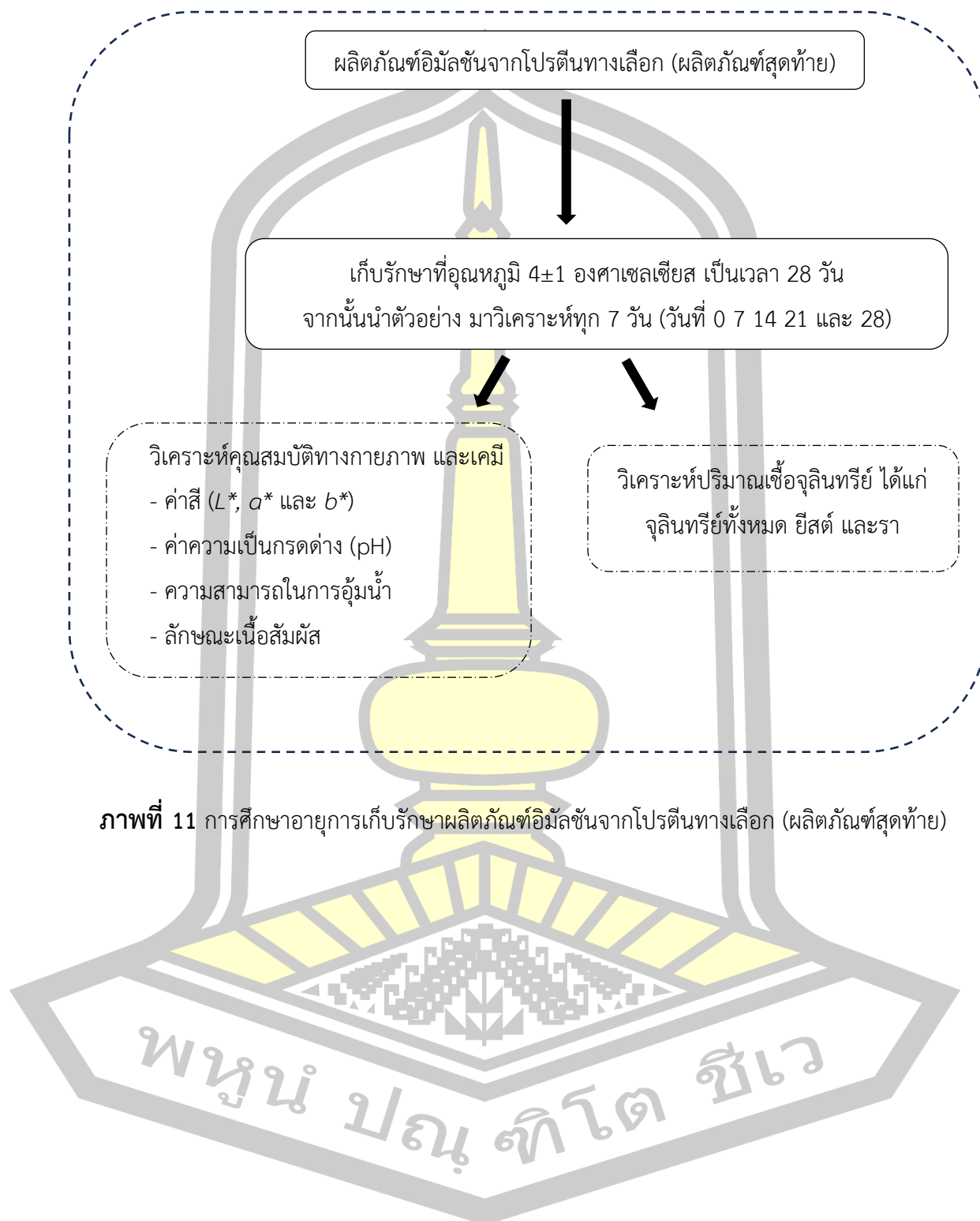


ภาพที่ 9 การศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันของโปรตีนทางเลือก

แผนการดำเนินการวิจัย การทดลองที่ 2



แผนการดำเนินการวิจัย การทดลองที่ 3



บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก

ศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก 3 ชนิด คือ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ฝำ โดยศึกษาคุณภาพทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี กรดอะมิโน และกรดไขมัน และศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมัน ได้แก่ ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน สมบัติของโฟม และสมบัติของอิมัลชัน ดังรายละเอียดข้อที่ 4.1.1-4.1.4

4.1.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนทางเลือก

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีจากโปรตีนทางเลือก 3 ชนิด คือ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ฝำ โดยศึกษา ความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน โยอาหาร และคาร์โบไฮเดรต แสดงดังตารางที่ 8 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยดักแด้ไหมมีปริมาณความชื้นและไขมันที่สูงที่สุด ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งของพลังงานที่สำคัญของอาหาร ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณไขมันที่รายงานในการศึกษาของ Brogan et al. (2021) ที่ศึกษาในดักแด้ไหม (*Bombyx mori*) โดยมีปริมาณโปรตีน 33 กรัม/100 น้ำหนักแห้ง ในขณะที่ จิ้งหรีดบ้านมีความชื้นไม่แตกต่างจากดักแด้ไหม แต่มีปริมาณโปรตีนที่สูงที่สุด ซึ่งทำให้จิ้งหรีดบ้านเป็น แหล่งโปรตีนทางเลือกที่ดี รองลงมาคือดักแด้ไหม และไข่ฝำ ตามลำดับ ปริมาณโปรตีนที่สูงในจิ้งหรีด และดักแด้ไหมนี้ บ่งบอกถึงการเป็นแหล่งของโปรตีนทางเลือกที่มีคุณภาพซึ่งสูงกว่าพืชชนิดอื่น เช่น ข้าวสาลี (10.57-14.14 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ถั่วเหลือง (40 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) (Muqaddasi et al., 2020; Sobko et al., 2019) ในขณะที่ไข่ฝำมีปริมาณเถ้าในอาหาร โยอาหาร และคาร์โบไฮเดรตที่สูงที่สุด ซึ่งทำให้มันเป็นแหล่งที่ดีสำหรับการเสริมโยอาหารในอาหารฟังก์ชัน การที่ไข่ฝำมีปริมาณเถ้าสูงยังบ่งชี้ถึงความหลากหลายของแร่ธาตุที่มีอยู่ อย่างไรก็ตาม ปริมาณโปรตีน และไขมันที่ต่ำของไข่ฝำเมื่อเทียบกับแหล่งอื่น ๆ อาจจำกัดการใช้ไข่ฝำเป็นแหล่งโปรตีนหลัก แต่สามารถเสริมสร้างคุณค่าทางโภชนาการของอาหารในด้านโยอาหารและแร่ธาตุได้

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนทางเลือก

องค์ประกอบทางเคมี (กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)	โปรตีนทางเลือก		
	ดักแด้ใหม่	จิ้งหรีดบ้าน	ไข่ฝำ
ความชื้น	2.99±0.17 ^a	2.72±0.13 ^{ab}	2.53±0.17 ^b
เถ้า	2.95±0.06 ^c	3.74±0.19 ^b	7.68±0.48 ^a
ไขมัน	36.76±0.88 ^a	20.18±0.15 ^b	0.49±0.18 ^c
โปรตีน	52.02±0.75 ^b	59.13±0.43 ^a	26.76±1.16 ^c
ใยอาหาร	4.14±0.07 ^c	5.89±0.33 ^b	16.76±0.20 ^a
คาร์โบไฮเดรต	1.14±0.01 ^c	8.34±0.11 ^b	45.78±1.07 ^a

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงคือค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) และ ^{a,b,c} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.1.2 ผลการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนของโปรตีนทางเลือก

องค์ประกอบของกรดอะมิโนสามารถใช้เป็นดัชนีคุณค่าทางโภชนาการในการประเมินคุณภาพของแหล่งโปรตีนได้ เพื่อประเมินคุณภาพของโปรตีนจากแหล่งของโปรตีนทางเลือกเมื่อเทียบกับอาหารสำหรับมนุษย์ จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโน (Udomsil et al., 2019; Yi et al., 2013) โดยกรดอะมิโนจากโปรตีนทางเลือกทั้ง 3 ชนิด แสดงดังตารางที่ 9 พบว่า ปริมาณของกรดอะมิโนของโปรตีนทางเลือกทั้ง 3 ชนิด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยดักแด้ใหม่มีปริมาณกรดอะมิโนสูงที่สุด (61.81 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) รองลงมาคือ จิ้งหรีดบ้าน และไข่ฝำ ตามลำดับ ดักแด้ใหม่ มีปริมาณกรดอะมิโนจำเป็น (EAAs) โดยรวมสูงรองจากจิ้งหรีดบ้าน โดยเฉพาะ Arginine (5.77 กรัม/100 กรัม) และ Phenylalanine (4.56 กรัม/100 กรัม) ซึ่งสูงที่สุดในกลุ่ม มีความโดดเด่นในการส่งเสริมการสังเคราะห์โปรตีนและระบบภูมิคุ้มกัน ส่วนจิ้งหรีดบ้านมีปริมาณ EAAs รวมสูงที่สุด (34.02 กรัม/100 กรัม) โดยเฉพาะ Histidine (9.17 กรัม/100 กรัม) และ Methionine (3.90 กรัม/100 กรัม) เหมาะสมต่อการเสริมกรดอะมิโนจำเป็นในอาหารโปรตีนสูง ขณะที่ไข่ฝำ มี EAAs รวมต่ำที่สุด (18.54 กรัม/100 กรัม) แต่ยังมี Arginine (5.33 กรัม/100 กรัม) และ Phenylalanine (3.39 กรัม/100 กรัม) ในปริมาณสูง ดักแด้ใหม่มีปริมาณดัชนีกรดอะมิโนที่จำเป็น (EAAI) สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งบอกว่าดักแด้ใหม่มีศักยภาพสูงในการเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพสำหรับการบริโภค ซึ่งสูงกว่าเวย์โปรตีน (1.21) เมื่อเทียบกับคำแนะนำสำหรับผู้ใหญ่จาก FAO พบว่า ดักแด้ใหม่มีกรดอะมิโนจำเป็นบางชนิด เช่น Histidine, Methionine และ Tryptophan ที่สูงกว่าคำแนะนำสำหรับผู้ใหญ่ (WHO/FAO/UNU, 2017)

ตารางที่ 9 ปริมาณกรดอะมิโนของโปรตีนจากเปลือกเทียบกับเวย์โปรตีน และปริมาณมาตรฐานที่แนะนำสำหรับผู้ใหญ่จาก WHO/FAO/UNU

กรดอะมิโน (AAs; กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)	โปรตีนทางเลือก			เวย์โปรตีน (Banaszek et al., 2019)	กรดอะมิโนที่แนะนำ สำหรับผู้ใหญ่ (WHO/FAO/UNU, 2017)
	ดักแด้ไหม	จิ้งหรีดบ้าน	ไข่ผ่า		
Essential amino acids (EAAs)					
Arginine	5.77±0.20 ^a	3.42±0.01 ^c	5.33±0.13 ^b	2.3	-
Histidine	2.19±0.03 ^b	9.17±0.13 ^a	0.61±0.01 ^c	1.6	1.5
Isoleucine	3.66±0.01 ^a	3.61±0.01 ^b	2.83±0.07 ^c	4.6	3.0
Leucine	3.09±0.06 ^b	3.42±0.01 ^a	2.59±0.08 ^c	8.8	5.9
Lysine	3.38±0.02 ^b	4.62±0.20 ^a	1.18±0.02 ^c	7.5	4.5
Methionine	2.24±0.03 ^b	3.90±0.16 ^a	0.18±0.02 ^c	1.6	1.6
Phenylalanine	4.56±0.07 ^a	1.06±0.01 ^c	3.39±0.07 ^b	2.6	-
Threonine	1.86±0.09 ^b	2.93±0.08 ^a	0.35±0.23 ^c	4.5	2.3
Tryptophan	3.61±0.01 ^a	0.49±0.05 ^c	1.45±0.01 ^b	1.3	2.3
Valine	1.96±0.08 ^a	1.40±0.02 ^b	0.64±0.05 ^c	4.4	3.9
ΣEAAs	32.32±0.48 ^b	34.02±0.47 ^a	18.54±0.48 ^c	39.2	
EAAI	1.33±0.01 ^a	1.07±0.02 ^b	0.46±0.01 ^c	1.21	
Non-Essential amino acids (NEAAs)					
Alanine	2.13±0.05 ^b	2.32±0.01 ^a	1.25±0.01 ^c	4.3	
Asparagine	0.75±0.01 ^b	1.18±0.03 ^a	0.75±0.03 ^b	-	
Aspartic acid	5.20±0.15 ^a	1.36±0.04 ^c	2.48±0.21 ^b	11.5	
Cysteine	0.16±0.00 ^a	ND	0.05±0.00 ^b	1	
Glutamine	3.01±0.13 ^b	7.07±0.24 ^a	0.49±0.03 ^c	-	
Glutamic acid	5.84±0.08 ^a	4.18±0.05 ^b	1.08±0.01 ^c	16.8	
Glycine	1.74±0.04 ^b	4.76±0.45 ^a	0.18±0.01 ^c	4.1	
Proline	1.57±0.04 ^b	1.89±0.09 ^a	0.30±0.01 ^b	4.5	
Serine	2.11±0.17 ^b	2.43±0.02 ^a	0.37±0.02 ^c	5.3	
Tyrosine	6.96±0.28 ^a	1.77±0.01 ^c	2.42±0.04 ^b	3.8	
ΣNEAAs	32.49±0.76 ^a	26.96±0.34 ^b	9.29±0.14 ^c	51.3	
ΣAAs	61.81±1.20 ^a	60.98±0.33 ^b	27.90±0.36 ^c	99.1	

หมายเหตุ : ตัวเลขที่แสดงคือค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) ND คือ Not detect, ^{a,b,c} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ปริมาณกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น (NEAAs) ในผักดก (32.49 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ซึ่งสูงกว่าจิ้งหรีดบ้าน (26.96 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) และไข่ฝำ (9.29 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผักดกและสามารถให้กรดอะมิโนครบถ้วนมากขึ้นเมื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหาร ไข่ฝำแม้จะมีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นน้อย แต่ปริมาณสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นสูงถึงร้อยละ 66.45 ซึ่งสามารถเสริมกับแหล่งโปรตีนอื่นเพื่อเพิ่มคุณภาพโปรตีนในอาหารได้ ดังนั้น จิ้งหรีดได้ว่าผักดกและจิ้งหรีดบ้านมีความสามารถในการเสริมสร้างคุณค่าทางโภชนาการให้กับอาหารด้วยกรดอะมิโนจำเป็นและไม่จำเป็นที่หลากหลาย ไข่ฝำแม้จะมีกรดอะมิโนจำเป็นที่ต่ำกว่า แต่มีสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นสูงทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบที่เสริมคุณค่าทางโปรตีนในอาหารประเภทอื่นได้

4.1.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันของโปรตีนทางเลือก

กรดไขมันมีคุณสมบัติด้านการอักเสบและมีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์พอสตาไกลนดิน ทำให้กรดไขมันมีความสำคัญต่อโรคเกี่ยวกับโครงสร้างกระดูกและกล้ามเนื้อ นอกจากนี้ กรดไขมันยังเป็นแหล่งพลังงานและกรดไขมันจำเป็นที่สำคัญในอาหารของมนุษย์อีกด้วย (R. A. Wu et al., 2020) จากการวิเคราะห์กรดไขมันของโปรตีนทางเลือกสามชนิด ได้แก่ ผักดก จิ้งหรีดบ้าน และไข่ฝำ แสดงดังตารางที่ 10 พบว่าองค์ประกอบของกรดไขมันมีความหลากหลายและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพและประโยชน์ทางโภชนาการของโปรตีนเหล่านี้ในด้านต่าง ๆ โดยผักดกมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัว (SFA) ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับจิ้งหรีดบ้าน (31.80 และ 38.89 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ) ขณะที่ไข่ฝำมีปริมาณ SFA ต่ำที่สุด (28.49 กรัม/100 กรัม) ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว (USFA) ในไข่ฝำสูงที่สุด (69.82 กรัม/100 กรัม) โดยเฉพาะกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (PUFA) ซึ่งสูงถึง 59.84 กรัม/100 กรัม แสดงให้เห็นว่าไข่ฝำสามารถเป็นแหล่งที่ดีของกรดไขมันที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น α -Linolenic acid (C18:3) ซึ่งพบสูงสุดในไข่ฝำ (33.63 กรัม/100 กรัม) รองลงมาคือผักดก 29.07 กรัม/100 กรัม ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ช่วยเพิ่มการทำงานของระบบประสาท ลดเนื้อเยื่อไขมัน อาการอักเสบ และความเสี่ยงของโรคที่เกิดจากโรคอ้วน แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ต่อสุขภาพที่อาจใช้ในการต่อสู้กับภาวะแทรกซ้อนที่เกี่ยวข้อง (Wijaya & Linawati, 2024) สำหรับผักดกและจิ้งหรีดบ้าน แม้ว่าจะมีปริมาณ SFA สูงกว่าไข่ฝำ แต่ก็มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (MUFA) เช่น Oleic acid (C18:1) ซึ่งพบในผักดกสูงที่สุด (28.11 กรัม/100 กรัม) ทำให้ผักดกเป็นแหล่งของกรดไขมันที่มีคุณภาพ

