



สมบัติทางเคมีกายภาพและวิทยากระแสนของระบบอิมัลชัน  
ในผลิตภัณฑ์ไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์

โดย

นายณัฐ เทพหัตถิ

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร)  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สมบัติทางเคมีกายภาพและวิทยาการสารสนเทศของระบบอิมัลชัน  
ในผลิตภัณฑ์ไก่ยอในรีทอร์ทแพคเกจจิ้ง

โดย

นายณัฐ เทพหัตถ์



คุณฉันทิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร)  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

PHYSICO-CHEMICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF  
EMULSION SYSTEM IN KAI-YOR (THAI CHICKEN SAUSAGE)  
IN RETORT POUCH

BY

MR. NUT THEPHUTTEE



A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF PHILOSOPHY (FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY)  
DEPARTMENT OF FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY  
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
THAMMASAT UNIVERSITY  
ACADEMIC YEAR 2019  
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คุณวุฒิบัตร

ของ

นายณัฐ เทพหัตถ์


เรื่อง

สมบัติทางเคมีกายภาพและวิทยากระแสนของระบบอิมัลชัน  
ในผลิตภัณฑ์ไก่เยื่อในรีทอร์ทแพคเกจจิ้ง

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร)

เมื่อวันที่ 14 เดือน กันยายน พ.ศ. 2563


ประธานกรรมการสอบคุณวุฒิบัตร

  
\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล)

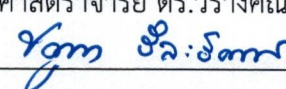
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาคุณวุฒิบัตรหลัก

  
\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศรี เทพรักษา)

กรรมการสอบคุณวุฒิบัตร

  
\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา สมพงษ์)

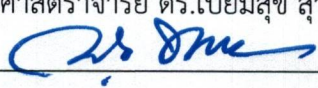
กรรมการสอบคุณวุฒิบัตร

  
\_\_\_\_\_  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์)

กรรมการสอบคุณวุฒิบัตร

  
\_\_\_\_\_  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมสุข สุวรรณกุล)

คณบดี

  
\_\_\_\_\_  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชนนท์ หงส์วาทิธีธร)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติทางเคมีกายภาพและวิทยาการผสมของระบบอิมัลชัน ในผลิตภัณฑ์ไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์
ชื่อผู้เขียน	นายณัฐ เทพหัตถ์
ชื่อปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศรี เทพรักษา
ปีการศึกษา	2562

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและวิทยาการผสมของอิมัลชันเนื้อสัตว์ในไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) ไขมันไก่ (ตัวอย่างควบคุม) (2) น้ำมันรำข้าวแซ่เยือกแข็ง (3) อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด และ (4) อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ อิมัลชันเนื้อสัตว์ที่เตรียมได้จะผ่านการให้ความร้อน 2 ระดับ ได้แก่ การทำให้สุกด้วยการนึ่งและการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ที่อุณหภูมิ 122 องศาเซลเซียส นาน 14 นาที ให้ค่า  $F_0$  ไม่ต่ำกว่า 12 นาที ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นน้ำมันรำข้าวแซ่เยือกแข็งและอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้อิมัลชันไถ่ยอมีความคงตัว โดยมีปริมาณของเหลวที่แยกได้ลดลง น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ส่งผลให้อิมัลชันไถ่ยอหลังทำให้สุกสูญเสียน้ำหนักน้อยลง ในขณะที่อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 รูปแบบ ส่งผลให้อิมัลชันไถ่ยอหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์สูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น การใช้น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการอุ้มน้ำแต่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเจลในอิมัลชันไถ่ยอทั้งหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ โดยการใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์-กลูตามิเนสช่วยลดการสูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำและเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเจลในอิมัลชันไถ่ยอหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ได้มากกว่าน้ำมันรำข้าวรูปแบบอื่น น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ มีผลให้อิมัลชันไถ่ยอหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มีความสว่างและดัชนีความเป็นสีขาวสูงขึ้น ขณะที่ความเป็นสีเหลืองลดลง อิมัลชันไถ่ยอทุกตัวอย่างมีสีเข้มขึ้นหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ แต่การใช้น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงสีภายในของอิมัลชันไถ่ยอหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ลดลง นอกจากนี้ผลการศึกษาสมบัติทางวิทยาการผสมของอิมัลชันไถ่ยอก่อนทำให้สุกพบว่า อิมัลชันไถ่ยอทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากกว่าของเหลวและมี

ลักษณะเป็นเจลที่ไม่แข็งแรง โดยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้อิมัลชันไก่อ่อนทำให้สุกมีความคงตัวสูงขึ้น ขณะที่น้ำมันรำข้าวรูปแบบอื่นส่งผลไม่มากต่อความคงตัว อิมัลชันไก่อ่อนทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อน โดยการใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 รูปแบบ ไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิในการเกิดเจลของอิมัลชันไก่อ่อน การใช้ไขมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ส่งผลให้มอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อ่อนสูงกว่าตัวอย่างควบคุม โดยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้เมทริกซ์โปรตีนมีความแข็งแรงกว่าไขมันรำข้าวรูปแบบอื่น สำหรับผลค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อ่อนหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์พบว่า อิมัลชันไก่อ่อนที่ใช้น้ำมันรำข้าวมีความแข็งแรงและการเคี้ยวสูงกว่าตัวอย่างควบคุม การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มีผลกระทบเชิงลบต่อเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อ่อนทุกตัวอย่าง แต่การใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้อิมัลชันไก่อ่อนหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มีความแข็งแรงและการเคี้ยวลดลงน้อยที่สุด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชี้ให้เห็นว่า เฟสไขมันที่แตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อ่อน การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ส่งผลให้เมทริกซ์โปรตีนเปลี่ยนแปลงในระดับที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของเฟสไขมัน การใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้เกิดโครงสร้างเมทริกซ์โปรตีนในอิมัลชันไก่อ่อนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้รับผลเสียหายหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์น้อยกว่าการใช้เฟสไขมันรูปแบบอื่น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง และอิมัลชันน้ำมันรำข้าว 2 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการผลิตไก่อ่อน ขณะที่การใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตไก่อ่อนในรีโอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์

**คำสำคัญ:** สมบัติทางเคมีกายภาพ, วิชยากระแส, การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์, อิมัลชันเนื้อสัตว์, อิมัลชันน้ำมัน

Dissertation Title	PHYSICO-CHEMICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF EMULSION SYSTEM IN KAI-YOR (THAI CHICKEN SAUSAGE) IN RETORT POUCH
Author	Mister Nut Thephuttee
Degree	Doctor of Philosophy
Major Field/Faculty/University	Food Science and Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University
Dissertation Advisor	Associate Professor Prapasri Theprugsa, Ph.D.
Academic Year	2019

## ABSTRACT

Physicochemical and rheological properties of meat emulsion in Kai-yor (Thai chicken sausage) formulated with 4 different lipids including (1) chicken fat (control), (2) frozen rice bran oil (RBO), (3) pre-emulsified RBO with soy protein isolate (SPI) and (4) pre-emulsified RBO with a mixture of sodium caseinate and microbial transglutaminase (SC+MTG) were evaluated. Meat emulsions were prepared then subjected to 2 levels of heat treatment: cooking by steam and sterilization (cook-sterilization) at 122°C for 14 min with  $F_0$  of at least 12 min. The results showed that frozen and pre-emulsified RBO with SC+MTG helped stabilize the meat emulsions indicated by a reduction in their fluid release. All types of RBO reduced the cooking loss of the cooked samples. The cooking loss increased in sterilized samples formulated with both types of pre-emulsified RBO. All types of RBO did not show a negative effect on water holding capacity but increased the gel strength of meat emulsion in both cooked and sterilized samples. Pre-emulsified RBO with SC+MTG showed the greatest effect in reducing the loss of water holding capacity and gel strength after sterilization. All types of RBO also increased lightness and whiteness while reduced the yellowness of both cooked and sterilized samples. All samples were darker after subjected to the sterilization process. However, all types of RBO effectively reduced the changes in the internal color of sterilized meat emulsions.

Evaluation of rheological properties of uncooked meat emulsions found that all samples exhibited more solid-like than liquid-like behavior and weak gel-like characteristic. Pre-emulsified RBO with SC+MTG increased the stability of meat emulsion before heat processing, while other types of lipid phase didn't remarkably affect the stability. All samples showed an increase in elasticity during heating. Substitution by both types of pre-emulsified RBO did not show a pronounced effect on the gelation temperature of meat emulsion. Elastic moduli of samples prepared with all types of RBO were higher than control. Incorporating pre-emulsified RBO with SC+MTG resulted in a more rigid protein matrix than the rest of the formulations. Texture profile analysis revealed that the hardness and chewiness of all reformulated sausages were higher than those of the control heated by cooking and sterilization. The sterilization process negatively affected the texture of all samples. Nevertheless, the meat emulsion formulated with pre-emulsified RBO with SC+MTG exhibited the lowest decrease in hardness and chewiness. Scanning electron micrographs indicated that differences in the lipid phase affected the microstructure of meat emulsions. Sterilization altered the protein matrix to different extents depending on the type of lipid. Replacing chicken fat with pre-emulsified RBO with SC+MTG resulted in the greater formation of a protein matrix which was less severely damaged after sterilization than other lipids. It can be concluded that the substitution of chicken fat by both frozen and pre-emulsified RBO (with SPI or SC+MTG) showed the potential for producing a cooked meat emulsion. However, to produce a sterilized meat emulsion, pre-emulsified RBO with SC+MTG was one of the alternatives.

**Keywords:** Physicochemical property, Rheology, Sterilization, Meat emulsion, Pre-emulsified oil

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารทุกท่านที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือด้านต่างๆ จนดุษฎีนิพนธ์มีผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศรี เทพรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือในการดำเนินงานจนดุษฎีนิพนธ์มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล ประธานกรรมการสอบและผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบัน รองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา สมพงษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมสุข สุวรรณภูมิ กรรมการสอบ ที่ได้ให้คำแนะนำที่สำคัญต่อการทำดุษฎีนิพนธ์ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณ บริษัท วิกี้ เอนเตอร์ไพรส์ จำกัด และบริษัท อายิโนะโมไต้ะ ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบในการทำดุษฎีนิพนธ์ บริษัทจาร์พา เทคโนโลยี จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการทดสอบและเครื่องมือวัดสำหรับการทำดุษฎีนิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณเศรษฐการ นุชนิยม ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือวัดต่างๆ และคุณชัญญา นุชชอบธรรม ที่ให้คำแนะนำการจัดทำและตรวจแก้รูปเล่มดุษฎีนิพนธ์

ขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาและการทำดุษฎีนิพนธ์

นายณัฐ เทพหัตถ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(10)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อิมัลชันเนื้อสัตว์ในไก่ยอ	4
2.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันเนื้อสัตว์	4
2.3 การทดแทนไขมันสัตว์ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ด้วยไขมันจากแหล่งอื่น	6
2.4 ผลกระทบของการลดหรือทดแทนไขมันสัตว์ต่ออิมัลชันเนื้อสัตว์	7
2.5 การฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	27
3.1 วัตถุประสงค์	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	28
3.3 วิธีการเตรียมวัตถุดิบ	29
3.4 วิธีการผลิตไถ่ยอ	30
3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	39
4.1 ศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชันของระบบอิมัลชันไถ่ยอ	39
4.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของระบบอิมัลชันไถ่ยอ	52
4.3 ศึกษาสมบัติทางวิทยาการเสถียรของระบบอิมัลชันไถ่ยอ	102
4.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอิมัลชันไถ่ยอ	125
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	147
5.1 บทสรุป	147
5.2 ข้อเสนอแนะ	150
รายการอ้างอิง	151
ภาคผนวก	162
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	163
ประวัติผู้เขียน	165

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมของไถ่ยอสูตรที่ใช้มันไถ่เป็นเฟสไขมัน	30
3.2 กรรมวิธีการผลิตของกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ของไถ่ยอ ในรีทอร์ทเพาซ์	32
4.1 การกำหนดรายละเอียดไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ก่อนการฆ่าเชื้อ	39
4.2 การกำหนดกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการฆ่าเชื้อไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์	41
4.3 รายละเอียดของกระบวนการฆ่าเชื้อไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ที่ใช้กรรมวิธี การผลิตแตกต่างกัน	47
4.4 ปัจจัยวิกฤตของกรรมวิธีการผลิตที่กำหนดสำหรับการฆ่าเชื้อไถ่ยอ ในรีทอร์ทเพาซ์	48
4.5 $F_0$ ของกระบวนการฆ่าเชื้อไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน	49
4.6 คุณภาพทางจุลินทรีย์ของไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน	51
4.7 ความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ใช้ระบบทำให้คงตัวแตกต่างกัน	53
4.8 ความคงตัวของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน	56
4.9 การสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก	60
4.10 การสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ	65
4.11 ความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังทำให้สุก	70
4.12 ความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังฆ่าเชื้อ	72
4.13 ความแข็งแรงของโครงสร้างของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังทำให้สุก	75
4.14 ความแข็งแรงของโครงสร้างของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังฆ่าเชื้อ	77
4.15 ความแตกต่างของสีกายนอกของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังทำให้สุกเทียบกับอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้มันไถ่หลังทำให้สุก	81
4.16 ความแตกต่างของสีกายในของอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังทำให้สุกเทียบกับอิมัลชันไถ่ยอที่ใช้มันไถ่หลังทำให้สุก	83

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก	85
4.18 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันไก่หลังฆ่าเชื้อ	90
4.19 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันไก่หลังฆ่าเชื้อ	92
4.20 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ	94
4.21 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	98
4.22 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	100
4.23 สมบัติทางวิทยากระแสนของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิด้วยรีโอมิเตอร์	113
4.24 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพของระหว่างเกิดการเกิดเจลอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิด้วยรีโอมิเตอร์	123
4.25 ลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก	126
4.26 ลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ	129

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	10
2.3	11
2.4	12
2.5	12
2.6	13
2.7	14
2.8	15
2.9	16
2.10	16
2.11	19
2.12	19
2.13	20
4.1	43
4.2	44

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การแทรกผ่านความร้อนในเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ เมื่อใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ 13 นาที และช่วงเวลามาเชื้อ 10 นาที	45
4.4 การแทรกผ่านความร้อนในเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ เมื่อใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ 13 นาที และช่วงเวลามาเชื้อ 14 นาที	46
4.5 องค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไก่อย ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก	61
4.6 องค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไก่อย ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ	66
4.7 ความแตกต่างของการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไก่อย ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	69
4.8 ความแตกต่างของความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไก่อยที่ใช้ เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	73
4.9 ความแตกต่างของความแข็งแรงของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	79
4.10 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังทำให้สุกเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ไขมันไก่หลังทำให้สุก	80
4.11 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังทำให้สุกเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ไขมันไก่หลังทำให้สุก	82
4.12 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้ เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก	84
4.13 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังฆ่าเชื้อเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ไขมันไก่หลังฆ่าเชื้อ	89
4.14 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังฆ่าเชื้อเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ไขมันไก่หลังฆ่าเชื้อ	91

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ	93
4.16 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	97
4.17 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	99
4.18 มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันแอมพลิจูดด้วยรีโอมิเตอร์	103
4.19 มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันความถี่ด้วยรีโอมิเตอร์	106
4.20 แทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันความถี่ด้วยรีโอมิเตอร์	107
4.21 มอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์	111
4.22 มอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้เย็นด้วยรีโอมิเตอร์	112
4.23 แทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์	118
4.24 ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันไก่อยเป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์	119
4.25 ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์	120
4.26 ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์	121

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส เป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อน ด้วยรีโอมิเตอร์	122
4.28 ความแตกต่างของลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมัน แตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก	131
4.29 ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันไก่เป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	134
4.30 ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมัน หลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	134
4.31 ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	135
4.32 ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	135
4.33 ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันไก่เป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	136
4.34 ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมัน หลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	137
4.35 ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	137

### สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	138
4.37 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่เป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	141
4.38 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมัน หลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	142
4.39 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	142
4.40 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	143
4.41 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่เป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	144
4.42 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมัน หลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	145
4.43 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	145
4.44 ภาพอิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับ เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า	146