ในการให้พลังงาน และเสริมสร้างสุขภาพหัวใจและหลอดเลือด (Riley et al., 2022) นอกจากนี้ จิ้งหรีดบ้านยังมีปริมาณ Linoleic acid (C18:2) สูงที่สุด (27.55 กรัม/100 กรัม) ซึ่งเป็นกรดไขมัน จำเป็นที่มีประโยชน์ต่อการเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกัน ส่งผลต่อสุขภาพหลอดเลือดหัวใจและการเผาผลาญของหัวใจและการเจริญเติบโต (Marangoni et al., 2020) จากการวิเคราะห์กรดไขมันในโปรตีนทางเลือก ไข่ฝามีความโดดเด่นในด้านกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (PUFA) ซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพหัวใจและหลอดเลือด ขณะที่จิ้งหรีดบ้านมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงแต่มีปริมาณ Linoleic acid (C18:2) และ Stearic acid (C18:0) ที่ส่งผลดีต่อการทำงานของร่างกาย ส่วนดักแด้ใหม่มีความสมดุลระหว่างกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยเฉพาะ Oleic acid (C18:1) ที่ช่วยลดคอเลสเตอรอล LDL และเสริมสร้างสุขภาพหัวใจและหลอดเลือด (Riley et al., 2022) อย่างไรก็ตามการบริโภคโปรตีนทางเลือกอาจเพิ่มการบริโภคกรดไขมันจำเป็นในร่างกาย การบริโภคไขมันมากเกินไปอาจส่งผลเสียและนำไปสู่โรคภัยไข้เจ็บได้ ดังนั้นจึงควรรับประทานปริมาณไขมันให้เหมาะสมกับความต้องการในแต่ละวัน

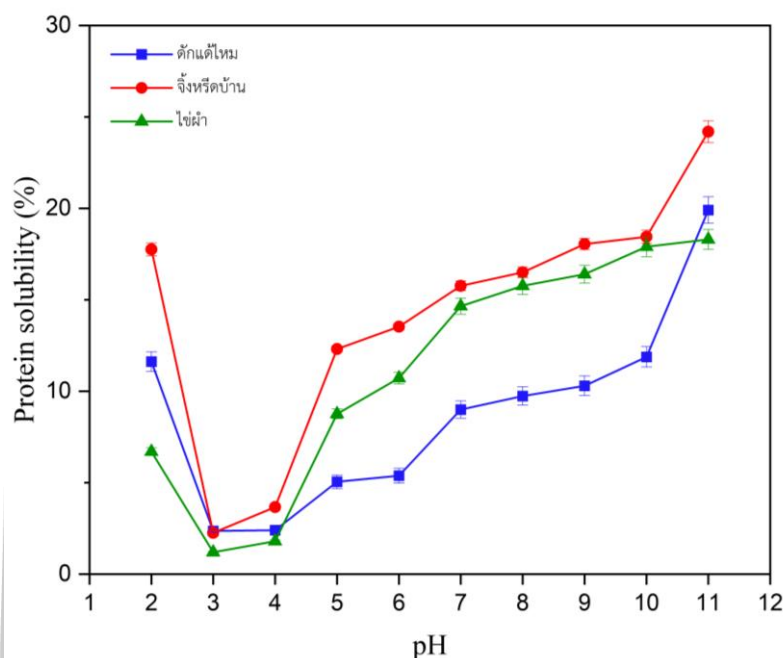
4.1.4 ผลศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก

จากผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนทางเลือก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 10 และตารางที่ 11 พบว่า โปรตีนทางเลือกทั้งสามชนิดแสดงความสามารถในการละลายในแต่ละ pH (2-11) ที่แตกต่างกัน โดยที่ pH 3-4 แสดงความสามารถในการละลายที่ต่ำที่สุดหรือเกิดการตกตะกอนของโปรตีนมากที่สุด โดยจิ้งหรีดบ้าน ดักแด้ใหม่ และไข่ฝามีความสามารถในการละลายประมาณร้อยละ 2.26 2.36 และ 1.20 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าโปรตีนทางเลือกทั้งสามชนิด มีความสามารถในการละลายที่ต่ำที่สุด แต่มีความสามารถในการละลายที่สูงที่ pH 2 โดยจิ้งหรีดบ้านแสดงความสามารถในการละลายดีที่สุด (ร้อยละ 17.76) รองลงมาคือดักแด้ใหม่ (ร้อยละ 11.62) และไข่ฝ่า (ร้อยละ 6.70) ตามลำดับ ในขณะที่มีความสามารถในการละลายสูงสุดในสภาวะ pH ที่แตกต่าง โดยเฉพาะ pH 11 จิ้งหรีดบ้านแสดงความสามารถในการละลายที่สูงที่สุด (ร้อยละ 24.19) รองลงมาคือดักแด้ใหม่ และไข่ฝ่า ประมาณร้อยละ 20 และ 18.3 ตามลำดับ ซึ่งความสามารถในการละลายเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และหน้าที่ของโปรตีน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและระดับความไม่ชอบน้ำของโมเลกุลโปรตีน (Sathe & Salunkhe, 1981) รวมถึงความสามารถในการละลายของโปรตีนยังส่งผลต่อการแปรรูปอาหาร สมบัติเชิงหน้าที่อื่น ๆ รวมถึงความรู้สึกของผู้บริโภคเมื่อรับประทานด้วย

ตารางที่ 10 องค์ประกอบของกรดไขมันจากโปรตีนทางเลือก

กรดไขมัน (กรัม/100 กรัม ไขมัน)	โปรตีนทางเลือก		
	ดักแด้ใหม่	จังหวัดบ้าน	ไข่ผ่า
Capric acid (C10:0)	0.15±0.01 ^b	0.01±0.00 ^c	0.20±0.01 ^a
Lauric acid (C12:0)	0.19±0.01 ^c	0.36±0.03 ^a	0.22±0.01 ^b
Myristic acid (C14:0)	0.22±0.01 ^c	0.45±0.02 ^a	0.38±0.02 ^b
Palmitic acid (C16:0)	25.29±0.13 ^a	25.23±0.21 ^a	24.54±0.07 ^b
Palmitoleic acid (C16:1)	1.92±0.03 ^b	1.12±0.04 ^c	5.52±0.35 ^a
Stearic acid (C18:0)	5.57±0.20 ^b	11.03±0.17 ^a	2.43±0.11 ^c
Oleic acid (C18:1)	28.11±0.27 ^a	24.05±0.37 ^b	4.32±0.13 ^c
Linoleic acid (C18:2)	6.83±0.22 ^c	27.55±0.93 ^a	26.08±0.20 ^b
α-Linolenic acid (C18:3)	29.07±0.35 ^b	6.27±0.33 ^c	33.63±0.54 ^a
Arachidic acid (C20:0)	0.15±0.01 ^b	0.40±0.01 ^a	ND
Eicosenoic acid (C20:1)	0.20±0.01 ^a	0.13±0.01 ^b	ND
Eicosadienoic acid (C20:2)	0.12±0.01 ^b	0.39±0.03 ^a	ND
Dihomo-gamma-linolenic acid (C20:3)	ND	0.31±0.01 ^a	ND
Behenic acid (C21:0)	ND	1.41±0.11 ^a	ND
Erucic acid (C22:1)	ND	1.29±0.07 ^a	ND
Lignoceric acid (C24:0)	0.23±0.02 ^b	ND	0.44±0.02 ^a
Unknow	1.93±0.09 ^a	ND	1.70±0.03 ^b
Total fatty acids	100.00	100.00	100.00
Total SFA	31.80±0.96 ^b	38.89±1.15 ^a	28.49±0.29 ^c
Total USFA	66.27±1.57 ^b	61.11±1.89 ^c	69.82±1.37 ^a
Total MUFA	30.24±0.31 ^a	26.59±1.37 ^b	9.98±0.33 ^c
Total PUFA	36.03±0.99 ^b	34.52±0.67 ^c	59.84±0.29 ^a

หมายเหตุ : ตัวเลขที่แสดงคือค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3), SFAs: saturated fatty acids., USFAs: unsaturated fatty acid., MUFAs: monounsaturated fatty acids. PUFAs: polyunsaturated fatty acids, ND คือ Not detect, ^{a,b,c} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 12 ความสามารถในการละลายของโปรตีนทางเลือกที่ pH ต่างกัน

ความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมัน ดังตารางที่ 11 พบว่า ไข่ผ่ามีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงที่สุดที่ 25.46 กรัม/กรัม ขณะที่จิ้งหรีดบ้านและดักแด้ไหมมีค่าน้อยกว่าประมาณ 8.27 และ 8.01 กรัม/กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าไข่ผ่ามีสมบัติในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ต้องการการอุ้มน้ำ อีกทั้งไข่ผ่ามีความสามารถสูงที่สุดที่ 22.87 กรัม/กรัม ซึ่งมากกว่าดักแด้ไหม (15.83 กรัม/กรัม) และ จิ้งหรีดบ้าน (11.61 กรัม/กรัม) สมบัตินี้มีความสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ต้องการดูดซับน้ำมัน หรืออาหารที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ซึ่งความสามารถในการอุ้มน้ำและน้ำมันนี้ส่งผลต่อสมบัติของ อิมัลชันและสมบัติของโฟม สมบัติของโฟมในอาหารนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอิมัลชัน แรงตึงของ ส่วนต่อประสาน พฤติกรรมการไหล และสภาวะการทำงาน ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัส ขนาดของฟอง และความเสถียรของโฟมตามระยะเวลา (Thakur et al., 2003)

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการเกิดโฟมของโปรตีนทางเลือกทั้งสามชนิด พบว่า ไข่ผ่ามีค่าการเกิดโฟมสูงที่สุดที่ร้อยละ 11.86 ซึ่งมากกว่าดักแด้ไหม (ร้อยละ 5.77) และจิ้งหรีดบ้าน (ร้อยละ 6.25) แต่โปรตีนทั้งสามชนิดแสดงค่าความคงตัวของโฟมที่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ซึ่งความคงตัวของโฟมในโปรตีนทางเลือกนี้สามารถใช้เป็นสมบัติในการรักษาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความคงตัวของโฟมได้ สมบัติของอิมัลชันในอาหาร ได้แก่ ความคงตัว เนื้อสัมผัส และความสามารถใน

การห่อหุ้มสารประกอบชีวภาพ ซึ่งช่วยเพิ่มสุขภาพ ความยั่งยืน และความปลอดภัยในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ (Tan & McClements, 2021)

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการเกิดอิมัลชันของโปรตีนทางเลือกทั้งสามชนิด พบว่า ไข่ฝามีความสามารถในการเกิดอิมัลชันสูงที่สุดที่ร้อยละ 68.50 ในขณะที่ดักแด้ไหมและจิ้งหรีดบ้านมีค่าต่ำกว่าที่ร้อยละ 26.25 และ 16.40 ตามลำดับ แต่เมื่อทดสอบความคงตัวของอิมัลชันในช่วงเวลาต่าง ๆ (10 30 และ 60 นาที) เมื่อที่เวลา 60 นาที พบว่า ดักแด้ไหมมีความคงตัวของอิมัลชันที่สูงที่สุด (ร้อยละ 92.71) ขณะที่จิ้งหรีดบ้านและไข่ฝามีความคงตัวที่น้อยกว่า ประมาณร้อยละ 83.33 และ 80.14 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าดักแด้ไหมเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความคงตัวของอิมัลชันในระยะยาว เช่น ผลิตภัณฑ์ที่มีครีมหรือน้ำมันเป็นผสม เป็นต้น

ตารางที่ 11 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก

สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมัน	โปรตีนทางเลือก		
	ดักแด้ไหม	จิ้งหรีดบ้าน	ไข่ฝำ
ความสามารถในการอ้วนน้ำ (กรัม/กรัม)	8.01±0.40 ^c	8.27±0.53 ^b	25.46±0.62 ^a
ความสามารถในการอ้วนน้ำมัน (กรัม/กรัม)	15.83±1.29 ^b	11.61±1.02 ^c	22.87±1.79 ^a
ความสามารถในการเกิดโฟม (ร้อยละ)	5.77±0.51 ^c	6.25±0.33 ^b	11.86±0.36 ^a
ความคงตัวของโฟม (ร้อยละ)	10 นาที ^{ns}	99.05±1.22	97.11±0.77
	30 นาที ^{ns}	98.08±1.40	96.15±1.22
	60 นาที ^{ns}	96.30±1.94	94.55±2.54
ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน (ร้อยละ)	26.25±1.14 ^b	16.40±0.63 ^c	68.50±4.67 ^a
ความคงตัวของอิมัลชัน (ร้อยละ)	10 นาที	99.81±0.63 ^a	96.90±0.47 ^b
	30 นาที	97.86±0.44 ^a	90.90±0.73 ^b
	60 นาที	92.71±1.09 ^a	83.33±1.14 ^b

หมายเหตุ : ตัวเลขที่แสดงคือค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) ^{a,b,c} หมายถึง อักษรกำกับในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และ ^{ns} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากการศึกษาคุณภาพทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือกทั้งสามชนิด พบว่าดักแด้ใหม่มีจุดเด่นด้านปริมาณไขมันและกรดอะมิโนที่สูงที่สุด พร้อมทั้งมีส่วนกรดไขมันที่เหมาะสมและจำเป็นต่อร่างกาย นอกจากนี้ยังมีสมบัติด้านการอุ้มน้ำและความคงตัวของอิมัลชันที่สูง ทำให้เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบ จึงเห็ดบ้านมีปริมาณโปรตีนรวมสูงที่สุด เหมาะสำหรับการเสริมโปรตีนในอาหาร ขณะที่ไข่แม่จะมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่น่าสนใจ แต่ปริมาณโปรตีน ไขมัน และกรดอะมิโนต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทั้งหมดในภาพรวม ดักแด้ใหม่มีศักยภาพสูงสุดสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนและไขมันที่เหมาะสม พร้อมทั้งมีกรดอะมิโนและกรดไขมันจำเป็น รวมถึงสมบัติทางอิมัลชันที่ดี จึงเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก

4.2 ผลการศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก

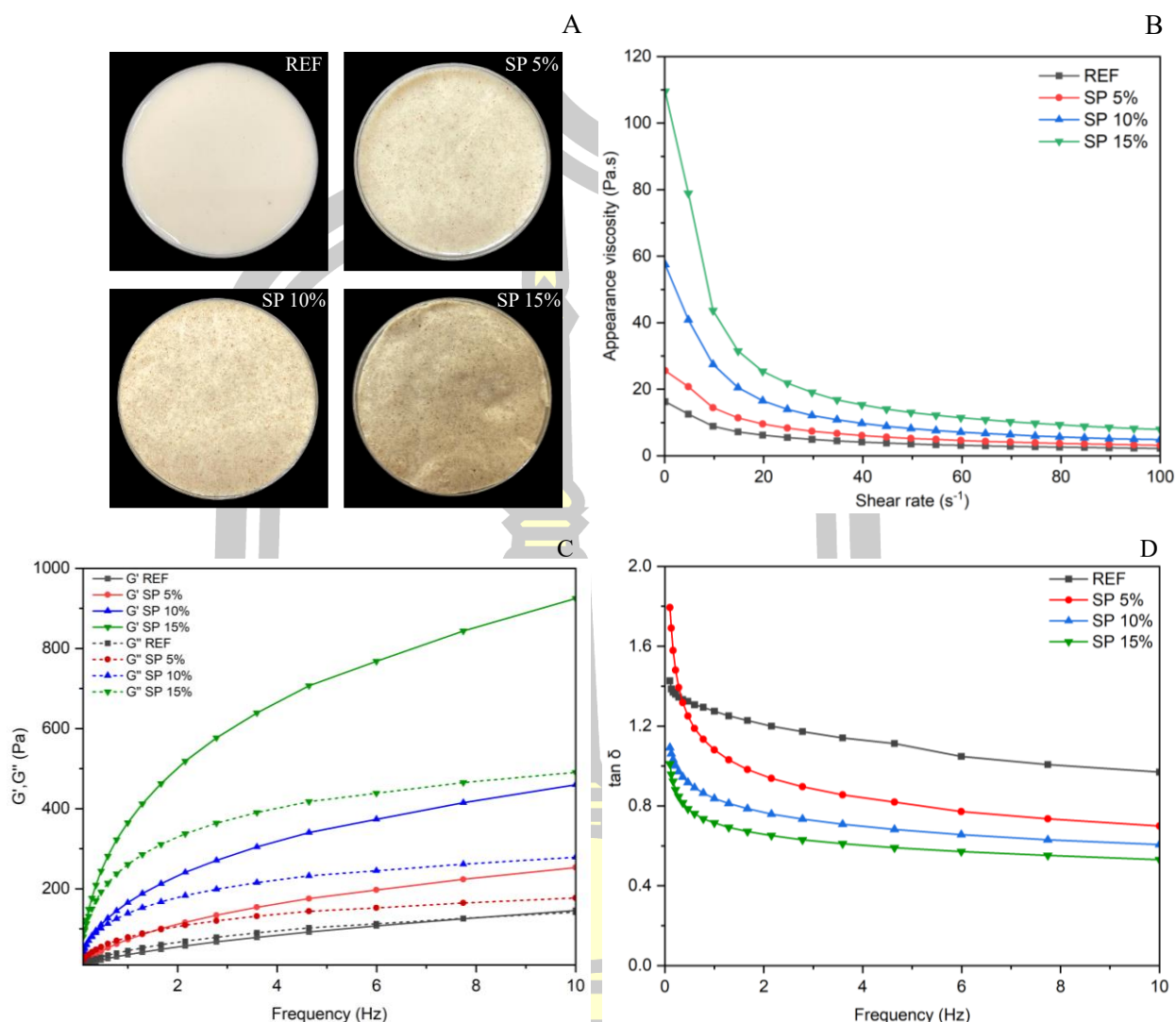
จากการคัดเลือกโปรตีนทางเลือกที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 โดยดักแด้ใหม่เป็นโปรตีนที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก โดยในการศึกษานี้จะศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก คือ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่ด้วยเทคนิคการแช่แข็ง โดยใช้สูตรอ้างอิงและดัดแปลงสูตรจาก Nakagawa et al. (2024) และผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ โดยมีทั้งหมด 4 สูตร คือ REF (สูตรอ้างอิง) และสูตรที่เติมดักแด้ใหม่ร้อยละ 5-15 (SP 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ) จากนั้นศึกษาคุณภาพทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณกรดอะมิโน และการยอมรับทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภค ดังรายละเอียดข้อที่ 4.2.1-4.2.4 และคัดเลือกสูตรที่ผู้บริโภคในการยอมรับมากที่สุดมาศึกษาอายุการเก็บรักษาต่อไป

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีของส่วนผสมผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่ด้วยเทคนิคการแช่แข็ง

ในระหว่างกระบวนการผสมเนื้อเทียมจะเกิดขึ้นก่อนการแช่แข็ง และวัตถุดิบที่มีโปรตีนสูงจะต้องได้รับความเค้นเชิงกล ความเครียดเหล่านี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโปรตีนซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางรีโอโลยี (Wittek et al., 2021) คุณสมบัติทางการไหลจึงไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือนเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความถี่ในการหมุนด้วย ดังนั้นการวาดความถี่ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปด้วย โดยการพัฒนาของความหนืดจะแตกต่างกันไปตามความถี่ สังเกตความแตกต่างที่ชัดเจนในช่วงเวลาเหล่านี้ระหว่างวัตถุดิบ จากการศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของส่วนผสมของเหลวกับของแข็ง

ของผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากผักแต้ใหม่ แสดงดังภาพที่ 13 พบว่า ลักษณะความหนืดที่ปรากฏลดลงเมื่ออัตราเขื่อนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการไหลแบบของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) ประเภท pseudoplastic เนื่องจากแสดงลักษณะของความหนืดที่ลดลงเมื่ออัตราเขื่อนเพิ่มขึ้น โดยสูตร SP 15% แสดงลักษณะความหนืดที่ปรากฏสูงที่สุด รองลงมาคือสูตร SP 10%, 5% และ REF ตามลำดับ (ภาพที่ 13B) ซึ่งลักษณะความหนืดดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Nakagawa et al. (2024) ที่รายงานว่าเมื่อเติมผงจิ้งหรีดและแป้งข้าวในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมแสดงพฤติกรรมการไหลที่ความหนืดลดลงเมื่ออัตราเขื่อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การทดแทนโปรตีนถั่วเหลืองด้วยผงจิ้งหรีดและแป้งข้าวเจ้าที่ความเข้มข้นสูงและส่งผลให้ความหนืดลดลงเมื่อความเค้นเขื่อนเพิ่มขึ้น

การศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกแบบการทดสอบเขื่อนเป็นรอบของวัสดุวิสโคอิลาสติกโดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ โมดูลัสสะสม (storage modulus, G') โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus, G'') และแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$) ซึ่งค่า G' หมายถึง ปริมาณพลังงานที่วัสดุสะสมไว้ หรือได้รับกลับคืนมาต่อหนึ่งรอบของการเสียสภาพแบบสั่น ซึ่งบ่งบอกถึงองค์ประกอบที่แสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นในวัสดุ ค่า G'' หมายถึง พลังงานที่สูญเสียในรูปของการกระจายพลังงานต่อหนึ่งรอบของการเสียสภาพแบบการสั่น ซึ่งบ่งบอกถึงส่วนประกอบที่เป็นของไหลหนืดในวัสดุ ดังนั้นถ้าค่า $\tan \delta > 1$ หมายถึง วัสดุนั้นมีความไหลหนืดมากกว่าความยืดหยุ่น และ $\tan \delta < 1$ หมายถึง วัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นมากกว่าความไหลหนืด การทดสอบเขื่อนเป็นรอบด้วยการกวาดความถี่ (ปาริดา จันทรสว่าง, 2020) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 13C-D แสดงกราฟความถี่กับค่า G' และ G'' พบว่า คุณสมบัติทางรีโอโลยีของเนื้อเทียมจากสูตรอ้างอิง (REF) แสดงค่าที่ต่ำที่สุด ลักษณะกราฟมีพฤติกรรม $G'' > G'$ มีความเป็นวิสโคอิลาสติกคล้ายของไหล (Fluid-like) ในขณะที่เนื้อเทียมจากผักแต้ใหม่มีค่าที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณผักแต้ใหม่ที่เพิ่มขึ้นและมีค่า $G' > G''$ ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ ซึ่งเป็นลักษณะของตัวอย่างที่มีความยืดหยุ่น และแข็งแรงหรือลักษณะคล้ายเจล (Gel-like) ดังภาพที่ 13C ในทำนองเดียวกันค่า $\tan \delta$ ดังภาพที่ 13D ลดลงเมื่อปริมาณของผักแต้ใหม่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณความถี่สูงขึ้นพบว่าค่า $\tan \delta < 1$ หมายถึง วัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นมากกว่าความไหลหนืด (Stieger, 2002) ดังนั้น ปริมาณผักแต้ใหม่ที่สูงขึ้นส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างของโปรตีน ทำให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นและบ่งชี้ว่าระบบอิมัลชันเสถียรมากขึ้น การศึกษาคุณสมบัติเชิงรีโอโลยีช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสและโครงสร้างของเนื้อเทียมให้ใกล้เคียงกับเนื้อสัตว์จริง ช่วยเพิ่มคุณภาพและความพึงพอใจของผู้บริโภค รวมถึงปรับกระบวนการผลิตให้เหมาะสมยิ่งขึ้น



ภาพที่ 13 ลักษณะปรากฏของผสมของเหลวกับของแข็งก่อนการแช่แข็ง (A), ลักษณะความหนืดที่ปรากฏ (B) โมดูลัสสะสม (G') และโมดูลัสสูญเสีย (G'') (C) และแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \delta = G''/G'$) (D) ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต้ใหม่

4.2.2 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และเคมี ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต้ใหม่

จากการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต้ใหม่ ได้แก่ ค่าสี ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ ปริมาณซัลไฟดริลทั้งหมด ลักษณะเนื้อสัมผัส และโครงสร้างภายใน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 12 และภาพที่ 14 พบว่า ปริมาณผักแต้ใหม่ที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 5-15) ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อระดับผักแต้ใหม่

(SP) เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การค้นพบนี้สอดคล้องกับรายงานของ Karnjanapratum et al. (2022) ที่ได้ศึกษาการเสริมดักแด้ใหม่ในผลิตภัณฑ์สเปรดจากเนื้อไก่ พบว่าระดับดักแด้ใหม่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่าสีที่เข้มข้น และทำให้ค่าความสว่างมีลดลงอย่างเห็นได้ชัด ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ พบว่า เมื่อระดับของดักแด้ใหม่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 32-56 ซึ่งการลดลงนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณของไขมันและโปรตีนที่สูงในดักแด้ใหม่ ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและโปรตีนที่รุนแรงจึงทำให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและส่งผลต่อความแข็งของเนื้อสัมผัสด้วย (Wang et al., 2017)

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของดักแด้ใหม่ยังส่งผลต่อปริมาณซัลไฮดริลทั้งหมดซึ่งเป็นองค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญในโปรตีนหลายชนิด ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน (Lin et al., 2020; Zhang et al., 2022) การเพิ่มขึ้นของดักแด้ใหม่ส่งผลทำให้ปริมาณซัลไฮดริลทั้งหมดลดลง โดยสูตร SP 5% ปริมาณสูงที่สุด รองลงมาคือ สูตร REF, SP 10% และ 15% ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้จะสอดคล้องกับปริมาณกรดอะมิโนที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์ (เมไทโอนีนและซิสเทอีน) โดยในดักแด้ใหม่ (ตารางที่ 9) มีปริมาณเมไทโอนีนและซิสเทอีนรวมกันสูง (2.4 กรัม/100 กรัม) ซึ่งสูงกว่าปริมาณที่พบในโปรตีนถั่วเหลืองที่มีเมไทโอนีนและซิสเทอีนรวมกันเท่ากับ 0.98 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง (Nizkii et al., 2020) แต่เมื่อเติมผงโปรตีนในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่เสริมด้วยดักแด้ใหม่จะมีปริมาณซัลไฮดริลทั้งหมดสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ความแปรปรวนในประสิทธิภาพในการคืนสภาพของกลุ่มซัลไฮดริลอาจเกิดจากความแตกต่างในด้านแหล่งโปรตีน โครงสร้างโปรตีน และระดับการรวมตัวที่เสถียรด้วยพันธะไดซัลไฟด์ จึงทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันออกไป (Benjakul et al., 2005) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่มีความสำคัญมากที่สุดของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม เนื่องจากเป็นตัวกำหนดคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค (Sha & Xiong, 2020; Xia et al., 2022) ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่ แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า ปริมาณดักแด้ใหม่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยสูตร SP 15% แสดงลักษณะเนื้อสัมผัสทุกลักษณะสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) รองลงมาคือสูตร SP 10% 5% และ REF ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของดักแด้ใหม่นี้ส่งผลทำ

ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสมีความแน่นขึ้นซึ่งอาจเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและโปรตีนที่รุนแรง จึงทำให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและส่งผลต่อความแข็งแรงของเนื้อสัมผัส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. (2016) ที่ศึกษาเพิ่มดักแด้ใหม่ในผลิตภัณฑ์อิมัลชันเนื้อวัวสามารถช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสได้เป็นอย่างมาก โดยเพิ่มความแข็ง ความเหนียว และความเคี้ยวได้ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าเหล่านี้จะส่งผลต่อลักษณะปรากฏ โครงสร้างเส้นใยภายใน และการยอมรับของผู้บริโภคที่แตกต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างเส้นใยภายในของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 14 โดยในการศึกษานี้ค้นพบสิ่งที่น่าสนใจคือเมื่อปริมาณดักแด้ใหม่เพิ่มขึ้นแสดงลักษณะโครงสร้างของเส้นใยภายในที่แน่นขึ้น โดยสูตร SP 5% มีลักษณะคล้ายเส้นใยที่โดดเด่น โครงสร้างเส้นใยภายในมีลักษณะคล้ายคลึงกับกล้ามเนื้อสัตว์ โดยซ้อนทับกันเหมือนเป็นแผ่นหลายชั้น (Grahl et al., 2018) การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในนี้เป็นผลมาจากปริมาณโปรตีนที่สูงขึ้นส่งผลทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำกับโปรตีน และโปรตีนกับโปรตีน ความแข็งแรงในการยึดเกาะกับน้ำของแต่ละสูตรหรือปริมาณน้ำที่สามารถแช่แข็งได้มีผลกระทบสำคัญต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมที่เรียงตัวกันในระหว่างการแช่แข็ง การศึกษานี้ให้ความกระจ่างว่าความแข็งแรงในการจับตัวกับน้ำและคุณลักษณะทางรีโอโลยีของเจลที่ได้เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ปริมาณไขมันที่สูงของดักแด้ใหม่อาจลดความสามารถในการละลายของโปรตีน ซึ่งจะลดลงอีกเมื่อความเข้มข้นของดักแด้ใหม่เพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เส้นใยที่แตกต่างกัน โปรตีนควรมีความสามารถในการละลายได้ค่อนข้างดีก่อนที่จะแช่แข็ง เนื่องจากโปรตีนเหล่านี้จะไม่ละลายในระหว่างกระบวนการแช่แข็ง (Dekkers et al., 2018)