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ไถ่ยอเป็นผลลิตภัณท์เนื่อสัต์ว้ประเภทอิมัลชัน (emulsion-type) ทีม่ปริมาณไขมันสูง จึงมีโอกาสสูงทีจ่จะมีผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ โดยมีข้อบ่งชี้ว่าอาหารทีม่ไขมันสัต์ว้ปริมาณสูง โดยเฉพาะกรดไขมันอิมัต์ว้และโคเลสเตอรอลเก็ยว้ข้องกับปัญหาการมีน้ำหนัเกิน ความดันสูง รวมทั้งโรคหลอดเลือดและหัวใจ โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้จัดทำข้อแนะนำระบู่ว่า พลังงานควรมาจากไขมันในอาหารร้อยละ 15-30 โดยเป็นไขมันอิมัต์ว้ไม่เกินร้อยละ 10 และควรได้รับโคเลสเตอรอลไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อวัน ผู้บริโภคจึงมีความต้องการผลลิตภัณท์เนื่อสัต์ว้ซึ่งมีปริมาณไขมันต่ำลงกว่าเดิม (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2001; Vural และ Javidipour, 2002; Oezvural และ Vural, 2008; Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010a) อย่างไรก็ตามไขมันสัต์ว้มีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของผลลิตภัณท์ โดยการทำหน้าที่เป็นเฟสไขมันในโครงสร้างของอิมัลชันเนื่อสัต์ว้ (meat emulsion) ทำให้ระบบอิมัลชันคงตัว ลดการสูญเสียจากการทำให้สุก เพิ่มการอุม้่น้ำและความชุ่มน้ำ ทำให้ผลลิตภัณท์มีเนื่อสั่มผัสที่แข็งพอเหมาะ ทั้งยังเป็นแหล่งของสารให้กลิ่นรสต่างๆ ด้วย (Carballo และคณะ, 1995; Pietrasik และ Duda, 2000; Matsuishi, 2004; Yoo และคณะ, 2007; Cofrades และคณะ, 2008)

การทดแทนไขมันสัต์ว้ในผลลิตภัณท์เนื่อสัต์ว้ ด้วยน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เป็นวิธีหนึ่งทีช่วยลดกรดไขมันอิมัต์ว้และโคเลสเตอรอลทีส่งผลเสียต่อสุขภาพโดยพบว่า มีผลกระทบต่อความคงตัวของระบบอิมัลชันเนื่อสัต์ว้น้อยกว่าการใช้สารทดแทนไขมันชนิดอื่น (Choi และคณะ, 2010; Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010a; Shao และคณะ, 2011; Youssef และคณะ, 2011) ได้มีงานวิจัยทีศึกษาการใช้น้ำมันพืชรูปแบบแตกต่างกันในผลลิตภัณท์เนื่อสัต์ว้ ได้แก่ น้ำมันพืชแซ่เย็น (Youssef และ Barbut, 2011) น้ำมันพืชแซ่เยือกแข็ง (วรรณชยา และคณะ, 2556; ขนิษฐัณิชา และประภาศรี, 2558) และน้ำมันพืชทีเตรียมเป็นอิมัลชัน (pre-emulsified oil) ประเภทน้ำมันในน้ำ (oil-in-water emulsion) โดยใช้โปรตีนเนื่อสัต์ว้หรือใช้โปรตีนทีไม่ใช่นื่อสัต์ว้ เช่น โซเดียม เคซินเนต หรือโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate) ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ รวมทั้งอาจมีการใช้ร่วมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ (MTG) (Herrero และคณะ, 2012)

เนื่องจากประเทศไทยมีรำข้าวจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการปลูกข้าว และมีการบริโภคน้ำมันรำข้าวมากขึ้นเนื่องจากมีผลดีต่อสุขภาพ โดยมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวทั้งเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อนในปริมาณมาก รวมทั้งยังมีไฟโตสเตอรอล ที่ช่วยลดการดูดซึมไขมันแอลดีแอล (low density lipoprotein: LDL) ลดความเสี่ยงต่อโรคเส้นเลือดหัวใจอุดตันและความดันโลหิตสูง นอกจากนี้ยังมีโอรีซานอลที่มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าวิตามินอี 6 เท่า (นัยนา และเรวดี, 2545) น้ำมันรำข้าวจึงเป็นน้ำมันพืชชนิดหนึ่งที่เหมาะสมต่อการใช้ทดแทนไขมันสัตว์ในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ โดยได้มีการศึกษาที่ชี้ให้เห็นว่า น้ำมันรำข้าวสามารถใช้ทดแทนไขมันไก่ในผลิตภัณฑ์ไก่ยอได้ (ชินิษฐ์ณิชา และประภาศรี, 2558)

ขณะเดียวกัน ผู้บริโภคปัจจุบันให้ความสนใจต่อผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภคที่ยืดอายุการเก็บรักษาด้วยกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มากขึ้น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในรีทอร์ทแพคเกจ เนื่องจากเก็บรักษาได้นาน ไม่ต้องแช่เย็น มีน้ำหนักเบา สะดวกต่อการพกพาและบริโภค ในขณะที่ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์พร้อมบริโภคส่วนใหญ่ รวมถึงไก่ยอ จะผ่านการทำให้สุกโดยต้มหรือหนึ่งด้วยความร้อนระดับเทียบเท่ากับการพาสเจอร์ไรส์ และมีอายุการเก็บรักษาสั้นเพียงประมาณ 15-30 วัน โดยต้องแช่เย็นเพื่อป้องกันการเสื่อมเสีย จึงได้มีงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อ ระดับสเตอริไลซ์สำหรับไก่ยอบรรจุในรีทอร์ทแพคเกจ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น รวมทั้งเลือกใช้รีทอร์ทแพคเกจแบบใสที่ไม่มีชั้นของอะลูมิเนียมพอยล์เป็นส่วนประกอบ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการอุ่นผลิตภัณฑ์ด้วยเตาไมโครเวฟ (กรรวิ และประภาศรี, 2561)

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ใช้น้ำมันพืชรูปแบบต่างๆ เพื่อทดแทนไขมันสัตว์ ในระดับจุลภาค (microscale) โดยเป็นระบบอิมัลชันที่ผ่านการให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์ (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b; Delgado-Pando และคณะ, 2011; Herrero และคณะ, 2012; Marchetti และคณะ, 2013; Genccelep และคณะ, 2015) อย่างไรก็ตามยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ลักษณะดังกล่าวในระดับจุลภาคร่วมกับการให้ความร้อนสูงในระดับสเตอริไลซ์

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ (physico-chemical properties) สมบัติทางวิทยาการกระแส (rheological properties) รวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยา (physiological characteristics) ของระบบอิมัลชันในผลิตภัณฑ์ไก่ยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่บรรจุในรีทอร์ทแพคเกจและผ่านการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ ซึ่งจะทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานในการอธิบายโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ใช้น้ำมันพืชร่วมกับการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- (1) ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของระบบอิมัลชันไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์
- (2) ศึกษาสมบัติทางวิทยาการระเหยของระบบอิมัลชันไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์
- (3) ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอิมัลชันไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) องค์ความรู้ใหม่ที่สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติทางวิทยาการระเหย และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ของระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ในผลิตภัณฑ์ไก่อย ตั้งแต่ก่อนทำให้สุก หลังทำให้สุก และหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์
- (2) องค์ความรู้ที่เป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้น้ำมันพืชเพื่อทดแทนไขมันสัตว์ในระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านความร้อนระดับพาสเจอร์ไรส์และระดับสเตอริไลซ์
- (3) เพิ่มโอกาสในการใช้ประโยชน์จากน้ำมันรำข้าวในอุตสาหกรรมการแปรรูปเนื้อสัตว์ได้มากขึ้น

## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

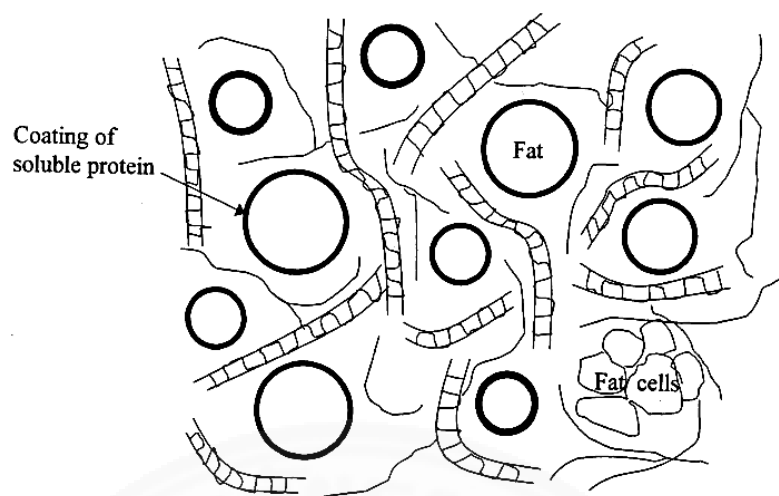
#### 2.1 อิมัลชันเนื้อสัตว์ในไก่ยอ

ไก่ยอเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ลดขนาดชนิดบดละเอียด ซึ่งเตรียมได้จากการนำเนื้อไก่สดที่บดละเอียด เติมน้ำมันไก่ เครื่องปรุงรสและเครื่องเทศ เช่น พริกไทย เกลือ และน้ำตาล หรืออาจเติมส่วนผสมอื่นด้วย เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แล้วสับผสมจนส่วนผสมเปลี่ยนเป็นมวลเหนียว แล้วห่อเป็นมัดหรือบรรจุในภาชนะบรรจุที่เหมาะสม ก่อนต้มหรือนึ่งจนสุก และเก็บรักษาโดยการแช่เย็น (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549)

อิมัลชันเนื้อสัตว์ในไก่ยอเป็นอิมัลชันประเภทไขมันในน้ำ โดยมีเม็ดไขมันเป็นเฟสกระจาย (disperse หรือ discontinuous phase) น้ำเป็นเฟสต่อเนื่อง (external หรือ continuous phase) มีโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ เนื่องจากน้ำและไขมันจะไม่รวมตัวกัน จึงต้องมีตัวช่วยให้รวมตัวกัน โดยโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จะหุ้มเม็ดไขมันไว้ ซึ่งกลไกการเกิดอิมัลชันเกิดจากการสับผสมเนื้อสัตว์กับเกลือ เนื่องจากเกลือมีความสามารถที่จะสกัดโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่อยู่ในเนื้อสัตว์ และเมื่อผสมไขมันลงไปในช่วงการสับผสม โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่ละลายออกมาจะเข้ามาหุ้มเม็ดไขมันเอาไว้ และในช่วงการสับผสมจะมีความร้อนเกิดขึ้น เนื่องจากการเสียดสีของเนื้อกับเครื่องมือ ทำให้เม็ดไขมันแยกตัวออกจากโครงสร้างได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเติมน้ำแข็งลงไปเพื่อควบคุมอุณหภูมิของส่วนผสมให้อยู่ที่ไม่เกิน 12-15 องศาเซลเซียส และส่วนผสมที่เป็นอิมัลชันที่ดีจะต้องมีลักษณะเป็นมวลเหนียว เนื้อละเอียด เรียบเนียน และมันวาว (เยาวลักษณ์, 2536)

#### 2.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันเนื้อสัตว์

โครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ น้ำ และเม็ดไขมัน (fat globule) โดยความคงตัวของไขมันเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ประเภทลดขนาด (comminuted) ซึ่งการทำให้ไขมันคงตัวอาจเกิดจากกระบวนการทำให้เกิดอิมัลชัน (emulsification) โดยการสร้างฟิล์มบนรอยต่อระหว่างเฟสด้วยโปรตีน และ/หรือการกักไขมันเอาไว้ในโครงร่างตาข่ายของโปรตีนที่สานกันอย่างต่อเนื่อง (หรือเรียกว่า เมทริกซ์โปรตีน) ที่สร้างขึ้นโดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีน (Barbut, 1999; Youssef และ Barbut, 2011) ดังรูปที่ 2.1



**รูปที่ 2.1** โครงสร้างของอิมัลชันเนื้อสัตว์

ที่มา: Barbut (1999)

Barbut (1999) กล่าวว่า ยังคงไม่มีข้อยุติว่าโครงสร้างผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ประเภทลดขนาดแบบบดละเอียด (finely comminuted) ควรใช้คำจำกัดความใดระหว่างอิมัลชันเนื้อสัตว์กับแบตเทอร์เนื้อสัตว์ (meat batter) เนื่องจากการอธิบายกลไกที่ใช้ในการอุมไขมันเอาไว้ในโครงสร้างมีความแตกต่างกัน การอยู่ร่วมกันระหว่างโปรตีนและไขมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์จึงควรอธิบายด้วยทฤษฎี 2 ทฤษฎีร่วมกัน ดังรูปที่ 2.1

### 2.2.1 ทฤษฎีฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟส

ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟส (interfacial protein film: IPF) จะเกิดขึ้นเมื่อโปรตีนสร้างเป็นฟิล์มบางๆ ล้อมรอบเม็ดไขมันเอาไว้ โดยฟิล์มอยู่ระหว่างเฟสที่เป็นไขมันภายในเม็ดไขมันกับเฟสที่เป็นน้ำซึ่งอยู่ภายนอกเม็ดไขมันและอยู่ร่วมกันกับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ เกลือ และส่วนผสมอื่นๆ โดยโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในกล้ามเนื้อสัตว์ที่ได้จากการสกัดด้วยเกลือ ส่วนหนึ่งจะทำหน้าที่ในการสร้างเป็นฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสขึ้น

ทั้งนี้โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์สามารถทำหน้าที่เป็นฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสได้เนื่องจากโมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงสามารถจัดวางตำแหน่งให้อยู่ที่รอยต่อระหว่างเฟสและลดแรงตึงระหว่างเฟสได้ โดยแรงตึงเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ (coalescence) ของเม็ดไขมัน และต่อมากจะส่งผลให้เกิดการแยกตัวของไขมันออกจากอิมัลชันเนื้อสัตว์ ดังนั้นในทฤษฎีนี้การทำให้ไขมันคงตัวจึงใช้หลักการการเกิดอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำมาอธิบาย โดยโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ทำหน้าที่อิมัลซิไฟเออร์ให้ระบบอิมัลชันนี้ จึงเป็นที่มาของการให้คำจำกัดความว่าอิมัลชันเนื้อสัตว์ (Barbut, 1999)

## 2.2.2 ทฤษฎีการกักทางกายภาพ

เมื่อดไขมันจะถูกกักไว้ภายในโครงสร้างเมทริกซ์โปรตีนที่มีความหนืดสูง ซึ่งจะจำกัดการเคลื่อนที่ของเมื่อดไขมัน จึงไม่เกิดการรวมตัวกันและไม่เกิดการแยกตัวของไขมัน ทั้งนี้ไม่มีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและไขมัน ไม่มีชั้นที่ทำหน้าที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟสที่เป็นไขมันและเฟสที่เป็นน้ำ และไม่มีการสร้างฟิล์มของโปรตีนห่อหุ้มเมื่อดไขมัน โดยถือว่าการกักเมื่อดไขมันเป็นกลไกทางกายภาพ (physical entrapment: PE) ไม่มีกลไกทางเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงเป็นที่มาของการให้คำจำกัดความว่าแบดเทอร์เนื้อสัตว์ (Barbut, 1999)

## 2.3 การทดแทนไขมันสัตว์ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ด้วยไขมันจากแหล่งอื่น

การปรับสูตรผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ตั้งแต่ในกระบวนการผลิตเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนของไขมันที่ดีต่อสุขภาพมากขึ้น โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีลดปริมาณไขมันสัตว์ในสูตรและ/หรือการทดแทนไขมันสัตว์ (ในระดับแตกต่างกัน) ด้วยไขมันชนิดอื่นที่มีผลดีต่อสุขภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไขมันสัตว์ ได้แก่ การมีกรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid: SFA) ต่ำลง มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (monounsaturated fatty acid: MUFA) หรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (polyunsaturated fatty acid: PUFA) สูงขึ้น มีสัดส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนชนิด n-6 ต่อ n-3 ที่เหมาะสมขึ้น มีสัดส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนต่อกรดไขมันอิ่มตัวเหมาะสมขึ้น รวมทั้งไม่มีโคเลสเตอรอล (Jimenez-Colmenero, 2007)

แนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ลดไขมัน จึงต้องเลือกสารทดแทนไขมันที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้ความสามารถในการอุ้มน้ำและไขมันของอิมัลชันเนื้อสัตว์ สมบัติด้านเนื้อสัมผัส รวมไปถึงการยอมรับโดยรวมของผู้บริโภคของผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (Zhuang และคณะ, 2016) การทดแทนไขมันด้วยน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม โดยทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวและยังเป็นการตัดแปรชนิดของกรดไขมันในเฟสไขมันให้มีผลกระทบเชิงลบต่อสุขภาพของมนุษย์น้อยลงรวมทั้งลดปริมาณโคเลสเตอรอลด้วย (Choi และคณะ, 2010; Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010a; Shao และคณะ, 2011; Youssef และคณะ, 2011) นอกจากนี้มีการใช้ส่วนผสมต่างๆ เพื่อลดปัญหาจากการลดปริมาณไขมัน โดยช่วยปรับปรุงความคงตัวและสมบัติด้านวิทยาการระสได้ (Jimenez-Colmenero, 1996; Hughes และคณะ, 1998; Crehan และคณะ, 2000; Choi และคณะ, 2009) รวมทั้งมีการเติมโปรตีนจากแหล่งอื่นเพื่อเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ เพิ่มความคงตัวให้กับไขมัน และช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยโปรตีนแต่ละชนิดมีกลไกการทำงานที่แตกต่างกันได้มาก (Youssef และ Barbut, 2011)

ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการทดแทนไขมันสัตว์ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ด้วยน้ำมันพืชชนิดต่างๆ กัน ได้แก่ น้ำมันมะกอก (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b; Herrero และคณะ, 2012) น้ำมันเมล็ดองุ่น (Choi และคณะ, 2010) น้ำมันเมล็ดแฟลกซ์ (Delgado-Pando และคณะ, 2011) น้ำมันคาโนลา (Youssef และ Barbut, 2011) น้ำมันข้าวโพด (Genccelep และคณะ, 2015) น้ำมันงา (Zhuang และคณะ, 2016) น้ำมันถั่วเหลือง (วรรณชยา และคณะ, 2556) และน้ำมันรำข้าว (ขนิษฐณีนิชา และประภาศรี, 2558) เป็นต้น

อย่างไรก็ดีการปริมาณลดไขมันและปรับปรุงโปรไฟล์ของไขมันโดยการทดแทนไขมันสัตว์ด้วยน้ำมันพืชหรือน้ำมันปลาเพียงชนิดเดียวจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้ไขมันหลายชนิดผสมกันเพื่อให้ได้โปรไฟล์ของไขมันที่เหมาะสม นอกจากนี้การทำให้ไขมันเกิดเป็นอิมัลชันมาก่อนเป็นวิธีที่ผสมน้ำมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ได้ผลดี (Delgado-Pando และคณะ, 2011)

## 2.4 ผลกระทบของการลดหรือทดแทนไขมันสัตว์ต่ออิมัลชันเนื้อสัตว์

### 2.4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของอิมัลชันเนื้อสัตว์

ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ประเภทลดขนาดชนิดบดละเอียด สร้างขึ้นจากโครงสร้างของอิมัลชันเนื้อสัตว์หรือแบตเทอร์เนื้อสัตว์ประกอบด้วยน้ำ โปรตีน ไขมัน และเกลือ โดยในการทำให้เกิดอิมัลชันเนื้อสัตว์นั้นส่วนผสมทั้งหมดจะผ่านการสับผสม (chopping) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ไขมันมีขนาดอนุภาคเล็กลงจนได้เป็นเม็ดไขมันขนาดเล็ก และเพื่อทำให้เกิดของผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน ผู้ผลิตจะพยายามสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่มีความคงตัวสูง ซึ่งเมื่อผ่านการให้ความร้อนเพื่อทำให้สุกแล้วจะไม่เกิดการแยกของน้ำและไขมันออกมา (Barbut, 1999)

ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ประเภทลดขนาดชนิดบดละเอียดนี้ใช้ส่วนผสมทั้งที่มาจากสัตว์ ได้แก่ เนื้อสัตว์ และไขมันสัตว์ เป็นหลัก รวมกับส่วนผสมที่ไม่ได้มาจากสัตว์ เช่น โปรตีนถั่วเหลืองสกัดเวย์โปรตีน สตาร์ช (Barbut, 1999)

ไขมันสัตว์เป็นส่วนผสมที่มีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ทั้งการทำหน้าที่เป็นเฟสไขมันในการเกิดโครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์ การทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์คงตัว การลดการสูญเสียน้ำหนักหลังทำให้สุก การเพิ่มการอุ้มน้ำ การเพิ่มความชุ่มน้ำ และการทำให้เนื้อสัมผัสมีความแข็งในระดับที่พอเหมาะ นอกจากนี้ไขมันยังเป็นแหล่งของสารให้กลิ่นรสต่างๆ อีกด้วย ดังนั้นการลดปริมาณไขมันลงอาจส่งผลกระทบต่อเชิงลบจนทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้ (Carballo และคณะ, 1995; Pietrasik และ Duda, 2000; Matsuishi, 2004; Yoo และคณะ, 2007; Cofrades และคณะ, 2008)

ความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์โดยทั่วไปแสดงด้วยค่าของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด (total fluid release: TFR) น้ำที่แยกได้ (water release: WR) และไขมันที่แยกได้ (fat release: FR) ในหน่วยร้อยละเทียบกับน้ำหนักของอิมัลชันเนื้อสัตว์ (Bloukas และ Honikel, 1992; Choi และคณะ, 2007; Cofrades และคณะ, 2008; Fernandez-Martin และคณะ, 2009; Choi และคณะ, 2010; Zhuang และคณะ, 2016)

Choi และคณะ (2010) ได้ศึกษาความคงตัวของระบบอิมัลชันเนื้อหมูที่ปรับลดปริมาณมันหมูจากนั้นทดแทนด้วยอิมัลชันน้ำมันเมล็ดองุ่นที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดร่วมกับการใช้เส้นใยจากรำข้าว (RBF) โดยเมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูร้อยละ 20 และไม่ผสมอิมัลชันน้ำมัน แต่เพิ่มน้ำแข็งเป็นร้อยละ 30 พบว่า ส่งผลให้ทั้งปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดและปริมาณไขมันที่แยกได้เพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า เทียบกับตัวอย่างควบคุม (ที่ใช้มันหมูร้อยละ 30 น้ำแข็งร้อยละ 20) เนื่องจากน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลรบกวนความแรงของไอออน (ionic strength) ในระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ ทำให้การสกัดโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์เกิดได้ต่ำลง การสร้างเมทริกซ์โปรตีนลดลง อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำลง ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสเกิดได้ต่ำลงส่งผลให้เม็ดไขมันรวมตัวกันง่าย เมทริกซ์ที่เกิดขึ้นมีความแน่นลดลงเพราะไม่มีไขมันทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่าง (gap filler หรือ fat spacer) (Barbut, 1999) เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูร้อยละ 20 และไม่ผสมอิมัลชันน้ำมัน แล้วทดแทนน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นด้วยเส้นใยร้อยละ 2 (เพิ่มน้ำแข็งเป็นร้อยละ 28) พบว่า ของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดและไขมันที่แยกได้ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม เนื่องจากเส้นใยมีความสามารถในการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นในระบบได้ (Choi และคณะ, 2010) และทำหน้าที่ช่วยเติมเต็มช่องว่าง ส่งผลให้เมทริกซ์โปรตีนมีความแน่นมากขึ้น สามารถกักเฟสไขมันไว้ได้แม้การเกิดฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสจากโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จะลดลงก็ตาม (Barbut, 1999) แต่เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมู ร้อยละ 15, 10 และ 5 ผสมกับอิมัลชันน้ำมัน ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยยังคงผสมเส้นใยร้อยละ 2 และเพิ่มน้ำแข็งเป็นร้อยละ 28 พบว่า ส่งผลให้ของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดลดลงจนต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ไขมันที่แยกได้ไม่เปลี่ยนแปลง โดยอิมัลชันเนื้อสัตว์ยังคงมีความคงตัวไม่แตกต่างกันแม้ลดมันหมูเหลือร้อยละ 5 จากผลของการทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำที่โปรตีนถั่วเหลืองสกัดสามารถสร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสห่อหุ้มหยดน้ำมัน และผลของเส้นใยจากรำข้าวที่ทำให้เมทริกซ์โปรตีนแน่นขึ้นและช่วยดูดซับน้ำ (Barbut, 1999; Choi และคณะ, 2010)

Jimenez-Colmenero และคณะ (2010b) ได้ศึกษาความคงตัวของระบบอิมัลชันเนื้อหมูในไส้กรอกแพรงค์เฟอร์เตอร์ที่ลดปริมาณมันหมูแต่ทดแทนด้วยเจลบุก โดยเมื่อใช้มันหมูร้อยละ 10.5 ผสมกับเจลบุกร้อยละ 10.5 และไม่มี การเพิ่มปริมาณน้ำแข็งจะพบว่า ปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด น้ำที่แยกได้ และไขมันที่แยกได้ ไม่มีความแตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (ที่ใช้มันหมูร้อยละ 21.1) เพราะเจลบุกผ่านการทำให้ดูดซับน้ำมาแล้ว แต่เมื่อใช้มันหมูร้อยละ 1.7 ผสมกับเจลบุกร้อยละ 19.3 พบว่า มีผลให้ของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด น้ำที่แยกได้ และไขมันที่แยกได้เพิ่มขึ้น โดยน้ำที่แยกได้

เพิ่มขึ้นมากกว่าไขมันที่แยกได้ เนื่องจากการสูญเสียน้ำของเจลบุกเมื่ออิมัลชันเนื้อสัตว์ผ่านความร้อน ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความแรงของอออนในระบบและการลดความเข้มข้นของโปรตีนจนต่ำกว่าความเข้มข้นที่จะเกิดเจลเนื่องจากการไม่มีการเพิ่มปริมาณน้ำแข็ง และน้ำที่เพิ่มขึ้นได้แทรกอยู่ในโครงสร้างของเจลบุกแล้ว เจลบุกยังทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างในเมทริกซ์โปรตีนเมื่อไขมันลดลง ส่งผลให้เมทริกซ์มีความแน่นเพิ่มขึ้น แข็งแรงมากขึ้น

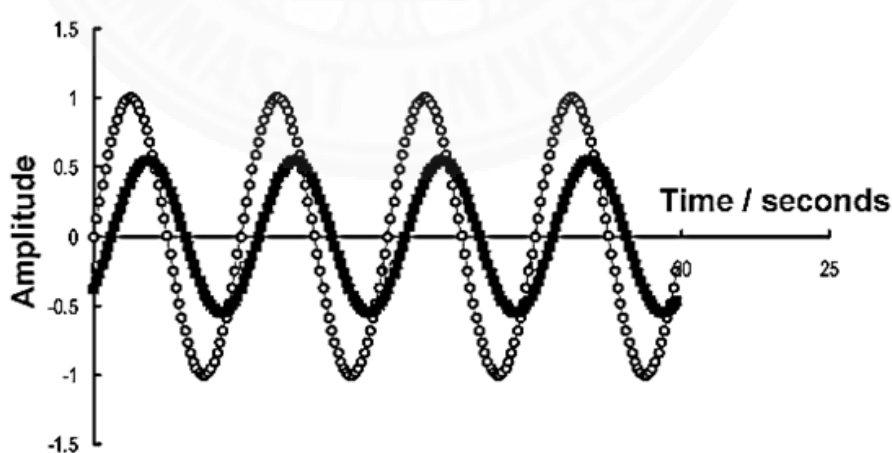
Youssef และ Barbut (2011) ได้ศึกษาความคงตัวของระบบอิมัลชันเนื้อวัวที่ทดแทนไขมันสัตว์ด้วยน้ำมันคาโนลาแซเย็นร่วมกับการใช้โปรตีนที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์ชนิดต่างกัน โดยเมื่อเพิ่มระดับโปรตีนให้เป็นร้อยละ 13 และ 14 ด้วยการเพิ่มปริมาณเนื้อวัวพบว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวต่ำลง ซึ่งปริมาณไขมันที่แยกได้จะสูงขึ้นมากเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ที่มีโปรตีนร้อยละ 12) เนื่องจากระดับโปรตีนที่สูงขึ้นส่งผลให้ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่ห่อหุ้มหยดน้ำมันมีความหนาเพิ่มขึ้น จนมีผลให้หยดน้ำมันขาดความอ่อนตัวที่จะรองรับการขยายตัวของน้ำมันเมื่ออิมัลชันเนื้อสัตว์ได้รับความร้อน ฟิล์มโปรตีนจึงฉีกขาดง่าย น้ำมันที่ไหลออกมาก่อให้เกิดโพรงภายในเมทริกซ์โปรตีนและเป็นช่องให้น้ำออกสู่ภายนอกได้ง่ายขึ้น แต่เมื่อใช้โปรตีนถั่วเหลืองชนิดที่เกิดเจลได้ต่ำและสูง (LGS และ HGS) ร้อยละ 1.5 ทดแทนโปรตีนเนื้อวัวพบว่า ที่ระดับโปรตีนต่ำ (ร้อยละ 12) อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวสูงขึ้นเทียบกับตัวอย่างควบคุม แต่ความคงตัวยังต่ำลงเมื่อระดับโปรตีนสูงขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกับเมื่อไม่ได้ทดแทนเนื้อวัวด้วยโปรตีนถั่วเหลือง แต่หยดน้ำมันที่มีฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่สร้างจากโปรตีนถั่วเหลืองห่อหุ้มจะแข็งแรงกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มที่สร้างจากโปรตีนไมโอโไฟบริลลาร์จากเนื้อวัว โดยโปรตีนถั่วเหลืองชนิดที่เกิดเจลได้ต่ำให้ผลในการรักษาฟิล์มโปรตีนได้มากกว่าชนิดที่เกิดเจลได้สูง นอกจากนี้เมื่อเทียบกับการใช้โปรตีนเวย์ธรรมชาติและชนิดที่ผ่านความร้อนมาแล้ว (NWP และ PWP) พบว่า ที่ระดับโปรตีนต่ำและระดับโปรตีนกลาง (ร้อยละ 12 และ 13) อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวไม่แตกต่างกัน ยกเว้นเมื่อใช้โปรตีนถั่วเหลืองชนิดที่เกิดเจลได้สูงที่ทำให้ความคงตัวต่ำกว่าการใช้โปรตีนเวย์ ส่วนที่ระดับโปรตีนสูง (ร้อยละ 14) โปรตีนเวย์ธรรมชาติยังรักษาความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์ให้สูงได้ไม่แตกต่างจากที่ระดับโปรตีนต่ำและกลาง เนื่องจากในโปรตีนถั่วเหลืองทั้ง 2 ชนิด ยังมีโปรตีนบางส่วนที่ทนความร้อนสูงมาก และจะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ระดับความร้อนที่อิมัลชันเนื้อสัตว์ได้รับ จึงส่งผลในการสร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสน้อยกว่า

Zhuang และคณะ (2016) ได้ศึกษาความคงตัวของระบบอิมัลชันเนื้อหมูที่ลดปริมาณมันหมูแล้วทดแทนด้วยอิมัลชันน้ำมันงาที่ผสมโปรตีนเคซีนร่วมกับการใช้โยอาหารจากอ้อย โดยเมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูร้อยละ 20 ผสมกับอิมัลชันน้ำมันร้อยละ 10 และยังไม่ได้ผสมโยอาหารพบว่า ปริมาณน้ำที่แยกได้ลดลงเกือบ 3 เท่า ขณะที่ไขมันที่แยกได้ลดลงเล็กน้อย เทียบกับสูตรควบคุม (ไขมันหมูร้อยละ 30 น้ำแข็งร้อยละ 20) เนื่องจากเมื่อใช้น้ำมันงาที่ทำให้เกิดเป็นอิมัลชันไปแล้ว ระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์จึงต้องการโปรตีนไมโอโไฟบริลลาร์เพื่อสร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสน้อยลง เรียกว่า

กระบวนการทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำ และส่งผลให้อิมัลชันน้ำมันกระจายเป็นหยดขนาดเล็กอย่างทั่วถึง เมทริกซ์โปรตีนอุ้มน้ำได้มากขึ้น เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูร้อยละ 10 ผสมกับอิมัลชันน้ำมันร้อยละ 10 และเพิ่มน้ำแข็งเป็นร้อยละ 30 และไม่ผสมโยอาหารพบว่า ส่งผลให้น้ำที่แยกได้เพิ่มขึ้นจนสูงกว่า ตัวอย่างควบคุม ขณะที่ไขมันที่แยกได้ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์มี ปริมาณน้ำมากเกินกว่าเมทริกซ์โปรตีนจะกักเอาไว้ได้ทั้งหมด และส่งผลให้ความหนืดของอิมัลชัน เนื้อสัตว์ลดลง และเมทริกซ์โปรตีนไม่ต่อเนื่องกันทั้งหมด ส่งผลให้มีโอกาสที่เฟสไขมันจะหลุดออกจาก เมทริกซ์ได้มากขึ้น (Barbut, 1999) อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูร้อยละ 10 โดยผสมกับ อิมัลชันน้ำมันร้อยละ 10 แล้วทดแทนน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้นด้วยโยอาหารร้อยละ 1-3 (มีการเพิ่มน้ำแข็งเป็น ร้อยละ 27-29) พบว่า ส่งผลให้น้ำที่แยกได้และไขมันที่แยกได้ลดลงมากเทียบกับตัวอย่างควบคุม และ ลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณโยอาหารสูงขึ้น เนื่องจากโยอาหารมีความสามารถในการดูดซับน้ำและไขมัน ที่สูงจากการผ่านการทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาก่อน