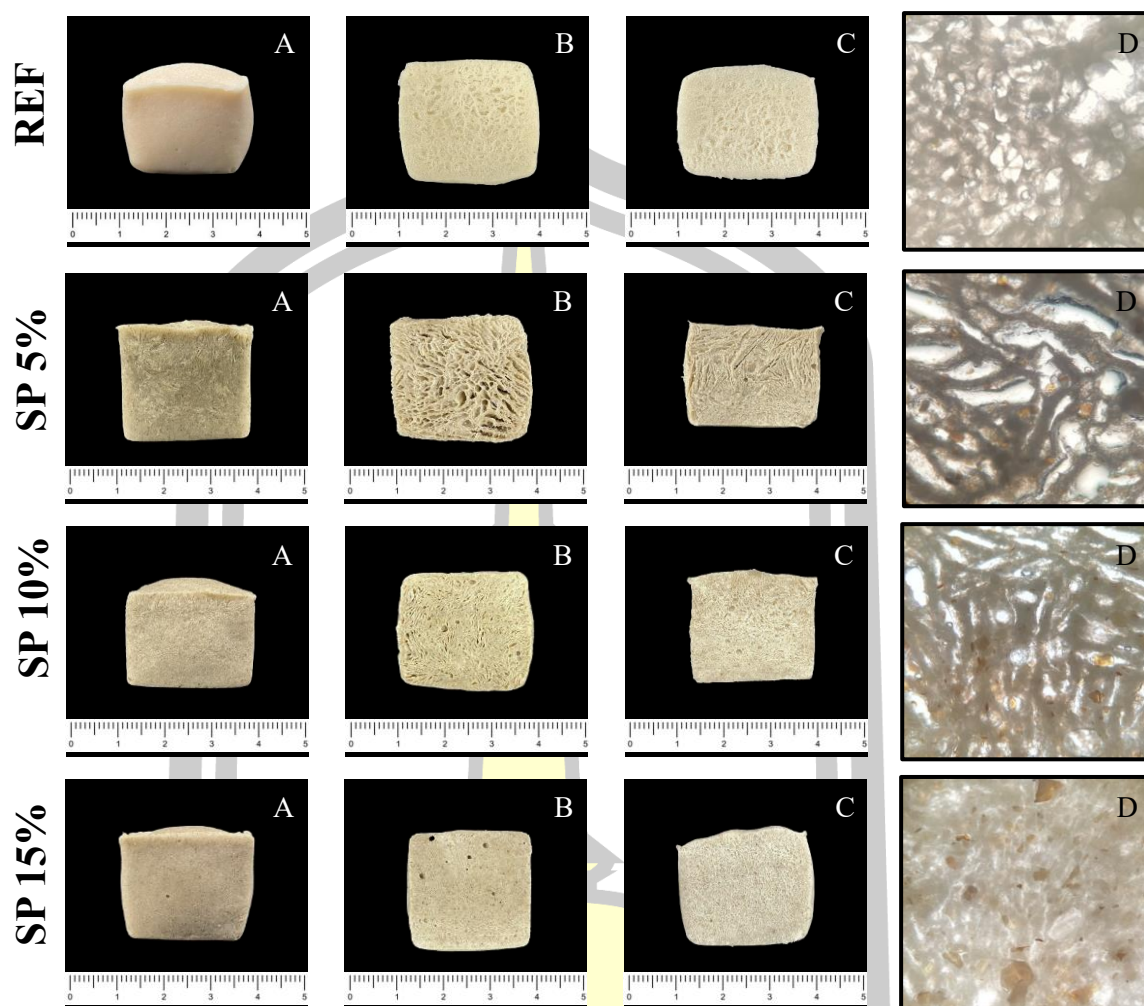


ตารางที่ 12 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่

Parameter	ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่			
	REF*	SP 5%	SP 10%	SP 15%
ค่าสี L^*	74.64±0.12 ^a	63.20±0.13 ^b	58.52±0.12 ^c	56.24±0.10 ^d
a^*	1.18±0.03 ^d	1.76±0.12 ^c	2.17±0.11 ^b	2.48±0.18 ^a
b^*	16.74±0.04 ^d	17.15±0.03 ^c	18.56±0.24 ^b	19.54±0.09 ^a
WHC (ร้อยละ)	50.64±2.48 ^b	56.09±0.20 ^a	41.84±1.07 ^c	32.00±1.53 ^d
TSH (μmol/g)	3.04±0.17 ^b	3.92±0.35 ^a	2.82±0.07 ^c	2.66±0.16 ^c
ค่าความแน่นเนื้อ (N)	32.01±0.47 ^d	34.75±0.63 ^c	45.49±3.64 ^b	52.27±3.46 ^a
ค่าความแข็ง (N)	21.05±0.59 ^d	22.90±0.91 ^c	25.46±0.98 ^b	28.49±1.08 ^a
ค่าการเกาะติด	0.18±0.01 ^c	0.19±0.03 ^c	0.24±0.02 ^b	0.36±0.02 ^a
ค่าการยืดติด (N.sec)	-1.64±0.02 ^a	-1.65±0.06 ^a	-3.82±0.06 ^b	-6.61±0.18 ^c
ค่าความยืดหยุ่น (ร้อยละ)	22.49±0.23 ^c	23.79±0.65 ^c	50.25±1.05 ^b	60.73±3.20 ^a
ค่าความเคี้ยวได้ (N)	85.74±5.05 ^d	97.58±1.22 ^c	300.25±16.95 ^b	617.08±59.51 ^a

หมายเหตุ: *สูตรอ้างอิงดัดแปลงสูตรจาก Nakagawa et al. (2024) ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) WHC คือ ความสามารถในการอุ้มน้ำ TSH คือ ปริมาณซัลไฮดริลทั้งหมด a,b,c,... หมายถึง อักษรกำกับที่ต่างกันในแต่ละแถวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)





ภาพที่ 14 ลักษณะปรากฏและโครงสร้างเส้นใยภายในของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่ โดยภาพ A-D คือ ภาพถ่ายด้านข้าง ภาพตัดขวาง ภาพตัดตามยาว และภาพโครงสร้างเส้นใยภายใน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 4 เท่า (4x) ตามลำดับ

4.2.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณกรดอะมิโนของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่

4.2.3.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่

คุณภาพของเนื้อเทียมขึ้นอยู่กับคุณค่าทางโภชนาการของวัตถุดิบ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่สูง จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่ แสดงดังตารางที่ 13 พบว่า การเติมดักแด้ใหม่ที่มีความเข้มข้นที่สูงขึ้น (ร้อยละ 5-15) ส่งผลให้ปริมาณกรด ไขมัน

และโปรตีนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณความชื้นและคาร์โบไฮเดรตลดลง ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่มีปริมาณไขมันและโปรตีนสูงที่สุดคือสูตรที่เติมดักแด้ใหม่ร้อยละ 15 (SP 15%) รองลงมาคือ SP 10%, 5% และ REF ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณไขมันอยู่ในช่วง 49.91-58.76 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง และมีปริมาณโปรตีน 16.37-25.48 กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง นั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณดักแด้ใหม่ส่งผลให้มีปริมาณสารอาหารที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากดักแด้มีปริมาณของโปรตีนและไขมันที่สูง เมื่อนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจึงทำให้มีปริมาณสารอาหารที่เพิ่มขึ้น การเติมดักแด้ใหม่ส่งผลให้มีปริมาณความชื้นลดลงซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายก่อนหน้านี้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Cavalheiro et al. (2023) ที่มีการเติมจึงหริตผลงในไส้กรอกเยอรมันส่งผลให้ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความชื้นลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนและไขมันในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมนี้ ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพทางกายภาพ และโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่อีกด้วย

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่

องค์ประกอบทางเคมี	ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่			
	REF*	SP 5%	SP 10%	SP 15%
ความชื้น (กรัม/100 กรัม น้ำหนักเปียก)	69.59±0.15 ^c	74.30±0.14 ^a	70.87±0.82 ^b	68.03±0.86 ^d
เถ้า (กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)	6.70±0.25 ^a	4.56±0.23 ^c	5.11±0.64 ^b	6.56±0.53 ^a
ไขมัน (กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)	49.91±1.53 ^c	54.69±2.14 ^b	56.88±0.99 ^{ab}	58.76±1.84 ^a
โปรตีน (กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)	16.37±0.33 ^d	17.17±0.02 ^c	21.00±0.04 ^b	25.48±0.20 ^a
ใยอาหาร (กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ^{ns}	6.34±0.39	5.85±0.55	5.96±0.51	6.13±0.19
คาร์โบไฮเดรต (กรัม/100 กรัม น้ำหนักแห้ง)	20.68±1.77 ^a	17.73±1.11 ^b	11.05±0.67 ^c	3.07±0.13 ^d

หมายเหตุ: *สูตรอ้างอิงดัดแปลงสูตรจาก Nakagawa et al. (2024) ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) ^{a,b,c,...} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และ ^{ns} หมายถึง อักษรกำกับในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.2.3.2 ผลการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกแต่ใหม่

จากการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกแต่ใหม่เปรียบเทียบกับปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นแนะนำต่อวัน โดยค้นพบกรดอะมิโนจากธรรมชาติทั้งหมด 18 ชนิด แสดงดังตารางที่ 14 โดยการผสมผักดกแต่ใหม่ในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมส่งผลทำให้ปริมาณกรดอะมิโนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกแต่ใหม่แสดงลักษณะพิเศษคือมีปริมาณโปรตีนสูง โดยสูตร SP 15% มีปริมาณกรดอะมิโนสูงถึง 50 กรัม/100 กรัมแห้ง ซึ่งสูงกว่าปริมาณกรดอะมิโนที่พบในสูตร REF หรือสูตรอ้างอิงถึงร้อยละ 50 รองลงมาคือสูตร SP 10%, 5% และ REF ตามลำดับ ซึ่งปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นในสูตร SP 15% คิดเป็นร้อยละ 48 ของปริมาณกรดอะมิโนทั้งหมด ในบรรดากรดอะมิโนที่จำเป็นเหล่านี้ ฟีนิลอะลานีนและไทโรซีน (AAA) มีอยู่ในระดับที่สูงกว่าคำแนะนำของ FAO สำหรับผู้ใหญ่ (WHO/FAO/UNU, 2017) ในทำนองเดียวกัน ดัชนีกรดอะมิโนที่จำเป็น (EAAI) ของ SP 15% นั้นสูงที่สุด ซึ่งมากกว่าสูตร REF ถึง 2.3 เท่า นอกจากนี้จะเป็นส่วนประกอบทางโภชนาการที่สำคัญในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมแล้ว กรดอะมิโนยังช่วยเพิ่มรสชาติของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ได้อย่างมาก (Cavalheiro et al., 2023; Sforza et al., 2006) อย่างไรก็ตาม กรดอะมิโนและเปปไทด์จากโปรตีนในปริมาณที่มากอาจส่งผลกระทบต่ออาการแพ้ทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค เช่น กรดอะมิโนบางชนิดทำให้เกิดรสขมหรือรสหวานที่แตกต่างกันออกไปได้ (Drake et al., 2008)

4.2.4 ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกแต่ใหม่

จากผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกแต่ใหม่ทั้งหมด 5 คุณลักษณะ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมจากผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนทั้งหมด 30 คน ดังตารางที่ 15 พบว่า คุณลักษณะทั้งหมดที่ทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตร REF หรือสูตรอ้างอิง ได้รับการยอมรับในคุณลักษณะทั้งหมดมากที่สุด ในขณะที่สูตร SP 5% มีคุณลักษณะด้านกลิ่นรส และเนื้อสัมผัส ที่สูงที่สุดและไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม โดยสูตร SP 10% ได้รับคะแนนความชอบในด้านเนื้อสัมผัส ไม่แตกต่างจากสูตร REF และ SP 5% ในขณะที่สูตร SP 15% ได้รับคะแนนการยอมรับในคุณลักษณะทั้งหมดน้อยที่สุด นั้นแสดงให้เห็นว่าการเสริมผักดกแต่ใหม่ในผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมในปริมาณที่มากส่งผลทำให้คะแนนการยอมรับของผู้บริโภคน้อย เนื่องจากผักดกแต่ใหม่มีกลิ่นที่เฉพาะ ทำให้ผู้บริโภคให้คะแนนการยอมรับที่น้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่เติมผักดกแต่ใหม่ร้อยละ 5

ตารางที่ 14 ปริมาณกรดอะมิโนของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกแต่ใหม่ เทียบกับกรดอะมิโนที่แนะนำสำหรับผู้ใหญ่จาก WHO/FAO/UNU

กรดอะมิโน (AAs; กรัม/100 กรัม น้ำหนัก แห้ง)	ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกแต่ใหม่				กรดอะมิโนที่แนะนำ สำหรับผู้ใหญ่ (WHO/FAO/UNU, 2017)
	REF	SP 5%	SP 10%	SP 15%	
Essential amino acids (EAAs)					
Arginine	2.62±0.04 ^c	2.47±0.07 ^d	3.79±0.09 ^b	4.62±0.15 ^a	-
Histidine	0.84±0.01 ^d	0.98±0.00 ^c	1.30±0.01 ^b	1.57±0.01 ^a	1.5
Isoleucine	1.78±0.03 ^d	2.03±0.04 ^c	2.91±0.06 ^b	3.13±0.09 ^a	3.0
Leucine	1.60±0.05 ^d	1.72±0.02 ^c	2.48±0.06 ^b	2.65±0.02 ^a	5.9
Lysine	1.00±0.02 ^d	1.38±0.03 ^c	2.19±0.01 ^b	2.64±0.01 ^a	4.5
Methionine	0.40±0.01 ^d	0.99±0.00 ^c	1.57±0.02 ^b	1.90±0.02 ^a	2.2
Phenylalanine	1.98±0.04 ^d	2.31±0.06 ^c	3.86±0.03 ^b	4.06±0.03 ^a	3.8
Threonine	0.72±0.03 ^d	0.99±0.02 ^c	1.29±0.10 ^b	1.63±0.04 ^a	2.3
Tryptophan	1.67±0.02 ^c	1.64±0.03 ^c	2.24±0.13 ^b	2.86±0.19 ^a	2.3
Valine	0.73±0.03 ^d	1.08±0.02 ^c	1.36±0.05 ^b	1.59±0.02 ^a	3.9
ΣEAAs	13.33±0.18 ^d	15.59±0.15 ^c	22.28±0.20 ^b	26.64±0.31 ^a	
EAAI	0.47±0.01 ^d	0.59±0.00 ^c	0.84±0.01 ^b	0.98±0.01 ^a	
Non-Essential amino acids (NEAAs)					
Alanine	0.76±0.02 ^d	1.01±0.04 ^c	1.22±0.04 ^b	1.52±0.02 ^a	
Asparagine	1.49±0.04 ^a	0.82±0.01 ^d	1.10±0.04 ^c	1.34±0.03 ^b	
Aspartic acid	2.62±0.04 ^d	2.87±0.02 ^c	3.85±0.02 ^b	4.69±0.03 ^a	
Cysteine	0.05±0.00 ^c	0.08±0.01 ^b	0.09±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a	
Glutamine	0.91±0.01 ^d	1.26±0.03 ^c	1.95±0.07 ^b	2.42±0.03 ^a	
Glutamic acid	4.24±0.13 ^b	2.87±0.17 ^d	3.81±0.26 ^c	4.95±0.05 ^a	
Glycine	0.75±0.01 ^b	0.88±0.01 ^c	1.12±0.04 ^b	1.41±0.03 ^a	
Proline	0.85±0.03 ^c	0.80±0.01 ^c	1.03±0.02 ^b	1.25±0.05 ^a	
Serine	1.16±0.02 ^c	1.19±0.01 ^c	1.48±0.02 ^b	1.83±0.02 ^a	
Tyrosine	2.31±0.03 ^d	4.33±0.10 ^c	6.67±0.18 ^b	7.76±0.19 ^a	
ΣNEAAs	15.17±0.11 ^d	16.13±0.20 ^c	22.35±0.53 ^b	27.31±0.17 ^a	
ΣAAs	28.50±0.08 ^d	31.72±0.31 ^c	44.63±0.71 ^b	53.96±0.46 ^a	

หมายเหตุ: *สูตรอ้างอิงดัดแปลงสูตรจาก Nakagawa et al. (2024) ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) ND คือ Not detect, ^{a,b,c,...} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่

ผลิตภัณฑ์เนื้อ เทียมจาก ผักแต่ใหม่	คุณลักษณะ (n=30)				
	ลักษณะ ปรากฏ	สี	กลิ่นรส	เนื้อสัมผัส	ความชอบ โดยรวม
REF*	7.25±1.37 ^a	7.35±1.42 ^a	6.15±1.84 ^a	6.59±1.34 ^a	7.10±1.29 ^a
SP 5%	6.35±1.31 ^b	6.00±1.47 ^b	5.40±1.76 ^{ab}	6.47±1.20 ^a	6.15±1.27 ^b
SP 10%	5.95±1.43 ^b	5.45±1.39 ^b	5.10±1.80 ^b	6.01±1.13 ^{ab}	5.85±1.04 ^b
SP 15%	5.95±1.67 ^b	5.60±1.39 ^b	5.15±1.69 ^b	5.44±1.37 ^b	5.80±1.24 ^b

หมายเหตุ: *สูตรอ้างอิงดัดแปลงสูตรจาก Nakagawa et al. (2024) ตัวเลขที่แสดงคือค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) และ ^{a,b} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก คือ ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่ทั้งหมด 4 สูตร เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพทางกายภาพ เคมี องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณกรดอะมิโน และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค พบว่า สูตรที่ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุดและใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง คือสูตรที่เติมผักแต่ใหม่ร้อยละ 5 (SP 5%) โดยได้รับการยอมรับด้านกลิ่นรส และเนื้อสัมผัสไม่ต่างจากสูตรอ้างอิง (REF) ถึงแม้การเติมผักแต่ใหม่ในปริมาณที่สูงจะมีคุณค่าทางโภชนาการที่มากแต่การยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคน้อย ดังนั้น จึงคัดเลือกสูตร SP 5% ที่ได้รับคะแนนการยอมรับจากผู้บริโภคมากที่สุดนำมาศึกษาอายุการเก็บรักษา (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) ต่อไป

4.3 ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่ (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย)

จากการศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่ โดยสูตรที่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากที่สุดคือสูตร SP 5% จากนั้นนำสูตรดังกล่าวมาทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตลอดอายุการเก็บรักษา โดยเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพทุก 7 วัน (วันที่ 0, 7, 14, 21 และ 28) โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมี ได้แก่ ค่าสี ค่า pH ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ และลักษณะเนื้อสัมผัส ตลอดจนวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ ดังรายละเอียดข้อที่ 4.3.1-4.3.2

4.3.1 ผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีตลอดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกใหม่ (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย)

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกใหม่ตลอดอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน ได้แก่ ค่าสี ค่าความเป็นกรดต่าง ความสามารถในการอุ้มน้ำ และลักษณะเนื้อสัมผัส แสดงดังตารางที่ 16 พบว่า ระยะเวลาในการเก็บรักษาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีที่แตกต่างกัน โดยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าสี (L^* และ b^*) ทำให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) การเปลี่ยนแปลงของค่าสีนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันหรือโปรตีน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันกับกรดอะมิโนอิสระในโปรตีนได้ และเกิดการเสื่อมสภาพของสีธรรมชาติ (Wasowicz et al., n.d.) ปฏิกิริยาดังกล่าวจึงส่งผลให้ค่าสีของผลิตภัณฑ์อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทำให้ผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลและสีจางลง

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ ระหว่างการเก็บรักษาเป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม พบว่า ระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกใหม่ส่งผลให้ค่า pH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณจุลินทรีย์ในวันที่ 14 (ตารางที่ 16) การที่ค่า pH ลดลงเป็นอาจเป็นผลมาจากการผลิตกรดของจุลินทรีย์จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่า pH ที่ลดลงเล็กน้อยในช่วงแรกเนื่องจากการหมักหรือปฏิกิริยากับแบคทีเรีย แต่ต่อมาอาจเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการเน่าเสียหรือการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลต่อค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC) ส่งผลทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ($p \leq 0.05$) อาจเป็นผลมาจากโครงสร้างโปรตีนอาจเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำออกจากเนื้อสัมผัส การสูญเสียน้ำออกจากผลิตภัณฑ์นี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสทำให้มีความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นได้

การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดกใหม่ตลอดอายุการเก็บรักษา พบว่า การเก็บรักษาส่งผลต่อค่าความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น ค่าความยืดหยุ่นและความสามารถในการเคี้ยวได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าความแข็ง ค่าการเกาะติด และค่าการยึดติด ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลมาจากการลดลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ

น้ำ เนื่องจากเกิดการเสียสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษา จึงทำให้เกิดการแน่นเนื้อที่เพิ่มขึ้นรวมถึงยังมีค่าความยืดหยุ่นที่ลดลง อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาเนื้อเทียมจากผักดัดใหม่ในสภาวะและบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจะสามารถรักษาคุณภาพคุณค่าทางโภชนาการ และยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้

ตารางที่ 16 ผลการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดัดใหม่ (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) ตลอดอายุการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส

Parameter	ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)				
	0	7	14	21	28
ค่าสี L^*	63.27 ± 0.13^a	63.31 ± 0.59^a	63.20 ± 0.39^a	62.14 ± 0.53^b	62.16 ± 0.17^b
a^{*ns}	1.76 ± 0.12	1.70 ± 0.07	1.71 ± 0.09	1.65 ± 0.03	1.66 ± 0.05
b^*	17.15 ± 0.03^a	16.70 ± 0.03^b	16.69 ± 0.07^{bc}	16.53 ± 0.13^c	16.49 ± 0.13^c
pH	6.87 ± 0.03^a	6.86 ± 0.03^a	6.74 ± 0.07^b	5.54 ± 0.09^c	5.33 ± 0.05^d
WHC (ร้อยละ)	56.09 ± 0.20^a	55.35 ± 0.79^a	55.31 ± 0.99^{ab}	53.52 ± 0.67^{bc}	51.54 ± 0.99^c
ค่าความแน่นเนื้อ (N)	34.75 ± 0.63^b	34.83 ± 0.57^b	34.98 ± 0.13^b	36.64 ± 0.55^a	37.88 ± 0.97^a
ค่าความแข็ง (N) ^{ns}	22.90 ± 0.91	22.94 ± 0.33	22.89 ± 0.54	23.67 ± 1.57	23.14 ± 0.79
ค่าการเกาะติด ^{ns}	0.19 ± 0.03	0.18 ± 0.01	0.19 ± 0.00	0.19 ± 0.01	0.20 ± 0.01
ค่าการยืดติด (N.sec) ^{ns}	-1.65 ± 0.06	-1.62 ± 0.11	-1.62 ± 0.09	-1.60 ± 0.07	-1.61 ± 0.13
ค่าความยืดหยุ่น (%)	23.79 ± 0.65^a	23.43 ± 0.21^a	21.98 ± 0.35^b	21.01 ± 0.31^c	20.33 ± 0.55^c
ค่าความเคี้ยวได้ (N)	97.58 ± 1.22^a	96.75 ± 1.17^a	95.46 ± 1.63^{ab}	94.49 ± 0.97^b	94.09 ± 1.38^b

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงคือค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n=3$) ^{a,b,c,...} หมายถึง อักษรกำกับที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และ ^{ns} หมายถึง อักษรกำกับในแถวเดียวกันมีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ตลอดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดัดใหม่ (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย)

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาอาหาร (shelf life) เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตและสร้างสารพิษที่เป็นอันตรายได้เมื่อมีปัจจัยเหมาะสม (Robertson, 2019) จากการศึกษาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดัดใหม่ตลอดอายุการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส โดยศึกษาอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 28 วัน และทำการสุ่มตรวจทุก ๆ 7 วัน แสดงดังตารางที่ 17 ซึ่งพบว่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยวันที่ 0 ถึง 14 พบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด น้อยกว่า 1×10^4 CFU/g ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลูกชิ้นเนื้อวัว ลูกชิ้นหมู และลูกชิ้นไก่ (มอก. 1009-2533) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาวะการเก็บรักษาเป็นสภาวะแบคทีเรียกลุ่ม psychrophiles ที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิแช่เย็นสามารถเจริญเติบโตได้ และมีปริมาณยีสต์และราน้อยกว่า 10 CFU/g นั้นแสดงว่าผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดัดใหม่มีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่เกิน 14 วัน จึงจะปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักดัดใหม่ (ผลิตภัณฑ์สุดท้าย) ตลอดอายุการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (CFU/g)	
	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์และรา
0	< 10	< 10
7	6.12×10^1	< 10
14	3.57×10^2	< 10
21	5.63×10^4	< 10
28	2.59×10^5	< 10

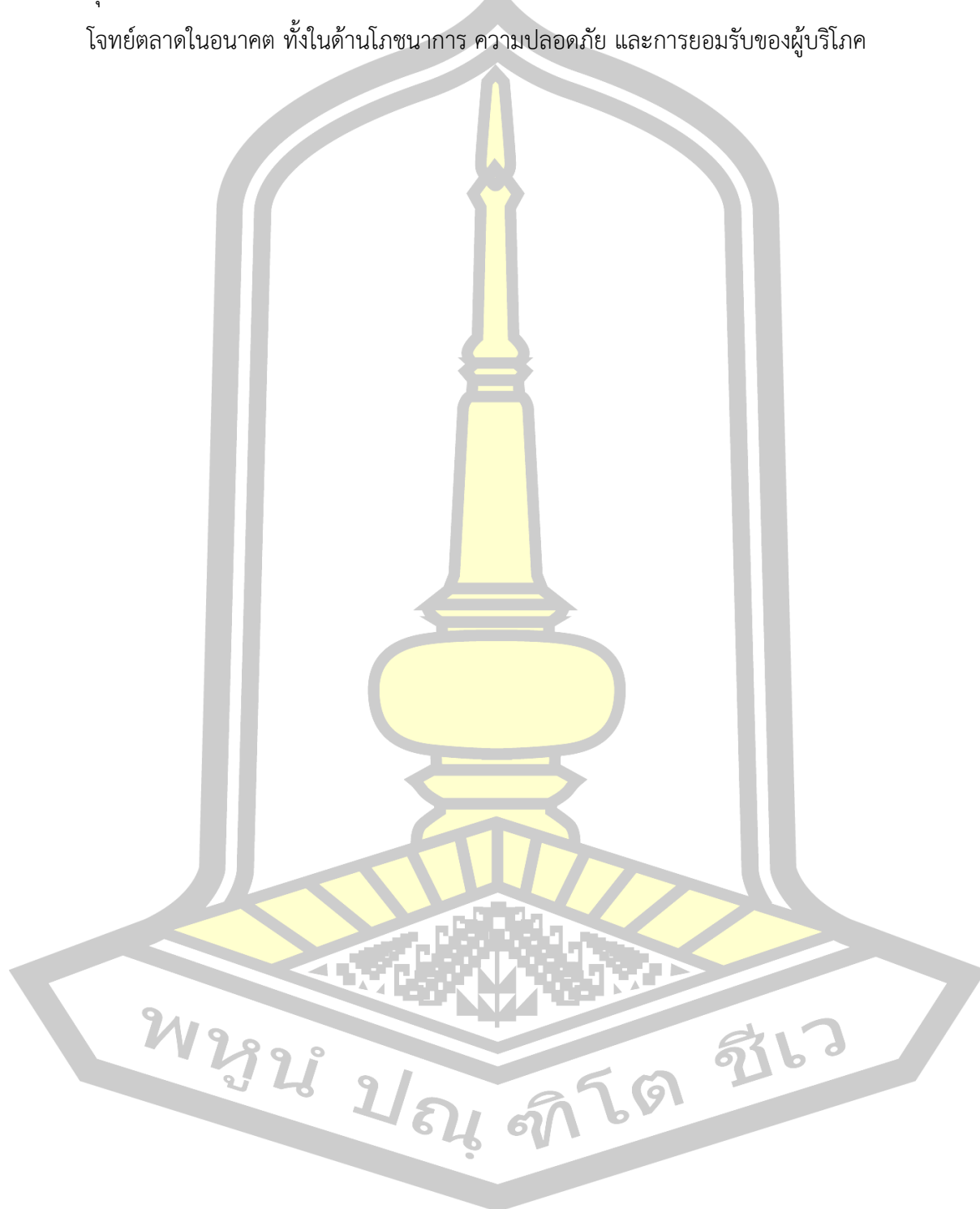
หมายเหตุ : ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^4 CFU/g ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลูกชิ้นเนื้อวัว ลูกชิ้นหมู และลูกชิ้นไก่ (มอก. 1009-2533)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาสมบัติเชิงหน้าของโปรตีนและไขมันจากโปรตีนทางเลือก 3 ชนิด ได้แก่ ดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ผ่า แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในด้านองค์ประกอบทางเคมี กรดอะมิโน กรดไขมัน โดยดักแด้ไหมมีจุดเด่นด้านปริมาณไขมันและกรดอะมิโนที่สูงที่สุด พร้อมทั้งมีสัดส่วนกรดไขมันที่เหมาะสมและจำเป็นต่อร่างกาย นอกจากนี้ยังมีสมบัติด้านการอุ้มน้ำและความคงตัวของอิมัลชันที่สูง ทำให้เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบ จิ้งหรีดบ้านมีปริมาณโปรตีนรวมสูงที่สุด เหมาะสำหรับการเสริมโปรตีนในอาหาร ขณะที่ไข่ผ่าแม้จะมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่น่าสนใจ แต่ปริมาณโปรตีน ไขมัน และกรดอะมิโนต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทั้งหมดในภาพรวม ดักแด้ไหมมีศักยภาพสูงสุดสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนและไขมันที่เหมาะสม พร้อมทั้งมีกรดอะมิโนและกรดไขมันจำเป็น รวมถึงสมบัติทางอิมัลชันที่ดี จึงเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกเมื่อนำดักแด้ไหมมาพัฒนาเป็นอาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก โดยพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหมด้วยเทคนิคการแช่แข็ง ทั้งหมด 4 สูตร คือสูตร REF, SP 5%, SP 10% และ SP 15% (ดักแด้ไหมร้อยละ 5 10 และ 15) การเติมดักแด้ไหมส่งผลต่อสมบัติเชิงรีโอโลยีโดยทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดักแด้ไหมเพิ่มขึ้น รวมถึงการเติมดักแด้ไหมส่งผลทำให้ค่าความสว่างลดลง ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น อีกทั้งสูตร SP 15% มีค่าความแข็งและความแน่นเนื้อสูงสุด นอกจากนี้การเติมดักแด้ไหมยังส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในที่แน่นขึ้น โดยสูตร SP 5% แสดงเส้นใยภายในที่เด่นชัดมากกว่าสูตรอื่น นอกจากนี้การเติมดักแด้ไหมเพิ่มปริมาณโปรตีน ไขมัน และเกลือ แต่ลดความชื้นและคาร์โบไฮเดรต โดยสูตร SP 15% มีค่าทางโภชนาการสูงสุดในทางตรงกันข้าม การเติมดักแด้ไหมในปริมาณที่มากขึ้นทำให้การยอมรับของผู้บริโภคลดลง ซึ่งสูตร SP 5% ได้รับความยอมรับจากผู้บริโภคมากที่สุด ในขณะที่สูตร SP 15% ได้รับความยอมรับจากผู้บริโภคน้อยที่สุด จึงเลือกสูตรที่ SP 5% มาศึกษาอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 28 วัน ซึ่งระยะเวลาในการเก็บรักษาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีทำให้ค่าสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความเป็นกรดต่าง ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง ทำให้เกิดการแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น รวมถึงค่าความยืดหยุ่นที่ลดลง รวมถึงปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก็เพิ่มขึ้น โดยผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหมสามารถเก็บรักษาได้นาน 14 วัน และไม่พบการปนเปื้อนของยีสต์และรา งานวิจัยนี้

แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโปรตีนทางเลือกที่สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันที่มีคุณภาพ ทั้งยังสะท้อนโอกาสในการขยายผลเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนทางเลือกที่ตอบโจทย์ตลาดในอนาคต ทั้งในด้านโภชนาการ ความปลอดภัย และการยอมรับของผู้บริโภค



บรรณานุกรม

- Albert, C. M. (1998). Fish Consumption and Risk of Sudden Cardiac Death. *JAMA*, 279(1), 23. <https://doi.org/10.1001/jama.279.1.23>
- AOAC. (2000). *Official methods of analysis of AOAC international*.
- Appenroth, K.-J. (2010). Definition of “Heavy Metals” and Their Role in Biological Systems. In *Soil Heavy Metals* (Vol. 19, pp. 19–29). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8_2
- Banaszek, A., Townsend, J. R., Bender, D., Vantrease, W. C., Marshall, A. C., & Johnson, K. D. (2019). The Effects of Whey vs. Pea Protein on Physical Adaptations Following 8-Weeks of High-Intensity Functional Training (HIFT): A Pilot Study. *Sports*, 7(1), 12. <https://doi.org/10.3390/sports7010012>
- Barbanti, D., & Pasquini, M. (2005). Influence of cooking conditions on cooking loss and tenderness of raw and marinated chicken breast meat. *LWT - Food Science and Technology*, 38(8), 895–901. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.08.017>
- Benjakul, S., Thongkaew, C., & Visessanguan, W. (2005). Effect of reducing agents on physicochemical properties and gel-forming ability of surimi produced from frozen fish. *European Food Research and Technology*, 220(3–4), 316–321. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-1092-1>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Brogan, E. N., Park, Y.-L., Matak, K. E., & Jacynski, J. (2021). Characterization of protein in cricket (*Acheta domesticus*), locust (*Locusta migratoria*), and silk worm pupae

(*Bombyx mori*) insect powders. *LWT*, 152, 112314. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112314>

Castellani, O., Martinet, V., David-Briand, E., Guérin-Dubiard, C., & Anton, M. (2003). Egg yolk phosvitin: Preparation of metal-free purified protein by fast protein liquid chromatography using aqueous solvents. *Journal of Chromatography B*, 791(1–2), 273–284. [https://doi.org/10.1016/S1570-0232\(03\)00230-7](https://doi.org/10.1016/S1570-0232(03)00230-7)

Cavalheiro, C. P., Ruiz-Capillas, C., Herrero, A. M., Pintado, T., Cruz, T. da M. P., & da Silva, M. C. A. (2023). Cricket (*Acheta domesticus*) flour as meat replacer in frankfurters: Nutritional, technological, structural, and sensory characteristics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 83, 103245. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103245>

Chabanon, G., Chevalot, I., Framboisier, X., Chenu, S., & Marc, I. (2007). Hydrolysis of rapeseed protein isolates: Kinetics, characterization and functional properties of hydrolysates. *Process Biochemistry*, 42(10), 1419–1428. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.07.009>