#### 2.4.2 สมบัติทางวิทยากระแสของอิมัลชันเนื้อสัตว์

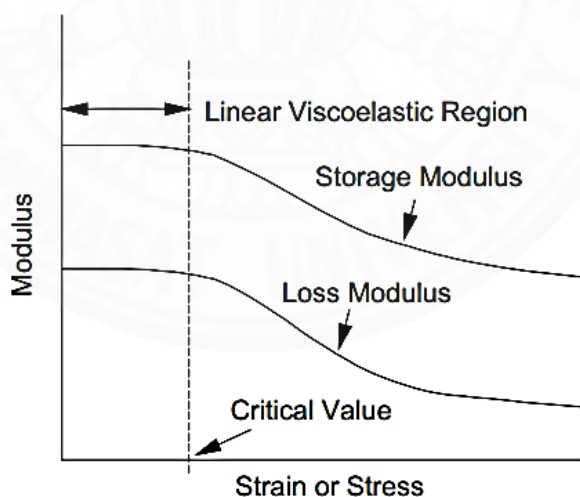
การวัดสมบัติทางวิทยากระแสด้วยการทดสอบแบบพลวัตประเภทไปกลับ (dynamic oscillatory testing) เป็นการให้ความเค้น (stress) หรือความเครียด (strain) กับตัวอย่าง ในลักษณะแปรผันเป็นจังหวะ (harmonic) แล้ววัดการตอบสนองของตัวอย่างในรูปของความเครียด หรือความเค้น ทั้งนี้นิยมทำให้ตัวอย่างเสียรูปร่างแบบเฉือน (shear deformation mode) คือ ให้แรง เฉือนกับตัวอย่างไปกลับรอบแกนหมุน (rotational axis) โดยจะกำหนดค่าแอมพลิจูดซึ่งสัมพันธ์กับ ความเค้นหรือความเครียดและความถี่ ดังรูปที่ 2.2 (Gunnasekaran และ Ak, 2000)



รูปที่ 2.2 การให้ความเค้นหรือความเครียดกับตัวอย่างแบบไปกลับและการตอบสนองของตัวอย่าง  
ที่มา: Picout และ Ross-Murphy (2003)

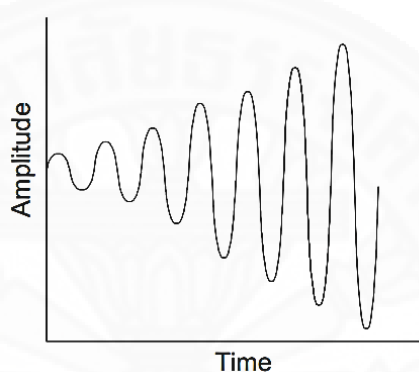
พารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งอ่านได้จากการทดสอบแบบพลวัตประเภทไปกลับ ประกอบด้วย (1) โมดูลัสสะสม (storage modulus:  $G'$ ) ซึ่งแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นหรือพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (solid-like) (2) โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus:  $G''$ ) ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมหนืดหรือพฤติกรรมคล้ายของเหลว (liquid-like) และ (3) แทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent:  $\tan \delta$ ) ซึ่งเท่ากับ อัตราส่วนระหว่าง  $G''$  ต่อ  $G'$  และมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $\infty$  โดยถ้ามีค่าน้อยหมายถึงวัสดุจะแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่น ค่ามากหมายถึงวัสดุจะแสดงพฤติกรรมหนืด (Gunnasekaran และ Ak, 2000; Picout และ Ross-Murphy, 2003)

การทดสอบแบบพลวัตประเภทไปกลับมีข้อดี คือ ไม่ทำลายตัวอย่าง และมีความไวสูง ทำให้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวอย่างในระดับโมเลกุลได้ เนื่องจากการทดสอบจะทำให้ตัวอย่างเสียรูปร่างในระดับต่ำ ด้วยการใช้แอมพลิจูดต่ำ (ความเค้นหรือความเครียดเฉือนระดับต่ำ) ส่งผลให้ความเค้นและความเครียดเฉือนแสดงความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง รวมทั้งโมดูลัสสะสมและโมดูลัสสูญเสียมีค่าคงที่ เรียกว่า ช่วงที่ความเค้นและความเครียดเฉือนสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (linear viscoelastic region: LVER) ดังรูปที่ 2.3 โดยถ้าใช้แอมพลิจูดเกินกว่าค่าวิกฤต จะส่งผลให้โมดูลัสกับความเค้นหรือความเครียดเฉือนไม่สัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นอีกต่อไป (Steffe, 1996; Barnes, 2000; Gunnasekaran และ Ak, 2000; Picout และ Ross-Murphy, 2003)



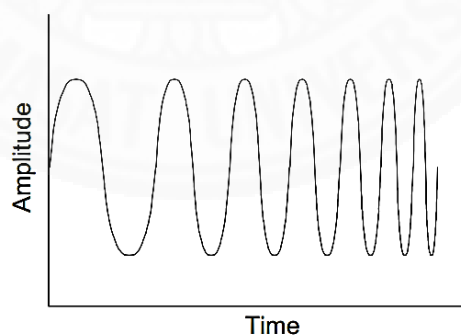
**รูปที่ 2.3** การทดสอบแบบพลวัตในช่วงที่ความเค้นและความเครียดเฉือนสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น  
ที่มา: Steffe (1996)

การทดสอบแบบพลวัตประเภทไปกลับอาจแบ่งวิธีการทดสอบได้เป็น 3 ลักษณะ หรือ 3 โหมด (mode) ดังรูปที่ 2.4 ถึง 2.6 ได้แก่ (1) การทดสอบโดยแปรผันแอมพลิจูด (amplitude sweep mode) กำหนดให้ความถี่และอุณหภูมิคงที่ เพื่อใช้หาช่วงที่ความเค้นและความเครียดเฉือนสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (2) การทดสอบโดยแปรผันความถี่ (frequency sweep mode) กำหนดให้ความเค้นเฉือนหรือความเครียดเฉือนคงที่และอุณหภูมิคงที่ และ (3) การทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิ (temperature sweep mode) กำหนดให้ความเค้นเฉือนหรือความเครียดเฉือนคงที่และความถี่คงที่ (Steffe, 1996; Picout และ Ross-Murphy, 2003)



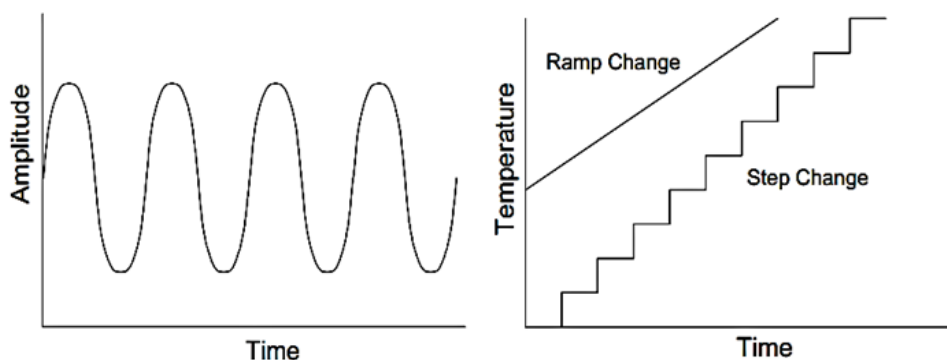
**รูปที่ 2.4** การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันแอมพลิจูด

ที่มา: Steffe (1996)



**รูปที่ 2.5** การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันความถี่

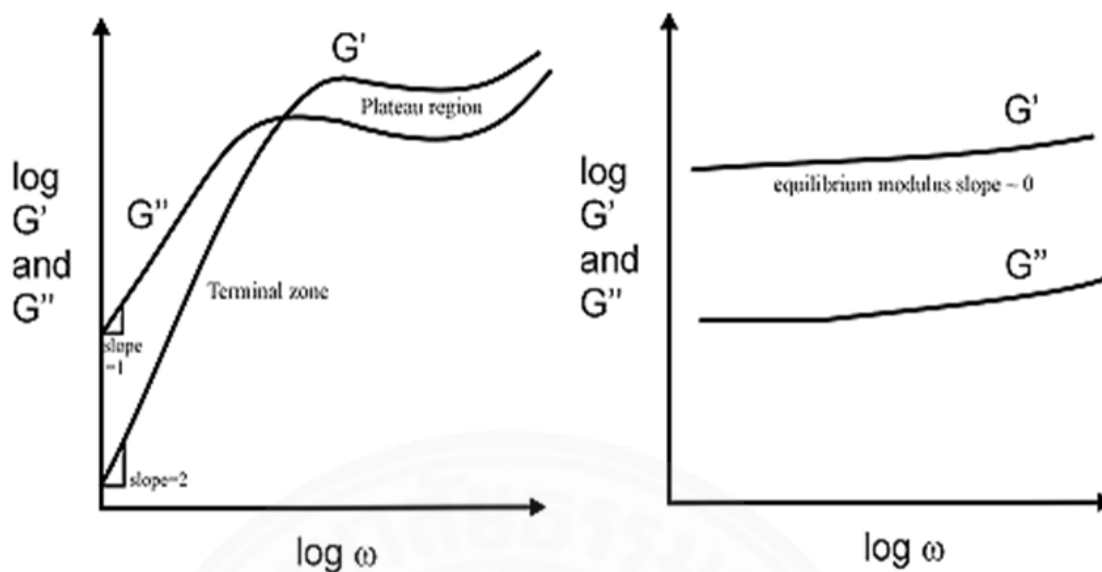
ที่มา: Steffe (1996)



รูปที่ 2.6 การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันอุณหภูมิ

ที่มา: Steffe (1996)

ทั้งนี้จากการทดสอบแบบแปรผันความถี่ ถ้าโมดูลัสสะสมมีค่าต่ำกว่าโมดูลัสสูญเสียจะแสดงว่าเป็นวัสดุประเภทสารละลาย ถ้าโมดูลัสสะสมมากกว่าโมดูลัสสูญเสียและรีโอแกรมไม่มีจุดตัดระหว่างโมดูลัสสะสมกับโมดูลัสสูญเสีย แสดงว่าเป็นวัสดุประเภทเจล ถ้าโมดูลัสสะสมกับโมดูลัสสูญเสียแปรผันตามความถี่ แสดงว่าเป็นเจลที่ไม่แข็งแรง (weak gel หรือ structured fluid) และถ้าโมดูลัสสะสมมีค่ามากกว่าโมดูลัสสูญเสียมากๆ แสดงว่าเป็นเจลที่มีความคงตัวสูง ดังรูปที่ 2.7 สำหรับการทดสอบแบบแปรผันอุณหภูมิใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงระหว่างเกิดเจล (gelation) และระบุจุดเกิดเจล (gel point) คือ อุณหภูมิที่เกิดเจลได้ ซึ่งหาได้จากจุดที่ความชันของรีโอแกรมระหว่างความหนืดเชิงซ้อน (complex viscosity:  $\eta^*$ ) กับอุณหภูมิ มากกว่า 0.01 หรือเมื่อแทนเจนต์สูญเสียไม่ขึ้นกับความถี่ (Gunnasekaran และ Ak, 2000)

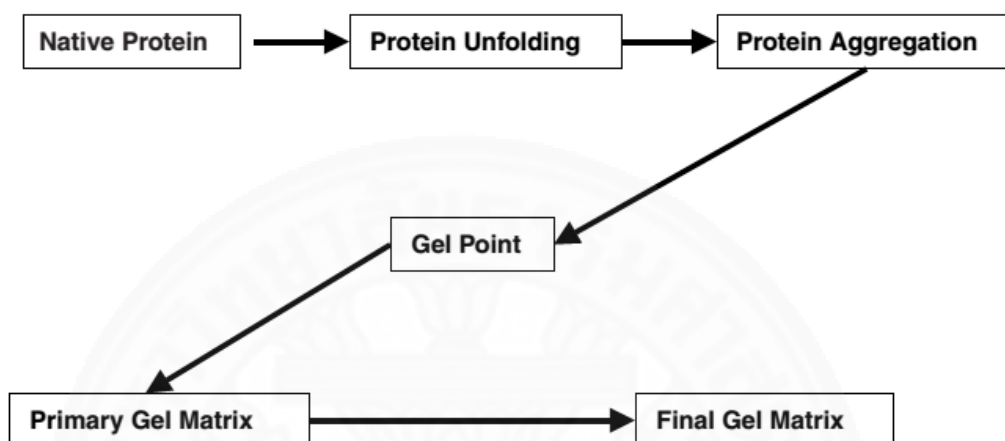


**รูปที่ 2.7** รีโอแกรมจากการทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันความถี่ของสารละลายและของเจล  
ที่มา: Picout และ Ross-Murphy (2003)

อิมัลชันเนื้อสัตว์มีลักษณะของวัสดุหยุ่นหนืด (viscoelastic material) คือ มีทั้งความยืดหยุ่นและความหนืดร่วมกัน โดยส่วนผสมของอิมัลชันเนื้อสัตว์มีผลต่อสมบัติทางวิทยากระแสดังนั้น การทดสอบแบบพลวัตประเภทไปกลับจึงใช้บอกความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์ได้เมื่อทดสอบโดยแปรผันความถี่ นอกจากนี้เนื่องจากการทดสอบแบบพลวัตมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลจึงถือว่า สามารถใช้เพื่อการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันเนื้อสัตว์ได้เช่นกัน (Gunnasekaran และ Ak, 2000)

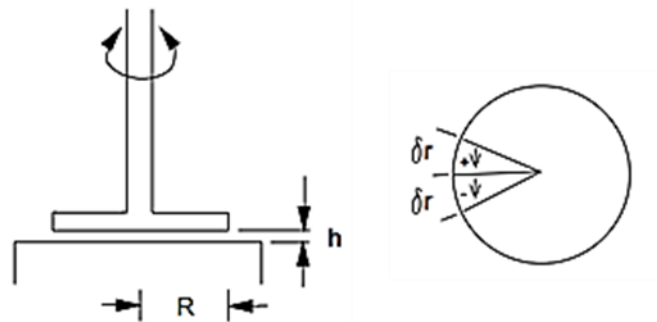
ขณะเดียวกันเมื่อทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิสามารถใช้เพื่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงของอิมัลชันเนื้อสัตว์ระหว่างการทำให้สุกด้วยความร้อนได้ หรือเป็นการติดตามการเกิดโครงสร้างเจลของอิมัลชันเนื้อสัตว์ ดังรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ยังใช้บอกความคงตัวของเจลที่เกิดขึ้นได้ทั้งขณะที่ให้ความร้อนเสร็จและเมื่อทำให้เย็นลงแล้ว ทั้งนี้ในระหว่างขั้นตอนการทำให้สุก อิมัลชันเนื้อสัตว์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ โดยในขั้นแรกไขมันจะค่อยๆ เกิดการหลอมเหลวและกลายเป็นน้ำมัน โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จะเกิดการเสียสภาพ และเกิดเจลซึ่งส่งผลให้โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์มีความสามารถในการอุ้มน้ำน้อยลง จากนั้นไขมันที่หลอมเหลวแล้วจะเริ่มเกิดการขยายตัว โปรตีนคอลลาเจนจะกลายเป็นเจลาตินที่เป็นของเหลว และโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จะสร้างเจลที่มีลักษณะยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 70-75 องศาเซลเซียส จะเกิดเป็นโครงสร้างที่มีเนื้อสัมผัสกึ่งแข็ง (semi-rigid) ไม่สามารถไหลไปมาได้เหมือนกับขณะที่ยังไม่ผ่านความร้อนอีก เนื่องจากโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์เกิดการเสียสภาพอย่างมากและเซ็ทตัวเป็นเจล (Barbut, 1999) ทั้งนี้การเกิดเจลเป็น

สมบัติที่สำคัญที่สุดของโปรตีนในอิมัลชันเนื้อสัตว์ โดยเปลี่ยนพฤติกรรมของอิมัลชันเนื้อสัตว์จากคล้ายของเหลวไปเป็นคล้ายของแข็ง และการเกิดโครงสร้างเจลโปรตีนในอิมัลชันเนื้อสัตว์ยังมีความสำคัญต่อเนื้อสัมผัสที่ต้องการของผลิตภัณฑ์และความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่สุกแล้ว (Dickinson และ Casanova, 1999)

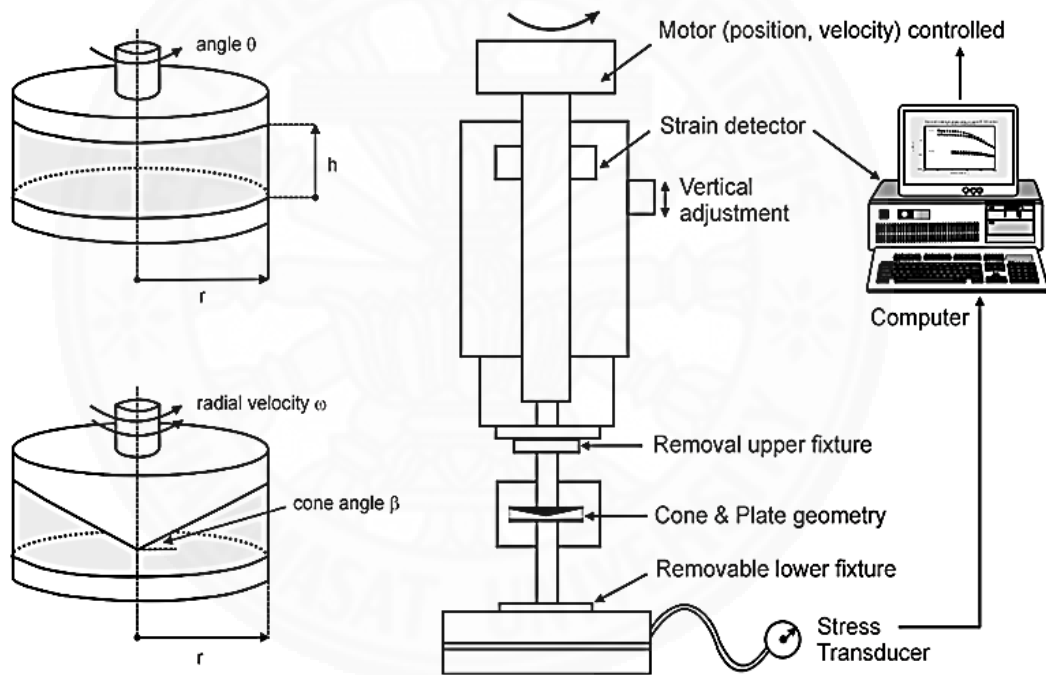


**รูปที่ 2.8** ขั้นตอนการเกิดเจลของโปรตีนที่เหนียวนำด้วยความร้อน  
ที่มา: Sams (2001)

เครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบพลวัตประเภทไปกลับ คือ รีโอมิเตอร์ ซึ่งมีทั้งแบบควบคุมความเค้นที่ให้กับตัวอย่างอาหารให้คงที่แล้ววัดความเครียดที่ตัวอย่างตอบสนอง หรือแบบควบคุมความเครียดแล้ววัดความเค้น หัววัดที่ใช้กับรีโอมิเตอร์มีหลายแบบซึ่งแบบที่นิยมใช้กับตัวอย่างที่เป็นอาหารกึ่งแข็ง เช่น อิมัลชันเนื้อสัตว์ จะใช้แบบแผ่นแบนขนานกัน (plate and plate) และแบบกรวยกับแผ่นแบน (cone and plate) โดยบรรจุตัวอย่างอาหารระหว่างชิ้นส่วนของหัววัด 2 ชิ้น ซึ่งประกบอยู่ด้านบนกับด้านล่าง เคลื่อนที่แบบหมุนไปกลับ (oscillatory rotation) ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 (Steffe, 1996; Gunnasekaran และ Ak, 2000; Picout และ Ross-Murphy, 2003)



รูปที่ 2.9 หัววัดแบบแผ่นแบนขนานกันของรีโอมิเตอร์และการเคลื่อนที่แบบหมุนไปกลับ  
ที่มา: Steffe (1996)



รูปที่ 2.10 หัววัดและส่วนประกอบของรีโอมิเตอร์  
ที่มา: Picout และ Ross-Murphy (2003)

Marchetti และคณะ (2013) ได้ศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสของระบบอิมัลชันเนื้อวุ้นที่ทดแทนไขมันวัวด้วยอิมัลชันน้ำมันปลาที่ผสมสารยึดเกาะ (binder) ประเภทโปรตีนที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์และไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ด้วยการทดสอบแบบพลวัต โดยเมื่อทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิพบว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์ทุกสูตรมีความอดุลีเสถียรสูงขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ขณะที่แทนเจนต์สูญเสียลดลงบ่งชี้ว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคล้ายของแข็งหรือมีพฤติกรรมยืดหยุ่นมากขึ้นจากการเกิด

เจล ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารยึดเกาะที่ส่งผลให้อิมัลชันน้ำมันมีสมบัติทางวิทยากระแสด่างกัน โดยแสดงด้วยมอดูลัสสูงสุดเมื่อสิ้นสุดการให้ความร้อนสำหรับอิมัลชันเนื้อสัตว์สูตรควบคุมที่ใช้ไขมันวัวพบว่า มีค่ามอดูลัสสูงสุดต่ำ เนื่องจากไขมันหลอมเหลวหลังให้ความร้อนและยังไม่แข็งตัวใหม่ นอกจากนี้ยังพบว่า โปรตีนนมเข้มข้น (milk protein concentrate) เป็นโปรตีนที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์ที่ส่งผลให้อิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทดแทนไขมันวัวด้วยน้ำมันปลาที่มีความคงตัวสูงสุด โดยเคซีนที่เป็นโปรตีนส่วนใหญ่ในโปรตีนนมเกิดโครงสร้างตติยภูมิและทุติยภูมิน้อยมากจึงเสียสภาพไม่มากเมื่อผ่านความร้อน และช่วยรักษาฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสของอิมัลชันน้ำมันให้คงอยู่ได้มากกว่าโปรตีนชนิดอื่น

Genccelep และคณะ (2015) ได้ศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสดของแบบจำลองระบบอิมัลชันเนื้อวัวที่ทดแทนไขมันสัตว์ด้วยน้ำมันข้าวโพดร่วมกับการใช้สตาร์ชมันฝรั่งดิบและสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างๆ ด้วยการทดสอบแบบพลวัต โดยเมื่อทดสอบโดยแปรผันความถี่พบว่า มอดูลัสของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ผสมสตาร์ชมันฝรั่งทุกชนิดสูงกว่ามอดูลัสสูญเสียและไม่เกิดการตัดกันระหว่างมอดูลัสและมอดูลัสสูญเสียชี้ให้เห็นว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคล้ายของแข็งมากกว่าคล้ายของเหลว มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น และมีลักษณะเป็นเจล แต่เป็นเจลที่ไม่แข็งแรง เนื่องจากมอดูลัสแปรผันตามความถี่

Felisberto และคณะ (2015) ศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสดของระบบอิมัลชันเนื้อวัวที่ลดปริมาณไขมันสัตว์และเกลือแล้วทดแทนด้วยสารเพิ่มเนื้อที่มีสมบัติพรีไบโอติก (pre-biotic extender) ชนิดต่างๆ ด้วยการทดสอบแบบพลวัต โดยเมื่อทดสอบโดยแปรผันความถี่พบว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคล้ายของแข็งมากกว่าคล้ายของเหลวและมีลักษณะเป็นเจล โดยอิมัลชันเนื้อสัตว์ทุกสูตรมีค่ามอดูลัสสูงกว่ามอดูลัสสูญเสีย และไม่พบการตัดกันระหว่างมอดูลัสกับมอดูลัสสูญเสีย แต่เนื่องจากมอดูลัสมีการแปรผันตามความถี่ที่ใช้วัดจึงชี้ให้เห็นว่า เป็นเจลประเภทที่ไม่แข็งแรง ทั้งนี้เมื่อลดไขมันเหลือร้อยละ 10 ลดเกลือเหลือร้อยละ 1 และผสมสตาร์ชต้านทานการย่อย (resistant starch) พบว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวสูงที่สุด โดยมีค่ามอดูลัสสูงสุดและสูงกว่าสูตรควบคุม (ไขมันร้อยละ 20 เกลือร้อยละ 2)

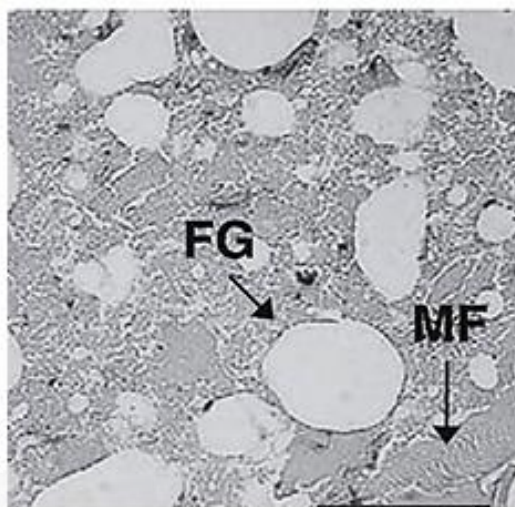
เมื่อทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิพบว่า การให้ความร้อนส่งผลให้มอดูลัสของอิมัลชันเนื้อสัตว์ทุกสูตรสูงขึ้นชี้ให้เห็นว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคล้ายของแข็งเพิ่มขึ้นมีพฤติกรรมยืดหยุ่นมากขึ้นจากการเกิดโครงสร้างเจลของโปรตีน อุณหภูมิจุดเกิดเจลของอิมัลชันเนื้อสัตว์จะสูงขึ้นเมื่อผสมสารเพิ่มเนื้อทุกชนิดเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากมีการรบกวนการเสียสภาพของโปรตีนด้วยการดูดซับน้ำของสารเพิ่มเนื้อ การเปรียบเทียบมอดูลัสสูงสุดหลังสิ้นสุดการให้ความร้อนและทำให้เย็นแล้วพบว่า ไม่แตกต่างกัน ยกเว้นเมื่อผสมพอลิเดกซ์โทรสที่ส่งผลให้มอดูลัสต่ำที่สุด ส่วนการใช้สตาร์ชต้านทานการย่อยมีผลให้มอดูลัสสูงกว่าการใช้สารเพิ่มเนื้อชนิดอื่น

Hu และคณะ (2016) ได้ศึกษาสมบัติวิทยาการแอสของระบบอิมัลชันเนื้อหมูในไส้กรอกที่ลดปริมาณมันหมูแล้วทดแทนด้วยอิมัลชันน้ำมันถั่วเหลืองที่ผสมเซลลูโลส เมื่อทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันอุณหภูมิพบว่า การให้ความร้อนจะส่งผลให้มอดูลัสสะสมของอิมัลชันเนื้อสัตว์ทุกสูตรสูงขึ้น แสดงถึงการเกิดเจลในโครงสร้างของอิมัลชันเนื้อสัตว์ การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสมแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ที่อุณหภูมิทรานซิชันแตกต่างกัน ได้แก่ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 40-48 องศาเซลเซียส มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากการจับกลุ่มเข้าด้วยกันของส่วนหัวของโปรตีนไมโอซิน (myosin head aggregation) เกิดเจลที่ไม่แข็งแรงและไม่คงสภาพ ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 47-54 องศาเซลเซียส มอดูลัสสะสมจะลดลงเนื่องจากการคลายตัวที่ส่วนหางของโปรตีนไมโอซิน (myosin tail unfolding) ส่งผลให้เจลหายไป และช่วงที่ 3 อุณหภูมิตั้งแต่ 55 องศาเซลเซียส ขึ้นไป มอดูลัสสะสมจะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงค่าสูงสุด เนื่องจากเกิดเจลของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่คงสภาพอยู่ได้

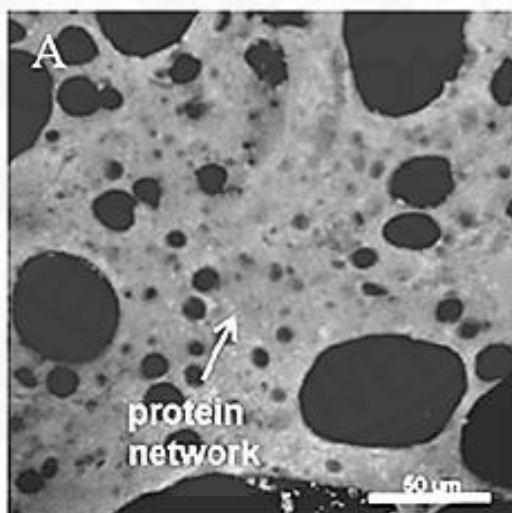
การลดมันหมูและทดแทนด้วยอิมัลชันน้ำมันไม่มีผลให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสมแตกต่างกัน แต่เมื่อเทียบมอดูลัสสะสมสูงสุดหลังสิ้นสุดการให้ความร้อนพบว่า เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูร้อยละ 50 ผสมกับอิมัลชันน้ำมันร้อยละ 50 จะส่งผลให้มอดูลัสสะสมสูงสุดมีค่าสูงที่สุด ขณะที่เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูร้อยละ 25, 75 หรือ 100 ผสมกับอิมัลชันน้ำมันร้อยละ 75, 25 หรือ 0 พบว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกแล้วจะมีค่ามอดูลัสสะสมสูงสุดต่ำกว่าและไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (ใช้มันหมูเป็นเฟสไขมันร้อยละ 100) เนื่องจากเมื่อใช้อิมัลชันน้ำมันไม่เกินร้อยละ 50 จะไม่มีผลรบกวนการเกิดเมทริกซ์โปรตีน โดยอิมัลชันน้ำมันทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างแทนมันหมูที่หายไปเมทริกซ์และทำให้เมทริกซ์มีความแน่นมากขึ้น เกิดเจลที่แข็งแรงมีความคงตัวมากกว่า แต่เมื่อใช้อิมัลชันน้ำมันร้อยละ 50 ขึ้นไป จะรบกวนการสร้างเมทริกซ์ส่งผลให้เจลแข็งแรงน้อยกว่า

#### 2.4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่มีน้ำมันเป็นเฟสไขมัน

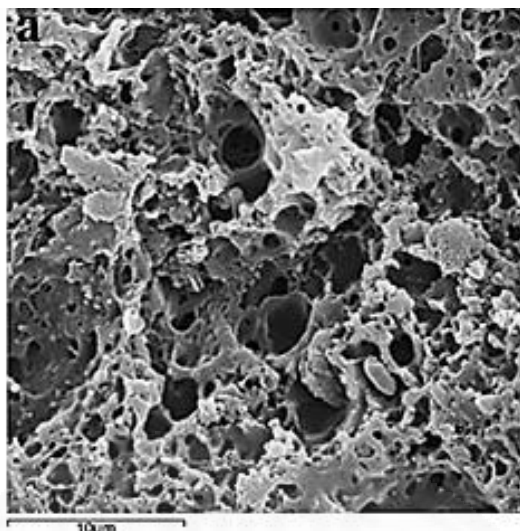
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาระดับจุลภาคของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกแล้วสามารถเลือกใช้เครื่องมือได้หลายชนิด โดยภาพที่ปรากฏจะแตกต่างกันไปขึ้นกับหลักการทำงาน ดังรูปที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 และยังสามารถใช้เพื่ออธิบายทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและไขมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์ได้ ทั้งนี้วิธีซึ่งที่นิยมใช้ ได้แก่ (1) จุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscopy) (2) จุลทรรศน์คอนโฟคัลแบบใช้เลเซอร์ส่องกราด (confocal laser scanning microscopy: CLSM) (3) จุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กทรอนิกส์ส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) (Delgado-Pando และคณะ, 2011; Alvarez และ Barbut, 2013; Schuh และคณะ, 2013)



**รูปที่ 2.11** โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันเนื้อสัตว์หลังทำให้สุกเมื่อใช้จุลทรรศน์แบบใช้แสง  
ที่มา: Alvarez และ Barbut (2013)



**รูปที่ 2.12** โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันเนื้อสัตว์หลังทำให้สุกเมื่อใช้จุลทรรศน์คอนโฟคัลแบบ  
ใช้เลเซอร์ส่องกราด  
ที่มา: Schuh และคณะ (2013)



**รูปที่ 2.13** โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันเนื้อสัตว์หลังทำให้สุกเมื่อใช้จุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กตรอนส่องกราด

ที่มา: Delgado-Pando และคณะ (2011)

การใช้จุลทรรศน์แบบใช้แสงและจุลทรรศน์คอนโฟคัลแบบใช้เลเซอร์ส่องกราดจะให้ภาพ 2 มิติ เนื่องจากกลไกการสร้างภาพเป็นแบบฉายภาพ (image projection) โดยให้แสง (visible light) และเลเซอร์ไปสะท้อนกับพื้นผิวของตัวอย่างอาหาร ตามลำดับ ขณะที่จุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กตรอนส่องกราดให้ภาพ 3 มิติ เนื่องจากกลไกเป็นการส่งอิเล็กตรอนลงไปบนพื้นผิวของตัวอย่างอาหาร (Morris และ Groves, 2013)