Chantanuson, R., Nagamine, S., Kobayashi, T., & Nakagawa, K. (2023). Effect of dry heat treatment of soy protein powder on aligned structure formation in soy protein-based food gels during freezing. *Journal of Food Engineering*, 363, 111779. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111779>

Chumroenphat, T., Somboonwatthanakul, I., Saensouk, S., & Siriamornpun, S. (2021). Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods. *Food Chemistry*, 339, 128121. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128121>

Damodaran, S., & Paraf, A. (2017). *Food Proteins and their Applications* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203755617>

- David-Birman, T., Romano, A., Aga, A., Pascoviche, D., Davidovich-Pinhas, M., & Lesmes, U. (2022). Impact of silkworm pupae (*Bombyx mori*) powder on cream foaming, ice cream properties and palatability. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102874. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102874>
- Dekkers, B. L., Boom, R. M., & Van Der Goot, A. J. (2018). Structuring processes for meat analogues. *Trends in Food Science & Technology*, 81, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.011>
- Deori, M., Boruah, D. C., Devi, D., & Devi, R. (2014). Antioxidant and antigenotoxic effects of pupae of the muga silkworm *Antheraea assamensis*. *Food Bioscience*, 5, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2013.12.001>
- Diniz, F. M., & Martin, A. M. (1997). Effects of the Extent of Enzymatic Hydrolysis on Functional Properties of Shark Protein Hydrolysate. *LWT - Food Science and Technology*, 30(3), 266–272. <https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0184>
- Drake, M. A., Miracle, R. E., & Wright, J. M. (2008). Sensory properties of dairy proteins. In *Milk Proteins* (pp. 429–448). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374039-7.00015-5>
- Ellman, G. L. (1959). Tissue sulfhydryl groups. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 82(1), 70–77. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(59\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0003-9861(59)90090-6)
- Grahl, S., Palanisamy, M., Strack, M., Meier-Dinkel, L., Toepfl, S., & Mörlein, D. (2018). Towards more sustainable meat alternatives: How technical parameters affect the sensory properties of extrusion products derived from soy and algae. *Journal of Cleaner Production*, 198, 962–971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.041>

- Guo, F., Xiong, Y. L., Qin, F., Jian, H., Huang, X., & Chen, J. (2015). Surface Properties of Heat-Induced Soluble Soy Protein Aggregates of Different Molecular Masses. *Journal of Food Science*, 80(2). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12761>
- Haque, Z. U., & Mozaffar, Z. (1992). Casein hydrolysate. II. Functional properties of peptides. *Food Hydrocolloids*, 5(6), 559–571. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(09\)80125-2](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80125-2)
- Hartel, R. W., von Elbe, J. H., & Hofberger, R. (2018). Fats, Oils and Emulsifiers. In R. W. Hartel, J. H. von Elbe, & R. Hofberger (Eds.), *Confectionery Science and Technology* (pp. 85–124). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61742-8_4
- Hibbeln, J. R. (1998). Fish consumption and major depression. *The Lancet*, 351(9110), 1213. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(05\)79168-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(05)79168-6)
- Karnjanapratum, S., Kaewthong, P., Indriani, S., Petsong, K., & Takeungwongtrakul, S. (2022). Characteristics and nutritional value of silkworm (*Bombyx mori*) pupae-fortified chicken bread spread. *Scientific Reports*, 12(1), 1492. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05462-x>
- Kim, H.-W., Setyabrata, D., Lee, Y.-J., Jones, O. G., & Kim, Y. H. B. (2016). Pre-treated mealworm larvae and silkworm pupae as a novel protein ingredient in emulsion sausage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.023>
- Kim, T.-K., Yong, H. I., Chun, H. H., Lee, M.-A., Kim, Y.-B., & Choi, Y.-S. (2020). Changes of amino acid composition and protein technical functionality of edible insects by extracting steps. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(2), 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.12.017>

- Ladrón De Guevara, O., Padilla, P., García, L., Pino, J. M., & Ramos-Elorduy, J. (1995). Amino acid determination in some edible Mexican insects. *Amino Acids*, 9(2), 161–173. <https://doi.org/10.1007/BF00805837>
- Leaf, A., & Kang, J. X. (1996). Prevention of cardiac sudden death by N-3 fatty acids: A review of the evidence. *Journal of Internal Medicine*, 240(1), 5–12. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2796.1996.449803000.x>
- Lim, S. S., Vos, T., Flaxman, A. D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H., AlMazroa, M. A., Amann, M., Anderson, H. R., Andrews, K. G., Aryee, M., Atkinson, C., Bacchus, L. J., Bahalim, A. N., Balakrishnan, K., Balmes, J., Barker-Collo, S., Baxter, A., Bell, M. L., ... Ezzati, M. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 380(9859), 2224–2260. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)
- Lin, N., Liu, B., Liu, Z., & Qi, T. (2020). Effects of different drying methods on the structures and functional properties of phosphorylated Antarctic krill protein. *Journal of Food Science*, 85(11), 3690–3699. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15503>
- Longvah, T., Mangthya, K., & Ramulu, P. (2011). Nutrient composition and protein quality evaluation of eri silkworm (*Samia ricinii*) prepupae and pupae. *Food Chemistry*, 128(2), 400–403. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.041>
- Mapato, C., Wanapat, M., & Cherdthong, A. (2010). Effects of urea treatment of straw and dietary level of vegetable oil on lactating dairy cows. *Tropical Animal Health and Production*, 42(8), 1635–1642. <https://doi.org/10.1007/s11250-010-9613-3>

- Marangoni, F., Agostoni, C., Borghi, C., Catapano, A. L., Cena, H., Ghiselli, A., Vecchia, C. L., Lercker, G., Manzato, E., Pirillo, A., Riccardi, G., Risé, P., Visioli, F., & Poli, A. (2020). Dietary linoleic acid and human health: Focus on cardiovascular and cardiometabolic effects. *Atherosclerosis*, 292, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2019.11.018>
- Muqaddasi, Q. H., Brassac, J., Ebmeyer, E., Kollers, S., Korzun, V., Argillier, O., Stiewe, G., Plieske, J., Ganai, M. W., & Röder, M. S. (2020). Prospects of GWAS and predictive breeding for European winter wheat's grain protein content, grain starch content, and grain hardness. *Scientific Reports*, 10(1), 12541. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69381-5>
- Nair, S. S. D., Leitch, J. W., Falconer, J., & Garg, M. L. (1997). Prevention of Cardiac Arrhythmia by Dietary (n-3) Polyunsaturated Fatty Acids and Their Mechanism of Action ,. *The Journal of Nutrition*, 127(3), 383–393. <https://doi.org/10.1093/jn/127.3.383>
- Nakagawa, K., Chantanuson, R., Boonarsa, P., Seephua, N., & Siriamornpun, S. (2024). Meat analogue preparation from cricket and rice powder mixtures with controlled textural and nutritional quality by freeze alignment technique. *Food Chemistry: X*, 101402. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101402>
- Nizkii, S., Kodirova, G., & Kubankova, G. (2020). Determining the Amino Acid Composition of Soybean Proteins Using IR Scanners. *International Journal of Pharmaceutical Research and Allied Sciences*, 9(2–2020), Article 2–2020.
- Park, Y., Kim, J., Scrimgeour, A. G., Condlin, M. L., Kim, D., & Park, Y. (2013). Conjugated linoleic acid and calcium co-supplementation improves bone health in ovariectomised mice. *Food Chemistry*, 140(1–2), 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.067>

- Paul, D., & Dey, S. (2014). Essential amino acids, lipid profile and fat-soluble vitamins of the edible silkworm *Bombyx mori* (Lepidoptera: Bombycidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 34(04), 239–247. <https://doi.org/10.1017/S1742758414000526>
- Pearce, K. N., & Kinsella, J. E. (1978). Emulsifying properties of proteins: Evaluation of a turbidimetric technique. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 26(3), 716–723. <https://doi.org/10.1021/jf60217a041>
- Riley, T., Petersen, K., & Kris-Etherton, P. (2022). Health aspects of high-oleic oils. In *High Oleic Oils* (pp. 201–243). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822912-5.00002-2>
- Rodrigues, S. L., Baldo, M. P., Machado, R. C., Forechi, L., Molina, M. D. C. B., & Mill, J. G. (2014). High potassium intake blunts the effect of elevated sodium intake on blood pressure levels. *Journal of the American Society of Hypertension*, 8(4), 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.jash.2014.01.001>
- Sathe, S. K., & Salunkhe, D. K. (1981). Functional Properties of the Great Northern Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Proteins: Emulsion, Foaming, Viscosity, and Gelation Properties. *Journal of Food Science*, 46(1), 71–81. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb14533.x>
- Sforza, S., Galaverna, G., Schivazappa, C., Marchelli, R., Dossena, A., & Virgili, R. (2006). Effect of extended aging of parma dry-cured ham on the content of oligopeptides and free amino acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(25), 9422–9429. <https://doi.org/10.1021/jf061312+>
- Sha, L., & Xiong, Y. L. (2020). Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.022>

- Sobko, O., Hartung, J., Zikeli, S., Claupein, W., & Gruber, S. (2019). Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Plant, Soil and Environment*, 65(12), 594–601. <https://doi.org/10.17221/346/2019-PSE>
- Stieger, M. (2002). The Rheology Handbook—For users of rotational and oscillatory rheometers. *Applied Rheology*, 12(5), 232–232. <https://doi.org/10.1515/arh-2002-0029>
- Stoll, A. L., Severus, W. E., Freeman, M. P., Rueter, S., Zboyan, H. A., Diamond, E., Cress, K. K., & Marangell, L. B. (1999). Omega 3 Fatty Acids in Bipolar Disorder: A Preliminary Double-blind, Placebo-Controlled Trial. *Archives of General Psychiatry*, 56(5), 407. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.56.5.407>
- Tan, C., & McClements, D. J. (2021). Application of Advanced Emulsion Technology in the Food Industry: A Review and Critical Evaluation. *Foods*, 10(4), 812. <https://doi.org/10.3390/foods10040812>
- Thakur, R. K., Vial, C., & Djelveh, G. (2003). Foaming of Commercial Grade Food Products in a Continuous Stirred Column. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(9), 1083–1089. <https://doi.org/10.1205/026387603770866227>
- Udomsil, N., Imsoonthornruksa, S., Goslawit, C., & Ketudat-Cairns, M. (2019). Nutritional Values and Functional Properties of House Cricket (*Acheta domesticus*) and Field Cricket (*Gryllus bimaculatus*). *Food Science and Technology Research*, 25(4), 597–605. <https://doi.org/10.3136/fstr.25.597>
- Vreugdenhil, M., Bruehl, C., Voskuyl, R. A., Kang, J. X., Leaf, A., & Wadman, W. J. (1996). Polyunsaturated fatty acids modulate sodium and calcium currents in CA1 neurons. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(22), 12559–12563. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.22.12559>

- Wang, W., Wang, N., Liu, C., & Jin, J. (2017). Effect of Silkworm Pupae Peptide on the Fermentation and Quality of Yogurt: EFFECT OF SILKWORM PUPAE PEPTIDE ON YOGURT. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12893. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12893>
- Wąsowicz, E., Gramza, A., Hęś, M., Jeleń, H. H., Korczak, J., Matecka, M., Mildner-Szkudlarz, S., Rudzińska, M., Samotyja, U., & Zawirska-Wojtasiak, R. (n.d.). *OXIDATION OF LIPIDS IN FOOD*. Retrieved September 13, 2024, from <https://journal.pan.olsztyn.pl/OXIDATION-OF-LIPIDS-IN-FOOD,98621,0,2.html>
- WHO/FAO/UNU. (2017). *Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation*. <https://iris.who.int/handle/10665/43411>
- Wijaya, D. C., & Linawati, N. M. (2024). The Role of Alpha Linolenic Acid on Neuroinflammation: A Systemic Review. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(7), 3597–3604. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i7.6173>
- Wittek, P., Walther, G., Karbstein, H. P., & Emin, M. A. (2021). Comparison of the Rheological Properties of Plant Proteins from Various Sources for Extrusion Applications. *Foods*, 10(8), 1700. <https://doi.org/10.3390/foods10081700>
- Wu, H., Wang, Q., Ma, T., & Ren, J. (2009). Comparative studies on the functional properties of various protein concentrate preparations of peanut protein. *Food Research International*, 42(3), 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.12.006>
- Wu, R. A., Ding, Q., Lu, H., Tan, H., Sun, N., Wang, K., He, R., Luo, L., Ma, H., & Li, Z. (2020). Caspase 3-mediated cytotoxicity of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) oil extract against human hepatocellular carcinoma and colorectal adenocarcinoma. *Journal of Ethnopharmacology*, 250, 112438. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112438>

- Xia, S., Xue, Y., Xue, C., Jiang, X., & Li, J. (2022). Structural and rheological properties of meat analogues from *Haematococcus pluvialis* residue-pea protein by high moisture extrusion. *LWT*, *154*, 112756. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112756>
- Yang, L., Siriamornpun, S., & Li, D. (2006). POLYUNSATURATED FATTY ACID CONTENT OF EDIBLE INSECTS IN THAILAND. *Journal of Food Lipids*, *13*(3), 277–285. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2006.00051.x>
- Yi, L., Lakemond, C. M. M., Sagis, L. M. C., Eisner-Schadler, V., Van Huis, A., & Van Boekel, M. A. J. S. (2013). Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry*, *141*(4), 3341–3348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.115>
- Zhang, F., Xu, Y., Kong, B., Chen, Q., Sun, F., Zhang, H., & Liu, Q. (2022). Comparative study of two types of pre-extraction treatment (drying or non-drying) on physicochemical, structural and functional properties of extracted insect proteins from *Tenebrio molitor* larvae. *Current Research in Food Science*, *5*, 1570–1580. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.09.004>
- Zheng, H., Han, M., Yang, H., Tang, C., Xu, X., & Zhou, G. (2017). Application of high pressure to chicken meat batters during heating modifies physicochemical properties, enabling salt reduction for high-quality products. *LWT*, *84*, 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.006>
- Zhou, Y., Zhou, S., Duan, H., Wang, J., & Yan, W. (2022). Silkworm Pupae: A Functional Food with Health Benefits for Humans. *Foods*, *11*(11), 1594. <https://doi.org/10.3390/foods11111594>
- Zielińska, E., Karaś, M., & Baraniak, B. (2018). Comparison of functional properties of edible insects and protein preparations thereof. *LWT*, *91*, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.058>

กฤษณะ เรืองฤทธิ์, ภาวัต เสรีตระกูล, & ภัทราพร ภูมิรินทร์. (2566). *คู่มือการจำแนกชนิดจิ้งหรีดที่เลี้ยงเชิงพาณิชย์ในประเทศไทย*.

กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2530). *ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย*.

กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2547). *ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของไทย*.

ณัฐเสถียร สร้อยทองดี. (2561). *ต้นทุนและผลตอบแทนในการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดเชิงพาณิชย์กรณีศึกษาภาคกลางของประเทศไทย*. คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

นัยนา บุญทวีวัฒน์. (2553). *ชีวเคมีทางโภชนาการ*. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์ เจริญดีมั่นคงการพิมพ์. กรุงเทพฯ.

นานาสาระเกษตร. (2555). *การเลี้ยงไข่ม้วน*. https://nanasarakaset.blogspot.com/2012/03/blog-post_06.html.

บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. (2546). *ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์*. ห้างหุ้นส่วนจำกัด ธนบรรณการพิมพ์, เชียงใหม่.

ปาริฉัตร หงสประภาส. (2555). *ระบบคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร.

ปาริดา จันทร์สว่าง. (2020). *การศึกษาศักยภาพการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติคในตัวอย่างอาหารด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*. 9(102-111), 1 คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.

ปิยะวรรณ สุทธิประพันธ์. (2565). *คู่มือแนวปฏิบัติการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดให้ได้มาตรฐานสำหรับฟาร์ม*. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์. (2567). *อิมัลชัน*. <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0674/emulsion-อิมัลชัน>

ภาณุมาศ ทองคำ. (n.d.). *ผลของอุณหภูมิต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในไข่ม้วนแห้งและการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์. สาขา วิชาเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์.