เมื่อใช้จุลทรรศน์แบบใช้แสงและจุลทรรศน์คอนโฟคัลแบบใช้เลเซอร์ส่องกราดกับตัวอย่างอิมัลชันเนื้อสัตว์จะมองเห็นเม็ดไขมัน (หรือโพรงอากาศในบางกรณี) มีรูปร่างกลม ขณะที่ส่วนของเมทริกซ์โปรตีนมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่ต่อเนื่องกัน ภาพจากจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะมองเห็นเม็ดไขมันเป็นสีขาวและเมทริกซ์โปรตีนเป็นสีเทาโดยใช้สีย้อมสำหรับตัวอย่างทางชีวภาพตามปกติ แต่ภาพจากจุลทรรศน์คอนโฟคัลแบบใช้เลเซอร์ส่องกราดจะมองเห็นเม็ดไขมันเป็นสีดำและเมทริกซ์โปรตีนเป็นสีขาวโดยใช้สีย้อมที่จำเพาะกับโปรตีน ทั้งนี้สามารถเลือกสีที่จำเพาะต่อโปรตีนและไขมันคือ คาลโคฟลูออไรท์ (Calcofluor white) และไนล์เรด (Nile red) ซึ่งเมื่อแสงเลเซอร์มากระทบจะเกิดปรากฏการณ์เรืองแสงได้ (Alvarez และ Barbut, 2013; Schuh และคณะ, 2013)

การใช้จุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กตรอนส่องกราดจะเห็นโครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์มีลักษณะเป็นฟองน้ำ (spongy) หรือคล้ายรังผึ้ง (honeycomb-like) โดยมีรูพรุนจำนวนมาก และมีผิวสัมผัสที่มีความละเอียด ซึ่งรูพรุนอาจเกิดจากการขยายตัวของส่วนผสมในอิมัลชันเนื้อสัตว์ ได้แก่

ไขมัน น้ำ และอากาศ (Cavestany และคณะ, 1994; Carballo และคณะ, 1996a; Carballo และคณะ, 1996b; Delgado-Pando และคณะ, 2011) ทั้งนี้การมีช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อในสัดส่วนที่สูงแสดงให้เห็นว่า มีปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นในเมทริกซ์โปรตีน โดยเฉพาะในอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่มีไขมันต่ำ (Morin และคณะ, 2004) ในขณะที่โครงสร้างที่ละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกันโดยมีรูพรุนขนาดเล็กหรือช่องว่างจำนวนมากของเมทริกซ์โปรตีนส่งผลให้มีความสามารถดูดซับและความสามารถในการอุ้มน้ำมากกว่าเทียบกับโครงสร้างที่หยาบและมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Hermansson, 1985)

Jimenez-Colmenero และคณะ (2010b) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของระบบอิมัลชันเนื้อหมูในไส้กรอกแพรงเฟอร์เตอร์ที่ทำให้สุกแล้ว ที่ทดแทนมันหมูด้วยอิมัลชันน้ำมันมะกอกซึ่งใช้ระบบที่ทำให้อิมัลชันน้ำมันคงตัวแตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ (1) โปรตีนเคซีน (2) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (3) โปรตีนเคซีนผสมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ (4) โปรตีนเคซีนผสมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์และเนื้อหมูที่สับผสมแล้ว (meat slurry) และ (5) โปรตีนถั่วเหลืองสกัดผสมกับโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ ด้วยการใช้จุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กทรอนิกส์ส่องกราดโดยพบว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์สูตรควบคุม (ไขมันหมูเป็นเฟสไขมัน) มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาตามปกติที่พบในอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกแล้ว โดยมีลักษณะเป็นฟองน้ำ และมีรูพรุนจำนวนมาก ส่วนใหญ่เป็นรูที่มีรูปร่างกลมรี ขนาดใหญ่

เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นอิมัลชันน้ำมันมะกอกพบว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์สูญเสียลักษณะที่เป็นฟองน้ำและมีรูพรุนน้อยลง เนื่องจากหยดน้ำมันมีขนาดเล็กกระจายตัวได้ดีและแทรกตัวเข้าไปอยู่ภายในเมทริกซ์โปรตีน โครงสร้างเมทริกซ์ถูกรบกวน แต่เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นอิมัลชันน้ำมันที่มีเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นส่วนผสม โครงสร้างมีลักษณะเป็นฟองน้ำมากขึ้นแต่มีรูพรุนเล็กกว่าอิมัลชันเนื้อสัตว์สูตรควบคุม เนื่องจากผลของพันธะเชื่อมโยงที่เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสสร้างขึ้นในฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่ห่อหุ้มหยดน้ำมัน ส่งผลให้หยดน้ำมันมีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้ผลจากการศึกษาข้างชี้ให้เห็นว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางสัณฐานวิทยากับลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันเนื้อสัตว์ในไส้กรอกแพรงเฟอร์เตอร์ลดไขมันที่ใช้ไขมันเป็นเฟสไขมัน โดยระบบที่ทำให้อิมัลชันน้ำมันคงตัวที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาอย่างชัดเจน

Delgado-Pando และคณะ (2011) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของระบบอิมัลชันเนื้อหมูที่ทำให้สุกแล้ว ที่ทดแทนมันหมูด้วยอิมัลชันน้ำมันผสม (น้ำมัน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันมะกอก น้ำมันเมล็ดแฟลกซ์ และน้ำมันปลา) ซึ่งใช้ระบบที่ทำให้อิมัลชันน้ำมันคงตัวแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ (1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (2) โปรตีนเคซีน (3) โปรตีนถั่วเหลืองสกัดผสมกับโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ ด้วยการใช้จุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กทรอนิกส์ส่องกราด โดยเมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูพบว่า โครงสร้างเมทริกซ์โปรตีนของอิมัลชันเนื้อสัตว์มีรูพรุนมากและมีโครงสร้างเป็นฟองน้ำ เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นอิมัลชันน้ำมันผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือโปรตีนเคซีน

อิมัลชันน้ำมันจะรบกวนการเกิดเมทริกซ์โปรตีนในอิมัลชันเนื้อสัตว์ ส่งผลให้เมทริกซ์มีลักษณะอัดแน่น (compact) มีรูพรุนน้อยลง เนื่องจากขั้นตอนทำให้เกิดอิมัลชันน้ำมันมีผลให้หยดน้ำมันมีขนาดเล็กกว่าเม็ดไขมันของมันหมู หยดน้ำมันจึงกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีและฝังตัวในเมทริกซ์โปรตีน นอกจากนี้เมื่อหยดน้ำมันมีฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่สร้างขึ้นจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือเคซีน ห่อหุ้มจะจำกัดการเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ กลไกการทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์คงตัวจึงอธิบายด้วยทฤษฎีการกักไขมันทางกายภาพเป็นหลัก

ขณะที่เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นอิมัลชันน้ำมันผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โปรตีนเคซีน และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสพบว่า มีผลรบกวนการเกิดเมทริกซ์โปรตีนของอิมัลชันเนื้อสัตว์น้อยลง โครงสร้างมีรูพรุนมากขึ้น เป็นฟองน้ำมากขึ้น และเนื้อสัมผัสแข็งขึ้น โดยเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจะสร้างพันธะเชื่อมโยกระหว่างกรดอะมิโนไลซีนและกลูตามีนทั้งในโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โปรตีนเคซีน และโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ ส่งผลให้ความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์สูงขึ้น หยดน้ำมันมีอันตรกิริยากับเมทริกซ์โปรตีนมากขึ้น ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่ห่อหุ้มหยดน้ำมันยังมีความแข็งแรงขึ้น และอิมัลชันน้ำมันยังมีลักษณะคล้ายเจลด้วยส่งผลให้การกระจายตัวของหยดน้ำมันใกล้เคียงกับเม็ดไขมันมากขึ้น

Alvarez และ Barbut (2013) ได้ศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคของระบบอิมัลชันเนื้อหมูที่ทำให้สุกแล้ว ที่ลดปริมาณมันหมูแล้วทดแทนด้วยอินูลิน (inulin) เบตากลูแคน ( $\beta$ -glucan) หรือการเพิ่มปริมาณน้ำแข็ง ด้วยการใช้อุณหภูมิแช่แข็ง โดยเมื่อใช้มันหมูร้อยละ 12.5 และร้อยละ 5 แล้วทดแทนด้วยน้ำแข็งเพียงอย่างเดียวพบว่า การลดมันหมูส่งผลให้จำนวนเม็ดไขมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์ลดลงเทียบกับอิมัลชันเนื้อสัตว์สูตรควบคุม (มันหมูร้อยละ 20 และน้ำแข็งร้อยละ 16) แต่ขนาดและรูปร่างของเม็ดไขมันไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้เมื่อเฟสไขมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์ลดลงส่งผลให้สัดส่วนของเมทริกซ์โปรตีนเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการทำให้สุกด้วยความร้อนจะมีผลให้เมทริกซ์หดตัวมากขึ้นเนื่องจากไม่มีเม็ดไขมันช่วยพยุงโครงสร้างเอาไว้ ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักหลังทำให้สุกมีค่าสูงขึ้น สำหรับอิมัลชันเนื้อสัตว์สูตรควบคุมยังพบว่า เม็ดไขมันจะเริ่มเกิดการรวมตัวกันใหม่ โดยจะเกิดเป็นช่อง (channel) ที่เชื่อมระหว่างเม็ดไขมันและเป็นสาเหตุให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีปริมาณไขมันที่แยกได้สูงขึ้นเมื่อปริมาณเฟสไขมันเพิ่มขึ้น

เมื่อใช้มันหมูร้อยละ 12.5 และร้อยละ 5 แล้วทดแทนด้วยอินูลินที่เตรียมเป็นเจลไว้ล่วงหน้าร้อยละ 17.1 พบว่า อินูลินเจลกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและเกาะกลุ่มเป็นก้อน มีผลไปรบกวนการสร้างเมทริกซ์โปรตีนและส่งผลให้เมทริกซ์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่ต่อเนื่องกันโดยเฉพาะเมื่อใช้มันหมูร้อยละ 5 ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกแล้วมีความแข็งแรงลดลง ขณะที่เมื่อทดแทนด้วยอินูลินร้อยละ 6.7 หรือเบตากลูแคนร้อยละ 6 พบว่า มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่รบกวนการเกิดเมทริกซ์โปรตีนส่งผลให้เมทริกซ์มีลักษณะต่อเนื่องกัน อินูลินและเบตากลูแคนเกิดเป็นเจลและทำหน้าที่เติมเต็มในช่องว่างของเมทริกซ์ทดแทนการขาดหายไปของมันหมูได้

#### 2.4.4 อันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและน้ำมันพืชในอิมัลชันเนื้อสัตว์

อันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและน้ำมันเป็นกลไกสำคัญในการสร้างและรักษาความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์ โดยเฉพาะการอธิบายการเกิดอิมัลชันเนื้อสัตว์ด้วยทฤษฎีฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟส วิธีวิเคราะห์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของทั้งโปรตีนและน้ำมันได้ จึงเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการอธิบายทฤษฎีดังกล่าว เช่น ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR)

Herrero และคณะ (2011a) ได้ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและไขมันในระบบอิมัลชันน้ำมันมะกอก ซึ่งใช้ระบบที่ทำให้อิมัลชันคงตัวแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ (1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (2) โปรตีนถั่วเหลืองสกัดซึ่งผสมกับโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์โดยพบว่า ความเป็นระเบียบของสายไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันลดลง เคลื่อนที่มากขึ้น เมื่อเกิดอิมัลชันน้ำมันที่มีฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสห่อหุ้มหยดน้ำมัน โดยหมู่ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำของโปรตีนส่วนหนึ่งแทรกเข้าไปในสายไฮโดรคาร์บอนของน้ำมัน และอันตรกิริยาของหมู่ที่มีสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้นจากเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่สร้างพันธะเชื่อมโยง หมู่ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงเผยออกมาที่ผิวหน้าของโปรตีนมากขึ้น เมื่อมีอันตรกิริยาระหว่างน้ำมันกับโปรตีนมากจึงแสดงว่าอิมัลชันน้ำมันมีความคงตัวสูง

นอกจากนี้พบว่า โครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีนส่วนใหญ่ในระบบอิมัลชันน้ำมันเป็นแบบเบตาชีท แต่เมื่อเกิดอิมัลชันน้ำมันจะมีโครงสร้างแบบเกลียวแอลฟามากขึ้น เนื่องจากโปรตีนสร้างฟิล์มระหว่างเฟสและจัดเรียงตัวใหม่ โดยอิมัลชันน้ำมันที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โปรตีนเคซีน และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส มีโครงสร้างหลักที่ไม่เป็นระเบียบ (unordered backbone) ลดลงเมื่อเอนไซม์ทำให้โปรตีนเชื่อมกันมากขึ้น มีระเบียบมากขึ้น และเกิดโครงสร้างเบตาชีทมากขึ้น ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า แม้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจะไม่เกิดปฏิกิริยากับโปรตีนถั่วเหลืองตามธรรมชาติ แต่เมื่อโปรตีนดูดซับที่หยดน้ำมันและมีโครงสร้างเปลี่ยนไปจึงส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์ได้ อีกทั้งการมีโปรตีน 2 ชนิดผสมกัน จะมีการแข่งขันไปดูดซับที่ผิวของหยดน้ำมันและมีผลให้ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสประกอบด้วยโปรตีน 2 ชนิดผสมกัน

Herrero และคณะ (2011b) ได้ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและไขมันในระบบอิมัลชันน้ำมันมะกอก ซึ่งใช้ระบบที่ทำให้อิมัลชันคงตัวแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ (1) โปรตีนเคซีน (2) โปรตีนเคซีนผสมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ โดยพบว่า เมื่อเกิดอิมัลชันน้ำมัน โปรตีนเคซีนจะแทรกเข้าไปในสายไฮโดรคาร์บอนของน้ำมัน ส่งผลให้ความเป็นระเบียบน้อยลง เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสยังทำให้เคซีนเกิดพันธะเชื่อมโยงส่งผลให้เคซีนมีโครงสร้างแบบเส้นตรง (linear) ลดลง มีลักษณะกลม (globular) มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีนส่วนใหญ่ในระบบอิมัลชันน้ำมันเป็นแบบเบตาชีทมากกว่าเกลียวอัลฟาแต่ส่วนใหญ่ไม่ใช่เบตาชีท และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้มีการสร้างเกลียวอัลฟาของเคซีนเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเกิดอิมัลชันน้ำมัน

ที่มีเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสผสมส่งผลให้เคซีนมีโครงสร้างแบบเกลียวอัลฟาและเบตาซีทเพิ่มขึ้น มีโครงสร้างหลักที่เป็นระเบียบมากขึ้น สร้างพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้น และทำให้หมู่ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำของเคซีนเกิดอันตรกิริยากับหยดน้ำมันมากขึ้น

Herrero และคณะ (2012) ได้ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนและไขมันในระบบอิมัลชันเนื้อหมูในไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์ที่ทดแทนมันหมูด้วยอิมัลชันน้ำมันมะกอกซึ่งใช้ระบบที่ทำให้อิมัลชันคงตัวแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ (1) โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (2) โปรตีนถั่วเหลืองสกัดผสมกับโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ โดยพบว่า การสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์โดยใช้อิมัลชันน้ำมันเป็นเฟสไขมันมีผลให้สายไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เมทริกซ์โปรตีนในอิมัลชันเนื้อสัตว์มีอันตรกิริยาน้อยมากกับอิมัลชันน้ำมัน หรืออีกนัยหนึ่ง โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในเนื้อไม่ได้สร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสห่อหุ้มหยดอิมัลชันน้ำมัน เพราะหยดน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันมีฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่สร้างจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ผสมกับโปรตีนเคซีนห่อหุ้มอยู่แล้ว หยดน้ำมันจึงเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์น้อยมาก อิมัลชันน้ำมันจึงมีเมทริกซ์โปรตีนล้อมรอบอีกชั้นหนึ่ง อิมัลชันน้ำมันที่อยู่ในอิมัลชันเนื้อสัตว์จึงมีลักษณะถูกกักไว้ในโครงร่างตาข่ายของโปรตีนและอธิบายด้วยทฤษฎีการกักทางกายภาพ

อย่างไรก็ดีพันธะเชื่อมโยงจากการผสมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสไม่มีผลโดยตรงต่ออันตรกิริยาระหว่างโปรตีนที่สร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสกับน้ำมัน แต่ยังคงทำให้ฟิล์มโปรตีนมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดอิมัลชันเนื้อสัตว์เมื่อใช้เฟสไขมันเป็นมันหมูหรืออิมัลชันน้ำมันที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดไม่มีผลให้โปรตีนเปลี่ยนโครงสร้างทุติยภูมิ แต่เมื่อใช้อิมัลชันน้ำมันที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เคซีน และเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส จะมีผลให้เกิดโครงสร้างแบบเบตาซีทเพิ่มขึ้น แต่แบบเกลียวแอลฟาไม่ลดลง โดยเบตาซีทที่เพิ่มขึ้นมาจากพันธะเชื่อมโยงที่เอนไซม์สร้างขึ้นในโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและ/หรือเคซีนที่เป็นฟิล์มห่อหุ้มหยดน้ำมัน หรือระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและ/หรือเคซีนกับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในเนื้อ รวมทั้งโครงสร้างแบบเบตาซีทที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เมทริกซ์โปรตีนมีความแน่นเพิ่มขึ้น

## 2.5 การฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอร์ไลซ์

### 2.5.1 หลักการของการฆ่าเชื้อระดับสเตอร์ไลซ์

การให้ความร้อนในระดับสเตอร์ไลซ์ เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายเซลล์แบคทีเรียและทำลายสปอร์แบคทีเรียที่ทนความร้อน ไม่ให้สามารถเติบโตได้ในอาหารระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิปกติ ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคควบคู่กับการปรับสภาพแวดล้อมไม่ให้จุลินทรีย์เติบโตได้ เรียกว่า การทำให้ปลอดเชื้อทาง

การค้า (commercial sterilization) โดยภาชนะที่ปิดสนิท ป้องกันการปนเปื้อนกลับหลังการฆ่าเชื้อ และภายในมีออกซิเจนต่ำป้องกันการเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดที่ใช้อากาศ แต่เหมาะสมต่อการเติบโตของคลอสทริเดียม โบทูลินัม (*Clostridium botulinum*) ซึ่งก่อให้เกิดโรคได้ การทำลายสปอร์ของคลอสทริเดียม โบทูลินัม จึงมีความสำคัญในกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ (ทิพาพร, 2556)

$F_0$  เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณเวลาสำหรับกระบวนการสเตอริไลเซชัน โดยหมายถึงระยะเวลาให้ความร้อนในหน่วยนาที่ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เพื่อจะทำลายสปอร์ของแบคทีเรียคลอสทริเดียม โบทูลินัม ให้ลดลงตามจำนวนที่กำหนด (ทิพาพร, 2556)

### 2.5.2 รีทอร์ทเพาช์

รีทอร์ทเพาช์เป็นภาชนะบรรจุชนิดหนึ่งที่ใช้กับอาหารที่ผ่านการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลซ์ โดยเป็นบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนตัว ทำจากฟิล์มหลายชนิดมาเชื่อมประสานและขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นถุงที่แข็งแรงทนต่อความร้อนสูงและความดันได้ (ทิพาพร, 2556)

### 2.5.3 ปริมาณความร้อนสำหรับการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์

ในประเทศไทยกำหนดให้อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ซึ่งรวมถึงอาหารในภาชนะบรรจุลามิเนต (รีทอร์ทเพาช์) ที่ผ่านกรรมวิธีให้ความร้อนหลังการบรรจุหรือปิดผนึก ชนิดที่มีความเป็นกรดต่ำหรือพีเอชมากกว่า 4.6 และค่าออกเตอร์แอกติวิตีมากกว่า 0.85 (ลักษณะของอิมัลชันเนื้อสัตว์) ต้องฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด (scheduled process) โดยให้ค่า  $F_0$  ไม่ต่ำกว่า 3 นาที่ (กระทรวงสาธารณสุข, 2556)

ขณะที่สหรัฐอเมริกา (21 CFR part 113 และ 9 CFR part 318 subpart G) กำหนดให้อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทและมีความเป็นกรดต่ำ ต้องฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด ที่มากพอจะทำให้เกิดสภาวะปลอดเชื้อทางการค้า (commercial sterility) ได้ โดยไม่ได้กำหนดเป็นค่า  $F_0$  (US FDA, 2017; US FSIS, 2017)

ทั้งนี้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่า กรรมวิธีให้ความร้อนเพื่อให้เกิดสภาวะปลอดเชื้อทางการค้าจะต้องสามารถลดปริมาณสปอร์ของคลอสทริเดียม โบทูลินัม ลงได้ไม่น้อยกว่า 12 log จากจำนวนเริ่มต้น (12D) หรือเทียบเท่ากับค่า  $F_0$  ไม่ต่ำกว่า 3 นาที่ (US FSIS, 2005) อย่างไรก็ตามการกำหนดกรรมวิธีให้ความร้อนทุกกระบวนการฆ่าเชื้อ จะมีการสร้างส่วนเผื่อความปลอดภัย (safety margin) เสมอ เพื่อรองรับความแปรปรวนของกระบวนการผลิตในแต่ละวันหรือในแต่ละรอบ ดังนั้นกรรมวิธีให้ความร้อนของอาหารที่ถ่ายเทความร้อนได้ช้า (นำความร้อน) ซึ่งรวมถึงผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์นั้น อาจกำหนด  $F_0$  4-6 นาที่ เมื่อสิ้นสุดช่วงให้ความร้อนก่อนทำให้เย็น และ  $F_0$  จะเพิ่มขึ้นได้อีกในระหว่างช่วงทำให้เย็นโดยให้ถือว่าเป็นส่วนเผื่อความปลอดภัยอีกชั้นหนึ่ง เช่น การฆ่าเชื้อมีทิลอฟโดยทั่วไปมี  $F_0$  ประมาณ 6 นาที่ (Featherstone, 2015)

นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของหมุยอบที่บรรจุในรีทอร์ทแพคเกจ ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการที่มีค่า  $F_0$  เท่ากับ 7.75 นาที มีปริมาณจุลินทรีย์ไม่เกินค่ามาตรฐานที่ มอก. กำหนด และสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสได้นาน 75 วัน (สาริตา และคณะ, 2549)



## บทที่ 3 วิธีการวิจัย

### 3.1 วัตถุดิบ

- 3.1.1 เนื้ออกไก่ บริษัท เอก-ชัย ดิสทริบิวชั่น จำกัด
- 3.1.2 มันไก่ บริษัท ไก่สดเซนทาโก จำกัด
- 3.1.3 น้ำมันรำข้าว มีส่วนผสมของแกมมา โอโรซานอล 4000 พีพีเอ็ม ตรา คิง บริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด
- 3.1.4 เกลือบริโภคเสริมไอโอดีน ประกอบด้วยโซเดียม คลอไรด์ ร้อยละ 99.9 และมีส่วนผสมของไอโอดีน 20-40 พีพีเอ็ม ตรา ประจักษ์ บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด
- 3.1.5 น้ำตาล ตรา มิตรผล บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด
- 3.1.6 ผงชูรส ประกอบด้วยโมโนโซเดียม กลูตาเมต (MSG) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99 ตรา आयिโนะโมไต้ะ บริษัท आयिโนะโมไต้ะ ประเทศไทย จำกัด
- 3.1.7 น้ำปลา ตรา หอยนางรม บริษัท น้ำปลาพิไชย จำกัด
- 3.1.8 พริกไทยขาวป่น ตรา มือที่ 1 บริษัท อัจฉิตต์อินเตอร์เนชั่นเนล เพ็พเพอร์ แอนด์สไปซ์ จำกัด
- 3.1.9 กระเทียม บริษัท เอก-ชัย ดิสทริบิวชั่น จำกัด
- 3.1.10 หอมแดง บริษัท เอก-ชัย ดิสทริบิวชั่น จำกัด
- 3.1.11 โซเดียม ไตรฟอสเฟต (STP) บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 3.1.12 โพรตีนถั่วเหลืองสกัด (SPI) ประกอบด้วยโปรตีน ร้อยละ 90 ตรา PRO 500A บริษัท วิกี้ เอนเตอร์ไพรส์ จำกัด
- 3.1.13 โซเดียม เคซีนเนต (SC) ประกอบด้วยโปรตีน ร้อยละ 80 ตรา ECCO 2300 บริษัท Erie Food International ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.14 เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ (MTG) ประกอบด้วยเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ร้อยละ 1 และมอลโตเด็กซ์ทริน ร้อยละ 99 มีค่ากิจกรรมมาตรฐานของเอนไซม์ประมาณ 100 ยูนิต์ต่อกรัม ตรา ACTIVA WM บริษัท Ajimonoto Europe ประเทศฝรั่งเศส

## 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

### 3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการผลิตไก่อ

- 3.2.1.1 เครื่องบดเนื้อ ยี่ห้อ Tre Spade รุ่น TC-12 INOX ประเทศอิตาลี
- 3.2.1.2 เครื่องนวดผสม ยี่ห้อ Mainca รุ่น RM-20 ประเทศสเปน
- 3.2.1.3 เครื่องสับผสม ยี่ห้อ Panasonic รุ่น MK-5080M ประเทศมาเลเซีย
- 3.2.1.4 เครื่องปิดผนึกสุญญากาศ ยี่ห้อ Multivac รุ่น C200 ประเทศเยอรมนี
- 3.2.1.5 เครื่องฆ่าเชื้อแนวนอนแบบพ่นน้ำ (horizontal batch steam water spray retort) รุ่น KM-P95SS บริษัท เคเอ็ม แกรนด์แพค ประเทศไทย
- 3.2.1.6 รีทอร์ทเพาช์แบบใส พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ 13/พอลิเอไมด์ 15/พอลิโพรพิลีน 70 (ALOX coated PET 25 13/OPA 15/CPP 70) ที่ไม่มีชั้นของอะลูมิเนียมฟอยล์ กว้าง 7 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร บริษัท รอยแยล เมอิวะ แพ็คซ์ จำกัด ประเทศไทย
- 3.2.1.7 พิมพ์อะลูมิเนียมเคลือบเทฟลอนแบบมีฝาเลื่อนเปิดปิดได้ กว้าง 9 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร และสูง 6 เซนติเมตร
- 3.2.1.8 ถังพลาสติกพอลิเอทิลีนขนาดต่างๆ

### 3.2.2 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

- 3.2.2.1 เครื่องวัดอุณหภูมิของอาหารและค่า  $F_0$  ของกระบวนการฆ่าเชื้อ ยี่ห้อ Ellab รุ่น E-Val Flex ประเทศเดนมาร์ก
- 3.2.2.2 เครื่องเหวี่ยงแบบควบคุมอุณหภูมิต่ำ (refrigerated centrifuge) ยี่ห้อ Jouan รุ่น CR3i ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.2.3 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Konica-Minolta รุ่น CR-10 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.2.4 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส รุ่น TA.XT.plus บริษัท Stable Micro Systems ประเทศอังกฤษ
- 3.2.2.5 รีโอมิเตอร์ประเภทควบคุมความเครียดเฉือน (controlled strain rheometer) รุ่น ARES-G2 บริษัท TA Instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้อิเล็กตรอนส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) รุ่น JSM IT 500 HR บริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น

### 3.3 วิธีการเตรียมวัตถุดิบ

#### 3.3.1 การเตรียมเนื้อไก่บด

ล้างทำความสะอาดเนื้อไก่ด้วยน้ำ ตัดแต่งไขมันและพังผืดที่มองเห็นได้ออก หั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก แล้วบดด้วยเครื่องบดเนื้อผ่านหน้าแปลนขนาดรู 2 มิลลิเมตร 2 ครั้ง (กรรวิและประภาศรี, 2561)

#### 3.3.2 การเตรียมส่วนประกอบที่เป็นไขมัน

##### 3.3.2.1 ไขมันไก่

ล้างทำความสะอาดไขมันไก่ด้วยน้ำ แล้วหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก บรรจุถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน ที่ความดันปกติ จากนั้นแช่เยือกแข็งในห้องเย็นอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ให้มีอุณหภูมิ 0-1 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาใช้งาน (ชนิษฐ์ธิดา และประภาศรี, 2558)

##### 3.3.2.2 น้ำมันรำข้าว

บรรจุน้ำมันรำข้าวในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน ที่ความดันปกติ จากนั้นแช่เยือกแข็งในห้องเย็นอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง สำหรับน้ำมันรำข้าวที่จะเตรียมเป็นอิมัลชันน้ำมันรำข้าว ให้แช่เย็นในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง หลังบรรจุถุงแล้ว (ตัดแปลงจาก ชนิษฐ์ธิดา และประภาศรี, 2558)

##### 3.3.2.3 อิมัลชันน้ำมันรำข้าว

ลดอุณหภูมิเครื่องสับผสมไว้ล่วงหน้า โดยแช่เย็นโถผสม ฝาปิด และใบมีดของเครื่องผสม ในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง

ผสมน้ำเย็นอุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส จำนวน 8 ส่วน (ร้อยละ 42.11 โดยน้ำหนักของอิมัลชัน) กับโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส จำนวน 1 ส่วน (ร้อยละ 5.26 โดยน้ำหนักของอิมัลชัน) (ให้ผสมเคซีนกับเอนไซม์ไว้ล่วงหน้า โดยใช้เอนไซม์ร้อยละ 6.81 โดยน้ำหนักของเคซีน) ด้วยเครื่องสับผสมนาน 2 นาที กำหนดให้อุณหภูมิของผสมที่ได้ไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้เกิดเป็นอิมัลชันน้ำมัน โดยค่อยๆ เติมน้ำมันรำข้าวอีก 10 ส่วน (ร้อยละ 52.63 โดยน้ำหนักของอิมัลชัน) ลงไปผสมกับของผสมที่เตรียมไว้ ด้วยเครื่องสับผสมนาน 3 นาที กำหนดให้อุณหภูมิอิมัลชันน้ำมันที่ได้ไม่เกิน 10 องศาเซลเซียส บรรจุอิมัลชันน้ำมันในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน ที่ความดันปกติ แช่เย็นในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และนำไปใช้งานภายในไม่เกิน 4 ชั่วโมง (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b)

### 3.4 วิธีการผลิตไก่อ

#### 3.4.1 สูตรผลิตภัณฑ์ไก่อ

ไก่อสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ มีส่วนผสมดังตารางที่ 3.1 สำหรับไก่อสูตรที่ไม่ใช้มันไก่ จะทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรืออิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส โดยใช้ปริมาณเท่ากับมันไก่ในสูตรควบคุม

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของไก่อสูตรที่ใช้มันไก่เป็นเฟสไขมัน

ส่วนผสม	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
เนื้อมันไก่บด	67.98
มันไก่	20.43
น้ำแข็ง	6.81
เกลือ	1.05
โซเดียม ไตรฟอสเฟต	0.20
น้ำตาล	1.20
ผงชูรส	0.30
น้ำปลา	0.65
พริกไทยขาวป่น	0.32
กระเทียมสับละเอียด	0.43
หอมแดงสับละเอียด	0.63

ที่มา: ขนิษฐา และประภาศรี (2558)

#### 3.4.2 การผลิตไก่อ

ผสม (pre-blend) เนื้อมันไก่บดกับเกลือด้วยเครื่องนวดผสม นาน 1 นาที บรรจุถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน ที่ความดันปกติ จากนั้นแช่เยือกแข็งในห้องเย็นอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งานให้ละลายน้ำแข็งจนมีอุณหภูมิ 0-1 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องสับผสม สับผสมเนื้อมันไก่บดที่ผสมกับเกลือมาแล้ว รวมกับฟอสเฟตและน้ำแข็ง 2/3 ส่วน นาน 2 นาที เติมน้ำมัน น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง หรืออิมัลชันของน้ำมันรำข้าว (ขึ้นกับสูตรผลิตภัณฑ์) สับผสมนาน

1 นาที่ เติมน้ำแข็งที่เหลือและส่วนผสมอื่นๆ ทั้งหมด สับผสมจนเป็นอิมัลชันไคยอที่มีลักษณะเป็นมวลเหนียว โดยอุณหภูมิไม่เกิน 12 องศาเซลเซียส

บรรจุอิมัลชันไคยอประมาณ 600 กรัม ในพิมพ์อะลูมิเนียมเคลือบเทฟลอนแบบมีฝาเลื่อนเปิดปิดได้ ขนาดกว้าง 9 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร และสูง 6 เซนติเมตร โดยกดเนื้ออิมัลชันให้แน่นให้มีฟองอากาศน้อยที่สุด จากนั้นปิดฝาให้สนิท บรรจุพิมพ์ในถาดพลาสติกพอลิเอทิลีนมัตถุ์ให้แน่น แล้วทำให้สุกโดยนึ่งด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง กำหนดให้อุณหภูมิใจกลางชิ้นไคยอเมื่อสิ้นสุดการนึ่งไม่ต่ำกว่า 75 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในน้ำผสมน้ำแข็ง นาน 15 นาที กำหนดให้อุณหภูมิใจกลางชิ้นไคยอหลังทำให้เย็นไม่เกิน 25 องศาเซลเซียส

แกะพิมพ์ออก ตัดแบ่งอิมัลชันไคยอที่ทำให้สุกแล้วเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร และหนา 2 เซนติเมตร น้ำหนักต่อชิ้นอยู่ในช่วง 26-31 กรัม บรรจุในถาดพลาสติกพอลิเอทิลีน ความดันปกติ แช่เย็นในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