วิลาสินี ดีปัญญา. (2555). *การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่น้ำแผ่น*. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

คันสนีย์ อุดมระติ. (2561). *อิมัลซิไฟเออร์ในอาหาร*. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

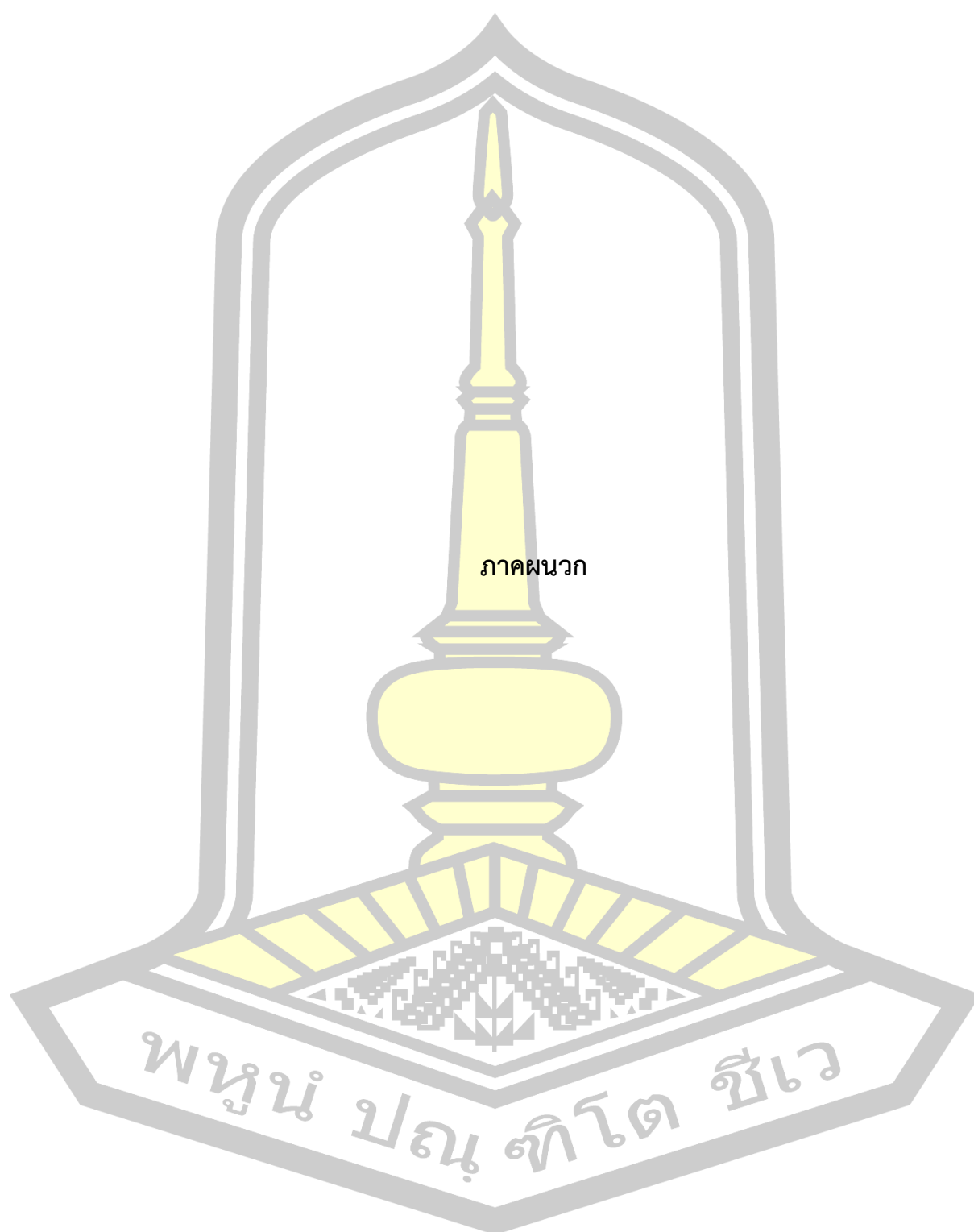
ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. (2565). *โปรตีนทางเลือกทดแทนเนื้อสัตว์เพื่ออนาคต เติบโตอย่างใด?*
<https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/Plant-Based-FB-27-07-2022.aspx>.

สมปอง ธรรมศิริรักษ์. (2550). *โครงสร้างและหน้าที่ของโปรตีน*. ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมแห่งชาติ. (2564). *โปรตีนทางเลือก ปฏิวัติวงการอาหาร ด้วยนวัตกรรมสู่ 'ความยั่งยืน'*.
<https://www.nxpo.or.th/th/8068/>

สุภาวดี ทรัพย์ศิริไพบูลย์. (2550). *ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีทางเอนไซม์และวิธีทางเคมี*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.





ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

ก.1 การวัดค่าสี โดยใช้เครื่องวัดสี (Colorimeter)

วัดโดยใช้เครื่องวัดสี Minotra รุ่น CR-300 เปิดเครื่องวัดสี แล้ววางลงบนหัววัดสีบนตัวอย่างและอ่านค่า แสดงผลการวัดในระบบ L^* a^* และ b^* โดยการวัดค่าสีสุ่มวัดบนตัวอย่างละ 3 ตำแหน่ง ตัวอย่าง 3 ซ้ำ

เมื่อ L^* คือ ค่าความสว่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100

a^* คือ ค่าความเป็นสีแดง เมื่อ a^* มีค่าบวก เป็นสีแดง เมื่อ a^* มีค่าลบ เป็นสีเขียว

b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง เมื่อ b^* มีค่าบวก เป็นสีเหลือง เมื่อ b^* มีค่าลบ เป็นสีน้ำเงิน

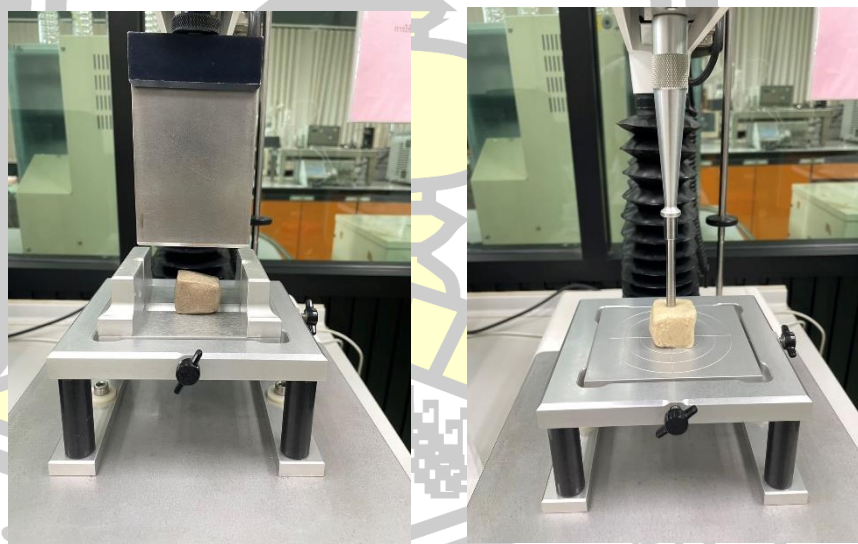
ก.2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyzer

วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยเครื่องมือ TA-XT plus (Stable Micro Systems, UK) โดยวิเคราะห์ค่าความแน่นเนื้อด้วยหัววัดแบบใบมีด (HDP/BSK) ค่าความแข็ง ค่าการเกาะติด ค่าการยึดติด ค่าความยืดหยุ่น และความเคี้ยวได้ โดยใช้หัววัดทรงกระบอก (P/6) โดยกำหนดรายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ ดังนี้

- Firmness คือ แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกดครั้งแรก หน่วยเป็นแรง เช่น นิวตัน (N)
- Hardness คือ แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกดครั้งแรก หน่วยเป็นแรง เช่น นิวตัน (N)
- Cohesiveness คือ พลังงานยึดเกาะภายในเนื้ออาหาร หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นค่าบวกของการกดหรือการเคี้ยวครั้งที่ 2 (Area 2) และครั้งที่ 1 (Area 1) (Cohesiveness = Area 2 / Area 1)
- Adhesiveness คือค่าการยึดติด คือพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่มีค่าเป็นลบของช่วงการกดครั้งที่ 1 (Area 3) มีหน่วยเป็นแรงคูณด้วยเวลา เช่น N.s
- Springiness บ่งบอกถึงความสามารถในการคืนตัวของตัวอย่างหลังการเสียรูปจากการกดครั้งแรก หรือ อัตราของการคืนรูปของวัสดุหลังจากการถูกกด หาได้จาก Time 2/Time 1 (%)
- Chewiness ความเคี้ยวได้ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่บ่งบอกถึงความต้านทาน การเคี้ยวทำให้เคี้ยวได้ยาก หาได้จาก Hardness x Cohesiveness x Springiness

ตารางที่ 18 รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

Caption	HDP/BSK	P/6	Units
Pre-test Speed	5.0	0.5	mm/sec
Test Speed	5.0	1.0	mm/sec
Post-test Speed	10.00	10	mm/sec
Target Mode	Distance	Distance	
Distance	25.00	25.00	mm
Time	5.00	5.00	sec
Trigger type	Auto (force)	Auto (force)	
Trigger force	5.0	5.0	g
Advanced option	off	off	



ภาพที่ 15 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากผักแต่ใหม่ด้วยหัววัดแบบใบมีด (HDP/BSK) และหัววัดทรงกระบอก (P/6)

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ทางกายภาพ

ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

นำชุด moisture can เข้าอบในตู้อบ hot air oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำมาใส่ desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น ซึ่ง moisture can พร้อมฝาบนเครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัม นำตัวอย่างใส่ moisture can ประมาณ 1.xxx กรัม แล้วปิดฝานำไปชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน หลังจากนั้นนำ moisture can เปิดฝาใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำ moisture can ออกจากตู้อบ ปิดฝาใส่ desiccator นาน 30 นาที หรือจนกระทั่งเย็น แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณความชื้น

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = [(W_2 - W_1) / W_2] \times 100$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ข.2 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

นำถ้วย crucible ก่อนใส่ตัวอย่างเผาในเตาเผา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำ crucible ใส่ใน desiccator ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง ชั่งตัวอย่างบนเครื่องชั่งละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัมประมาณ 1.xxx กรัม ลงในถ้วย crucible เเผาเถ้าให้เป็นถ่านสีดำด้วย hot plate ในตู้คว้นโดยเพิ่มอุณหภูมิที่ละน้อยจนควันหมด จากนั้นเผาต่อในเตาเผา muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ซ้ำมคิน (อย่างน้อย 16 ชั่วโมง) แล้วนำเถ้าที่ได้ทิ้งให้เย็นใน desiccator แล้วนำไปชั่งน้ำหนักคำนวณหาปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)} = [(W_2 - W_1) / S] \times 100$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักถ้วย crucible (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักถ้วย crucible และน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

S คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

ขั้นตอนการย่อย

ซึ่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอน 0.3-0.4xxx กรัม ใส่ลงในหลอดย่อยโปรตีน ใส่สารคอปเปอร์ ซัลเฟต 0.13 กรัม, โพแทสเซียมซัลเฟต 3 กรัม และเม็ดแก้วกันเดือด 3-4 เม็ด แล้วเติมกรดซัลฟิวริก ปริมาณ 15 มิลลิลิตร วางหลอดย่อยในตัวอย่างย่อยแล้วประกอบสายยางระหว่างฝาครอบ ขวดใส่ต่าง และเครื่องดักจับไอกรดให้เรียบร้อย เปิดสวิทช์เครื่องดักจับไอกรดและเตาย่อยแล้วตั้งอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปรับเพิ่มอุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส ย่อยต่ออีก 60 นาที จนได้สารละลายใส ปล่อยให้เย็น

ขั้นตอนการกลั่นและไทเทรต

จัดอุปกรณ์กลั่น แล้วเปิดสวิทช์ให้ความร้อน และเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น แล้วนำขวดรูป ชมพู ขนาด 500 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุกรดบอริก (เข้มข้นร้อยละ 4) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมอินดิเค เตอร์ผสม 3-4 หยด แล้วนำไปวางในตำแหน่งรองรับสิ่งที่กลั่นได้ โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรด แล้วไทเทรตกับสารละลาย HCl 0.1N ไทเทรตจนถึงจุดสมมูล จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชา-ส้ม บันทึกปริมาตร HCl แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณโปรตีน

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)} = \frac{1.4007 \times N \times (A-B) \times F}{W}$$

เมื่อ A คือ ปริมาณกรดที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาณกรดที่ใช้ไทเทรตกับ Blank (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของกรด (N)

F คือ ค่าคงที่สำหรับอาหารหรือตัวอย่างอื่น ๆ ที่ไม่ระบุเฉพาะ (6.25)

W คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

ข.4 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

นำบีกเกอร์สำหรับการหาปริมาณไขมัน ซึ่งมีขนาดความจุ 250 มิลลิลิตร ในตู้อบลมร้อน ทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน บันทึกน้ำหนักบีกเกอร์ ซึ่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 1-3.xxx กรัม บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง และห่อให้มิดชิดใส่ลงในหลอดสำหรับใส่ตัวอย่าง (thimble) นำหลอด ตัวอย่างใส่ลงในช่องสำหรับใส่ตัวอย่าง เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในบีกเกอร์หาไขมันประมาณ 100 มิลลิลิตร แล้ววางบนเตาของเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ประกอบอุปกรณ์ชุดกลั่นไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่อ อุปกรณ์ควบแน่น และเปิดสวิทช์ให้ความร้อน ปรับความร้อนให้หยดของสารทำละลายกลั่นตัวจากอุปกรณ์ ควบแน่นด้วยอัตรา 150 หยดต่อนาที ใช้เวลา 3 ชั่วโมง ต่อการวิเคราะห์แต่ละครั้ง เมื่อครบ 3 ชั่วโมงแล้ว

นำหลอดใส่ตัวอย่างออกจาก Soxhlet ปล่อยให้ตัวทำละลายไหลจาก Soxhlet ลงในปิกเกอร์จนหมด แล้วนำปิกเกอร์ที่มีไขมันไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง วางปิกเกอร์ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาปริมาณไขมัน

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละ)} = [(W_3 - W_2) / W_1] \times 100$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักปิกเกอร์ปราศจากไขมัน (กรัม)

W_3 คือ น้ำหนักปิกเกอร์ที่มีไขมัน (กรัม)

ข.5 การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหาร

ชั่งตัวอย่างใส่ในถ้วยแก้ว นำถ้วยแก้วใส่ในเครื่องวิเคราะห์ใยอาหารทุกหลุมเติมกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นร้อยละ 1.25 ปริมาณ 150 มิลลิลิตร ลงในถ้วยแก้วให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที กรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน 3 ครั้ง ครั้งละ 25 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1.25 ปริมาณ 150 มิลลิลิตร ลงในถ้วยแก้วให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที กรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน 3 ครั้ง ครั้งละ 25 มิลลิลิตร และกรองจนแห้ง ล้างสารตัวอย่างที่อยู่ใน crucible ด้วย อะซิโตน 3 ครั้ง ครั้งละ 25 มิลลิลิตร แล้วอบถ้วยแก้วที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งในโถดูดความชื้นเย็น และชั่งน้ำหนัก (W_2) บันทึกผล เผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งในโถดูดความชื้นเย็นและชั่งน้ำหนัก (W_1) บันทึกผล แล้วคำนวณหาปริมาณใยอาหาร

$$\text{ปริมาณใยอาหาร (ร้อยละ)} = [(W_2 - W_1) / S] \times 100$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักเถ้า (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักแห้งของกาก (กรัม)

S คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

ข.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

คำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดโดยนำผลต่างของปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน และใยอาหาร โดยคำนวณจาก

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)} = 100 - [\text{ความชื้น} + \text{เถ้า} + \text{ไขมัน} + \text{โปรตีน} + \text{ใยอาหาร (ร้อยละ)}]$$

ข.7 การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโน ด้วยเครื่อง LC-MS/MS

นำตัวอย่าง 5 กรัม ขจัดไขมันด้วย n-hexane 50 มิลลิลิตร (ดัดแปลงจาก Kim et al., 2020) แล้ว sonicate เป็นเวลา 30 นาที ทำการขจัดไขมันด้วย n-hexane ทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นกำจัด n-hexane ออกจากตัวอย่างโดยวางในตู้ดูดควันทิ้งไว้ข้ามคืน ทำการไฮโดรไลซ์ตัวอย่างตามวิธีของ Guevara et al. (1995) ตัวอย่างที่ผ่านการขจัดไขมัน 0.5 กรัม มาไฮโดรไลซ์ ด้วย 6N HCl 10 มิลลิลิตร แล้วอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ในตู้อบลมร้อน (model FED 115, WTB Binder, Germany) จากนั้นทำการระเหย HCl ด้วยเครื่อง rotary evaporator (Buchi R-3, Vacuum Pump v-700, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารสกัดออก แล้วเจือจางตัวอย่างด้วยน้ำ DI 1:10 แล้วปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสกรองผ่านกระดาษกรองแบบไนลอนขนาด 0.22 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC/MS/MS

การวิเคราะห์ LCMS/MS ตามสภาวะอ้างอิง Chumroenphat et al., 2021 ระบบการวิเคราะห์ LC-MS-MS ประกอบไปด้วยเครื่องรุ่น Shimadzu LCMS-8030 ชนิด triple-quadrupole mass spectrometer (Shimadzu, Kyoto, Japan) ระบบปฏิบัติการในโหมด ESI (electrospray ionization) และระบบ HPLC (Shimadzu, Kyoto, Japan) ซึ่งประกอบด้วย ดีแก๊สเซอร์ ปั๊มสองตัว คอลัมน์ โอเวนและ ออโต้แซมเปิล สภาวะในการวิเคราะห์ ทำการวิเคราะห์ในระบบ gradient eluent ด้วยคอลัมน์ชนิด C-18 (InertSustain® C-18 (2.1× 150 mm, 3 µm) ต่อเข้ากับการ์ด คอลัมน์ (InertSustain® C-18 ; 2.1 × 10 mm, 3 µm) โดยใช้เฟสเคลื่อนที่คือ กรดฟอร์มิกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในน้ำกลั่น (Line A) และกรดฟอร์มิกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ในเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 (Line B) ซึ่งอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่นั้นตั้งค่าไว้ที่ 0.2 มิลลิลิตร/นาที การไล่ระดับ เฟสเคลื่อนที่ B เริ่มต้น 0-1.0 นาที/ร้อยละ 2 (v/v) ตามมาด้วย 1-10 นาที/ร้อยละ 2-80 (v/v) นาทีที่ 10-12/ร้อยละ 80 (v/v) นาทีที่ 12-13 /ร้อยละ 80-2 (v/v) และ 12-15 นาที/ร้อยละ 2 (v/v) อุณหภูมิคอลัมน์ 38 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเครื่องฉีดสารอัตโนมัติ 4 องศาเซลเซียส ปริมาณที่ฉีด 2 ไมโครลิตร ก๊าซ nebulizing คือไนโตรเจนที่อัตราการ 15.0 ลิตร/นาที; ion source voltage 4.5 kV อุณหภูมิ DL คือ 250 องศาเซลเซียส; และอุณหภูมิบล็อกร้อนเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส โดยอาร์กอนเป็นแก๊สที่เกิดจากการชน (CID) ที่แรงดัน 230 kPa แรงดันไฟฟ้าของเครื่องตรวจจับตั้งไว้ที่ 1.72 kV โดยกำหนด Multiple Reaction Monitoring (MRM) conditions สำหรับกรดอะมิโน ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 Multiple Reaction Monitoring (MRM) conditions สำหรับการวิเคราะห์กรดอะมิโน ด้วย LC-MS/MS

No.	parameter	Precursor ion [M+H] ⁺ (m/z)	Product ion (m/z)	Q1 Pre Bias (V)	Collision energy (V)	Q3 Pre Bias (V)
1	alanine	90.05	44.00	-16.00	-12.00	-17.00
2	arginine	133.00	74.00	-13.00	-17.00	-16.00
3	asparagine	175.00	70.00	-30.00	-26.00	-15.00
4	aspartic acid	134.00	74.00	-22.00	-16.00	-17.00
5	cysteine	122.00	59.00	-12.00	-24.00	-28.00
6	glutamine	147.00	84.00	-25.00	-18.00	-19.00
7	glutamic acid	148.00	84.00	-14.00	-17.00	-10.00
8	glycine	76.00	30.00	-13.00	-12.00	-12.00
9	histidine	156.00	110.00	-10.00	-15.00	-12.00
10	isoleucine	132.10	86.00	-13.00	-12.00	-10.00
11	leucine	132.10	86.10	-13.00	-12.00	-10.00
12	lysine	147.00	84.00	-14.00	-19.00	-23.00
13	methionine	150.00	104.00	-10.00	-13.00	-23.00
14	phenylalanine	166.00	120.00	-30.00	-13.00	-16.00
15	proline	116.05	70.00	-12.00	-17.00	-16.00
16	serine	106.05	60.00	-18.00	-13.00	-14.00
17	threonine	120.00	74.00	-12.00	-12.00	-17.00
18	tryptophan	205.05	146.05	-13.00	-20.00	-20.00
19	tyrosine	182.05	136.05	-12.00	-15.00	-19.00
20	valine	118.05	72.00	-12.00	-13.00	-16.00

พหุ ประถมศึกษา

ภาคผนวก ค

การทดสอบทางประสาทสัมผัส

คำชี้แจง

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือกนี้ ขอให้ท่านประเมินและให้คะแนนตามความรู้สึกของท่าน กรุณาอ่านคำแนะนำก่อนทำการทดสอบ แบบทดสอบนี้จะเก็บเป็นความลับ และไม่มีการเผยแพร่ข้อมูลใดใดทั้งสิ้น หากท่านรู้สึกว่ายึดอัดหรือกังวลในการทำแบบทดสอบ สามารถหยุดการทดสอบได้ทันที

คำเตือน : มีส่วนประกอบของแมลง ไม่เหมาะกับผู้ที่มีอาการแพ้กุ้งหรือปู

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป โดยใส่เครื่องหมาย ✓ ในช่องว่างที่กำหนดให้

1.1) เพศ: ☐ ชาย ☐ หญิง

1.2) อายุ: ☐ 18-24 ปี ☐ 25-30 ปี ☐ 30-35 ปี ☐ 36-40 ปี ☐ 41-45 ปี ☐ 46 ปี ขึ้นไป

ตอนที่ 2 แบบทดสอบคะแนนความชอบ 9 ระดับ (9 point hedonic scale)

คำแนะนำ : กรุณาชิมผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์อาหารอิมัลชันจากโปรตีนทางเลือก จากซ้ายมือไปขวามือของท่าน ขอให้ท่านประเมินความชอบ โดยให้ท่านกรอกคะแนนดังแสดงด้านล่างนี้ตามความรู้สึกของท่านลงในช่องว่าง กรุณาตีม้าทุกครั้งก่อนทดสอบชิมตัวอย่างต่อไป

9 = ชอบมากที่สุด

8 = ชอบมาก

7 = ชอบปานกลาง

6 = ชอบเล็กน้อย

5 = เฉย ๆ

4 = ไม่ชอบเล็กน้อย

3 = ไม่ชอบปานกลาง

2 = ไม่ชอบ

1 = ไม่ชอบมากที่สุด

คุณลักษณะ	รหัสตัวอย่าง			
ลักษณะปรากฏ				
สี				
กลิ่นรส				
เนื้อสัมผัส				
ความชอบโดยรวม				

ข้อเสนอแนะ.....

ขอบพระคุณสำหรับการทำแบบทดสอบ

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์

ง.1 วิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในอาหาร เทคนิค pour plate

วิธีวิเคราะห์ทุกขั้นตอนดำเนินการด้วย เทคนิคปลอดเชื้อ (aseptic technique) เตรียมหลอดทดลอง 10 หลอด จากนั้นดูด Peptone Water. หลอดละ 9 มิลลิลิตร จากนั้นทำการนึ่งฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) จากนั้นนำผงตัวอย่าง 25 กรัม ละลายกับ Peptone Water 225 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางตั้งแต่ว่าระดับ 10^{-1} ถึง 10^{-6} ดูดสารละลายข้างต้น 1 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อ และเทอาหารเลี้ยงเชื้อขณะอุ่น ปริมาณ 20 มิลลิลิตร พักให้อาหารแข็งตัว จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เก็บผลเมื่อครบ 24-48 ชั่วโมง รายงานเชื้อเป็น จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด CFU/กรัม (ดัดแปลงจาก AOAC, 2000)

ง.2 วิเคราะห์ปริมาณยีสต์และรา เทคนิค pour plate

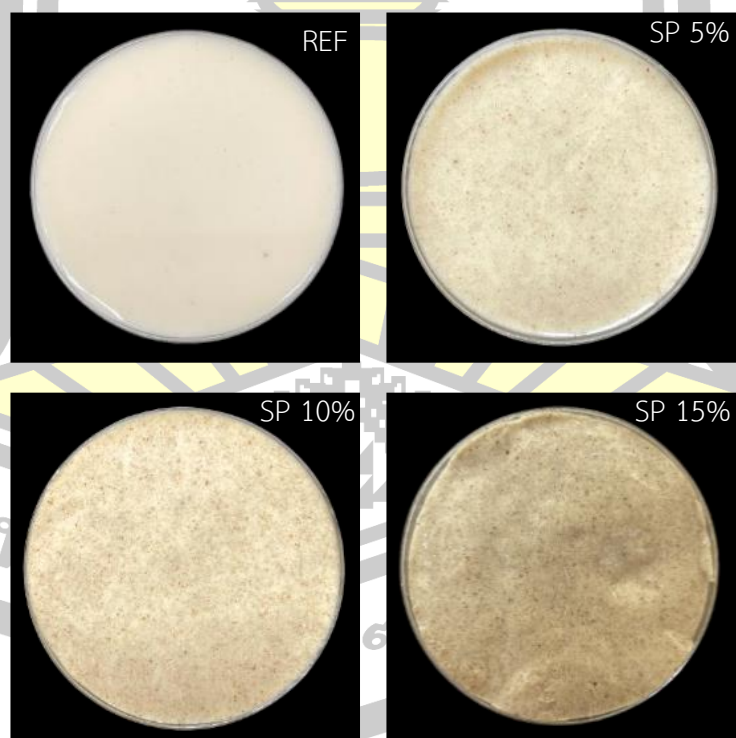
วิธีการวิเคราะห์ทุกขั้นตอนดำเนินการด้วย เทคนิคปลอดเชื้อ เตรียมหลอดทดลอง 10 หลอด ดูด Peptone Water. หลอดละ 9 มิลลิลิตร จากนั้นทำการนึ่งฆ่าเชื้อด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) จากนั้นนำตัวอย่าง 25 กรัม ละลายกับ Peptone Water 225 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางตั้งแต่ว่าระดับ 10^{-1} ถึง 10^{-6} ดูดกรดทาร์ทริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยใช้ร้อยละ 1 ของน้ำหนักอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียม ดูดสารละลายข้างต้น 1 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อ และเทอาหารเลี้ยงเชื้อขณะอุ่น ปริมาณ 20 มิลลิลิตร พักให้อาหารแข็งตัว จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บผลเมื่อครบ 48-72 ชั่วโมง รายงานปริมาณเชื้อเป็น จำนวนยีสต์และรา CFU/กรัม (ดัดแปลงจาก AOAC, 2000)

ภาคผนวก จ

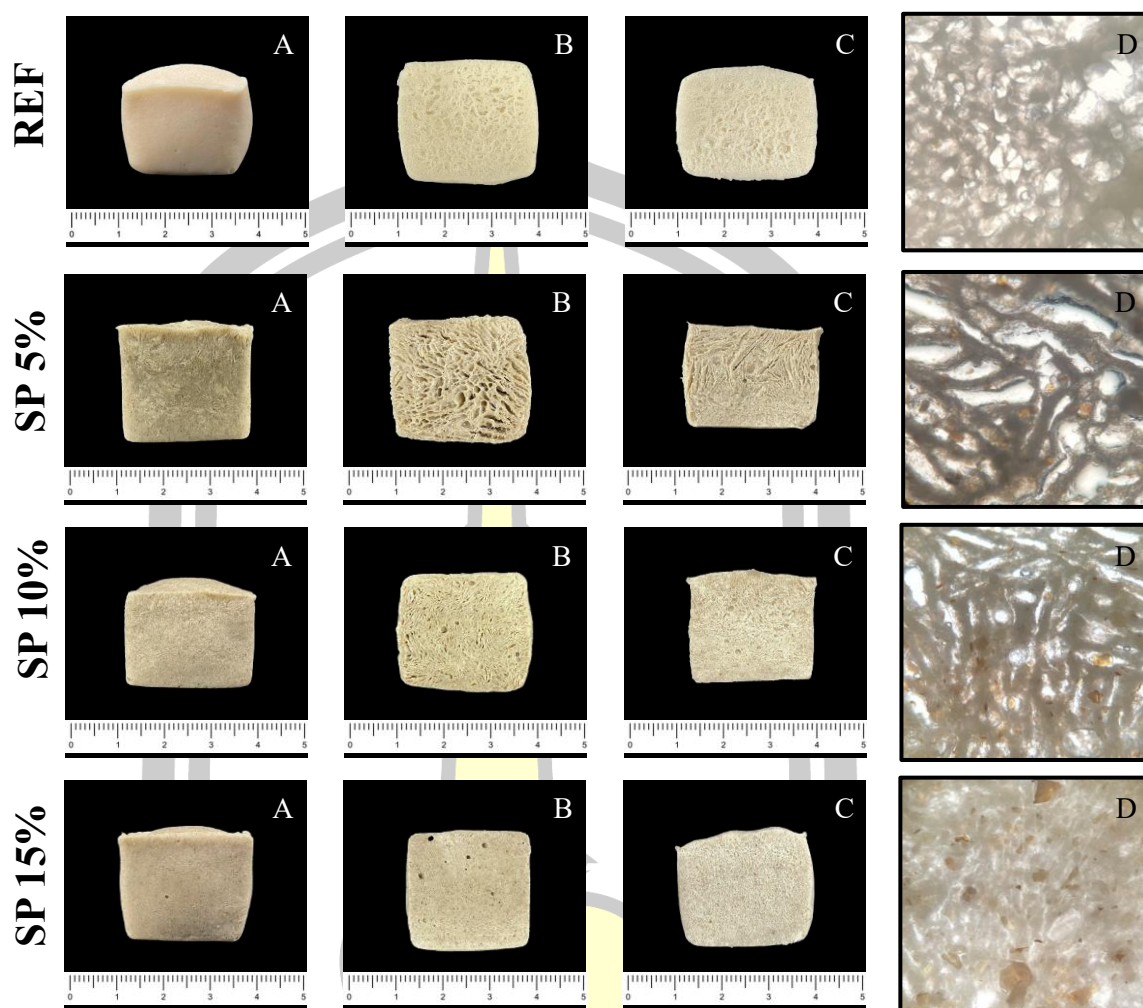
ภาพประกอบการวิจัย



ภาพที่ 16 ผงโปรตีนทางเลือกจากดักแด้ไหม จิ้งหรีดบ้าน และไข่ผ่า



ภาพที่ 17 ส่วนผสมของเหลวกับของแข็ง หรือ Slurry ของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ไหม



ภาพที่ 18 ลักษณะปรากฏและโครงสร้างเส้นใยภายในของผลิตภัณฑ์เนื้อเทียมจากดักแด้ใหม่ โดย
ภาพ A-D คือ ภาพถ่ายด้านข้าง ภาพตัดขวาง ภาพตัดตามยาว และภาพโครงสร้างเส้นใยภายในด้วย
กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 4 เท่า (4x) ตามลำดับ



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายปริญญา บุญอาสา
วันเกิด	วันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2541
สถานที่เกิด	อำเภอวังสามหมอ จังหวัดอุดรธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 15 หมู่ 15 ตำบลผาสุก อำเภอวังสามหมอ จังหวัดอุดรธานี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2560 มัธยมศึกษา โรงเรียนธรรมบวรวิทยา จังหวัดสกลนคร พ.ศ. 2564 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาเทคโนโลยีการอาหาร และโภชนาการ (เกียรตินิยมอันดับ 2) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2567 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาเทคโนโลยีการ อาหาร มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	Boonarsa, P., Bunyatratchata, A., Chumroenphat, T., Thammapat, P., Chaikwang, T., Siripan, T., ... & Siriamornpun, S. (2024). Nutritional Quality, Functional Properties, and Biological Characterization of Watermeal (<i>Wolffia globosa</i>). <i>Horticulturae</i> , 10(11), 1171.

พูน ปณ ภัโต ชีเว