### 3.4.3 การฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการสเตอริไลเซชัน

บรรจุชิ้นอิมัลชันไคยอที่ทำให้สุกแล้วในรีทอร์ทเพาซ์แบบใส ที่ไม่มีชั้นของอะลูมิเนียมฟอยล์ ขนาดกว้าง 7 เซนติเมตร และยาว 12 เซนติเมตร ปิดผนึกแบบสุญญากาศ โดยกำหนดสภาวะเครื่องปิดผนึกที่ความดัน 10 มิลลิบาร์ นำเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ โดยวางในแนวนอน เรียงบนถาดที่มีรูพรุน ถาดละ 30 เพาซ์ จำนวน 10 ถาด ฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 122 องศาเซลเซียส กำหนดให้อุณหภูมิชิ้นไคยอเมื่อสิ้นสุดกระบวนการฆ่าเชื้อไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส จากนั้นแช่เย็นในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

## 3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.5.1 ศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชัน

#### 3.5.1.1 การกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชัน

กำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ชิ้นใหม่โดยปรับปรุงจากกรรมวิธีการผลิตของกรรวิและประภาศรี (2561) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 กรรมวิธีการผลิตของกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ของไก่ยอในรีทอร์ทเพาซ์

ขั้นที่	ช่วงเวลาของ กระบวนการฆ่าเชื้อ	สภาวะเครื่องฆ่าเชื้อที่กำหนด		เวลาที่กำหนด (นาที)
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	
1	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	70	1.00	7
2	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	90	1.20	5
3	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	110	1.60	5
4	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	115	2.10	3
5	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	122	2.20	3
6	ฆ่าเชื้อ	122	2.20	6
7	ทำให้เย็น	110	2.00	5
8	ทำให้เย็น	90	1.80	3
9	ทำให้เย็น	60	1.50	5
10	ทำให้เย็น	40	1.00	5
11	ทำให้เย็น	30	0.50	5
เวลารวมทั้งกระบวนการ (นาที)				52

ที่มา: กรรวิ และประภาศรี (2561)

การปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตประกอบด้วยการปรับลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ (come-up time: CUT) ให้สั้นลง โดยออกแบบให้เหมาะสมกับเครื่องฆ่าเชื้อ และการปรับเพิ่มช่วงเวลาฆ่าเชื้อให้นานขึ้น โดยกำหนดให้ค่า  $F_0$  ของกระบวนการเพิ่มขึ้นจาก 6-7 นาที เป็น 12-15 นาที (Heinz และ Hautzinger, 2007) จากนั้นผลิตไก่ยอสูตรควบคุม ทำให้สุกโดยนึ่งด้วยไอน้ำ บรรจุในรีทอร์ทเพาซ์ นำเข้าเครื่องฆ่าเชื้อ โดยจัดวางไว้ในตำแหน่งที่ร้อนซ้ำที่สุกภายในเครื่องฆ่าเชื้อ (ได้มีการทดลองหาการกระจายความร้อนในเครื่องฆ่าเชื้อไว้ก่อนแล้ว) แล้วฆ่าเชื้อตามกรรมวิธีการผลิตที่กำหนดขึ้นใหม่ โดยวัดอุณหภูมิไก่ยอในรีทอร์ทเพาซ์บริเวณตำแหน่งที่ร้อนซ้ำที่สุดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิในระหว่างฆ่าเชื้อในเครื่องฆ่าเชื้อ แล้วคำนวณค่า  $F_0$  ด้วยวิธี General method (Featherstone, 2015)

### 3.5.1.2 ค่า $F_0$ ของกระบวนการ

ผลิตไก่ยอสูตรควบคุมและสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวรูปแบบต่างกัน ทำให้สุกโดยนึ่งด้วยไอน้ำ บรรจุในรีทอร์ทเพาซ์ วัตอุณหภูมิไก่ยอในรีทอร์ทเพาซ์บริเวณตำแหน่งที่ร้อนซ้ำที่สุดด้วยเครื่องวัตอุณหภูมิในระหว่างการฆ่าเชื้อตามกรรมวิธีการผลิตที่กำหนดขึ้นใหม่ แล้วคำนวณค่า  $F_0$  ด้วยวิธี General method (Featherstone, 2015) โดยต้องไม่ต่ำกว่า 12-15 นาที (Heinz และ Hautzinger, 2007)

### 3.5.1.3 คุณภาพทางจุลินทรีย์

วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในไก่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อระดับสเตอร์ไรส์ ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) วิเคราะห์ปริมาณ คอสตริเดียม โบทูลินัม (*Clostridium botulinum*) ตามวิธีของ FDA-BAM (US FDA, 2001) และแบคทีเรียสร้างสปอร์ที่ชอบอุณหภูมิปานกลางและไม่ต้องการออกซิเจน (anaerobic mesophilic spore-former) กับแบคทีเรียสร้างสปอร์ที่ชอบอุณหภูมิสูงและไม่ต้องการออกซิเจน (anaerobic thermophilic spore-former) ตามวิธีของ APHA (APHA, 2001)

## 3.5.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของระบบอิมัลชันไก่ยอ

### 3.5.2.1 ความคงตัว

#### (1) อิมัลชันน้ำมันรำข้าว

ชั่งน้ำหนักอิมัลชันน้ำมันรำข้าวประมาณ 50 กรัม (A) ใส่ในหลอดปั่นเหวี่ยงกันกลมฝาเกลียว ขนาด 50 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงที่ 2,500g อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ปิดฝาหลอด แล้วให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เปิดฝา คว่ำหลอดลง ยึดด้วยแคลมป์จับที่ติดกับขาตั้ง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 50 นาที ให้ของเหลวที่แยกตัวออกไหลลงบนถ้วยอูมิเนียมนิย่มสำหรับหาความชื้น ชั่งน้ำหนักของเหลวที่แยกได้ (B) แล้วคำนวณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด (total fluid release: TFR) จากนั้นอบแห้งของเหลวในถ้วยด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (C) แล้วคำนวณน้ำที่แยกได้ (water release: WR) และของแข็งที่เหลืออยู่ (fluid residue: FR) โดยของแข็งที่เหลืออยู่อาจประกอบด้วยไขมัน โปรตีน หรือเกลือ (ดัดแปลงจาก Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010a) ค่า TFR WR และ FR แสดงในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

$$TFR = [B / A] \times 100$$

$$WR = [(B - C) / A] \times 100$$

$$FR = TFR - WR$$

## (2) อิมัลชันไคยอก่อนทำให้สุก

วัดความคงตัวของอิมัลชันไคยอก โดยการวัดและคำนวณค่า *TFR* *WR* และ *FR* ตามวิธีการเดียวกันกับการวัดความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันรำข้าว

## 3.5.2.2 การสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อน

## (1) น้ำหนักที่สูญเสีย

สำหรับอิมัลชันไคยอกหลังทำให้สุก ให้ชั่งน้ำหนักอิมัลชันไคยอกก่อนทำให้สุกหลังบรรจุลงในพิมพ์แล้ว (A) (ไม่รวมน้ำหนักพิมพ์) จากนั้นผ่านขั้นตอนทำให้สุกและทำให้เย็น เปิดถุงและฝาพิมพ์ แกะพิมพ์ออก แล้วใช้กระดาษกรอง Whatman No.1 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ซับของเหลวบนผิวหน้าของอิมัลชันไคยอกจนแห้ง ชั่งน้ำหนักไคยอก (B) แล้วคำนวณน้ำหนักที่สูญเสีย (fluid loss: *FL*) (ดัดแปลงจาก Chattong และ Apichartsrangkoon, 2009) ค่า *FL* แสดงในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

$$FL = [(A - B) / A] \times 100$$

สำหรับอิมัลชันไคยอกหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ ให้ชั่งน้ำหนักอิมัลชันไคยอกหลังทำให้สุกที่ตัดเป็นชิ้นแล้ว (A) จากนั้นผ่านขั้นตอนบรรจุในรีทอร์ทเพาซ์ ปิดผนึก แล้วฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์และทำให้เย็น เปิดรีทอร์ทเพาซ์ นำชิ้นอิมัลชันไคยอกออกจากรีทอร์ทเพาซ์ ใช้กระดาษกรองซับของเหลว แล้วชั่งน้ำหนักไคยอก (B) คำนวณค่า *FL* ตามวิธีการเดียวกันกับการวัดการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไคยอกหลังทำให้สุก

## (2) น้ำที่สูญเสีย

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในของเหลวที่สูญเสียระหว่างการให้ความร้อนอิมัลชันไคยอกทั้งจากการทำให้สุกและการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ (A) ตามวิธีของ AOAC (AOAC, 2012) (ภาคผนวก 1) จากนั้นคำนวณน้ำที่สูญเสีย (water loss: *WL*) โดยค่า *WL* แสดงในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

$$WL = FL \times (A / 100)$$

## (3) ความชื้นและไขมันในของเหลวที่สูญเสีย

สำหรับอิมัลชันไคยอกหลังทำให้สุก ให้วิเคราะห์ปริมาณความชื้นและไขมันในอิมัลชันไคยอกก่อนและหลังทำให้สุกตามวิธีของ AOAC (AOAC, 2012) (ภาคผนวก 1 และ 2) จากนั้นคำนวณปริมาณความชื้นและไขมันที่ลดลงจะเท่ากับความชื้นและไขมันที่สูญเสียไปกับ

ของเหลวระหว่างการให้ความร้อน สำหรับอิมัลชันไคโยหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ให้วิธีการเดียวกัน แต่คำนวณจากปริมาณความชื้นและไขมันในอิมัลชันไคโยหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อ

### 3.5.2.3 ความสามารถในการอุ้มน้ำ

ตัดอิมัลชันไคโยหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ให้เป็น ขึ้นหนา 15 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนัก (A) แล้ววางไว้ระหว่างกระดาษกรอง Whatman No.1 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร ใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส หัววัดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (P/50) น้ำหนักโพลีเอทิลีน 50 กิโลกรัม กดขึ้นไคโยลงไปร้อยละ 70 ของความหนา ด้วยความเร็วหัววัด (test speed) 3 มิลลิเมตรต่อวินาที แล้วค้างไว้ 60 วินาที ชั่งน้ำหนักขึ้นไคโย (B) แล้วคำนวณน้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัด (expressible fluid loss: EFL) จากนั้นคำนวณของเหลวที่บีบอัดได้ (expressible fluid: EF) จากปริมาณความชื้นของขึ้นไคโยก่อนบีบอัด (C) ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการศึกษาในข้อ 3.5.2.2 (ดัดแปลงจาก Chattong และ Apichartsrangkoon, 2009) ค่า EFL แสดงในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

$$EFL = [(A - B) / A] \times 100$$

$$EF = [(A - B) / C] \times 100$$

### 3.5.2.4 ความแข็งแรงของโครงสร้าง

ตัดอิมัลชันไคโยหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ให้เป็น ขึ้นหนา 20 มิลลิเมตร จากนั้นใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส หัววัดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (P/6) น้ำหนักโพลีเอทิลีน 50 กิโลกรัม กดขึ้นไคโยลงไปร้อยละ 50 ของความหนา ด้วยความเร็วหัววัด 0.8 มิลลิเมตรต่อวินาที วัดแรงกดทะลุ (penetration force: PF) ในหน่วยนิวตัน ความทนต่อการกดทะลุ (penetration strength: PS) ในหน่วยนิวตันต่อตารางเซนติเมตร และความแข็งแรงของเจล (gel strength: GS) ในหน่วยจูล (ดัดแปลงจาก Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b)

### 3.5.2.5 ค่าสี

ใช้เครื่องวัดสีที่ผิวหน้าและภายในอิมัลชันไคโยหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ โดยวัด 8 ครั้งต่อไคโยแต่ละชั้น ในระบบ CIE Lab ( $L^*$  คือ ความสว่าง  $a^*$  คือ ความเป็นสีแดง และ  $b^*$  คือ ความเป็นสีเหลือง) ใช้แหล่งแสง D65 และค่ามุม 10 องศา (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b) คำนวณดัชนีความเป็นสีขาว (whiteness index: WI) (Saricoban และ Yilmaz, 2010) หลังจากนั้นคำนวณความแตกต่างของความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ความแตกต่างของความ เป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ ) ความแตกต่างของความ เป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ ) ความแตกต่างของดัชนีความเป็น

สีขาว ( $\Delta W$ ) ความแตกต่างของสีโดยรวม (total color difference:  $\Delta E^*$ ) (Wrolstad และ Smith, 2017) เปรียบเทียบระหว่างสีของอิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ใช้มันไคกับสูตรที่ใช้มันรำข้าวรูปแบบต่างๆ ทดแทนมันไค เปรียบเทียบระหว่างสีที่ผิวหน้าและที่ภายใน และเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0.5}$$

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_2$$

$$\Delta a^* = a^*_1 - a^*_2$$

$$\Delta b^* = b^*_1 - b^*_2$$

$$\Delta WI = WI_1 - WI_2$$

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{0.5}$$

### 3.5.2.6 สถิติที่ใช้ในการประเมินผล

วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ Analysis of Variant (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

## 3.5.3 ศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสของระบบอิมัลชันไคโย

### 3.5.3.1 การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันแอมพลิจูด

ใช้รีโอมิเตอร์ประเภทควบคุมความเครียดเฉือน (controlled shear strain) หัววัดแผ่นแบนผิวฟันเลื่อยขนานกัน (serrated parallel plate) เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร เติมอิมัลชันไคโยก่อนทำให้สุกอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ลงไประหว่างแผ่นแบนของหัววัด ทาขอบด้านข้างของอิมัลชันที่อยู่ระหว่างหัววัดด้วยกาลีเซอร์อลบางๆ เว้นช่วงเวลาก่อนเริ่มวัดนาน 5 นาที จากนั้นวัดค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus:  $G'$ ) และมอดูลัสสูญเสีย (loss modulus:  $G''$ ) เพื่อหาความเครียดในช่วงที่ความเค้นและความเครียดเฉือนจะสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (linear viscoelastic region: LVER) โดยแปรผันความเครียด ในช่วงร้อยละ 0.01-500 ที่ความถี่และอุณหภูมิคงที่ โดยใช้ความถี่ 1 เฮิรตซ์ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ดัดแปลงจาก Fernandez-Martin และคณะ, 2009; Ferlisberto และคณะ, 2015)

### 3.5.3.2 การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันความถี่

ทดสอบกับอิมัลชันไคโยก่อนทำให้สุก ใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาในข้อ 3.5.3.1 วัดค่า  $G'$   $G''$  และแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent:  $\tan \delta = G''/G'$ ) โดยแปรผันความถี่ ในช่วง 0.01-100 เฮิรตซ์ ที่ความเครียดและอุณหภูมิคงที่ โดยใช้ความเครียดในช่วง LVER ที่

ได้จากการศึกษาในข้อ 3.5.3.1 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ดัดแปลงจาก Fernandez-Martin และคณะ, 2009; Ferlisberto และคณะ, 2015)

### 3.5.3.3 การทดสอบแบบพลวัตโดยอุณหภูมิ

ทดสอบกับอิมัลชันไก่อยก่อนทำให้สุก ใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาในข้อ 3.5.3.1 วัดค่า  $G'$   $G''$   $\tan \delta$  และความหนืดเชิงซ้อน (complex viscosity:  $\eta^*$ ) โดยแปรผันอุณหภูมิในช่วงเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 ไปยัง 90 องศาเซลเซียส และในช่วงลดอุณหภูมิจาก 90 ไปยัง 20 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที และลดอุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความเครียดและอุณหภูมิคงที่ โดยใช้ความเครียดซึ่งอยู่ในช่วง LVER ที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.5.3.1 และความถี่ 1 เฮิรตซ์ (ดัดแปลงจาก Fernandez-Martin และคณะ, 2009; Ferlisberto และคณะ, 2015)

หามอดูลัสสะสมสูงสุดในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ อุณหภูมิที่แสดงมอดูลัสสะสมสูงสุด มอดูลัสสะสมเมื่อสิ้นสุดช่วงเพิ่มอุณหภูมิ และมอดูลัสสะสมเมื่อสิ้นสุดช่วงลดอุณหภูมิ ปรับเรียบ (smooth) รีโอแกรมด้วยตัวกรองซาวิตซ์กี-โกเลย์แบบ 7 จุด (7-points Savitzky-Golay filter) (Savitzky และ Golay, 1964) หาอุณหภูมิทรานซิชันในช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิเพื่อติดตามการเกิดเจลจากอุณหภูมิที่ทำให้ความชันของกราฟแทนเจนต์สูญเสียต่ำที่สุดหรือความชันของกราฟความหนืดเชิงซ้อนมีค่ามากกว่า 0.001 (ดัดแปลงจาก Picone และ Cunha, 2011; Marchetti และคณะ, 2013; Ferlisberto และคณะ, 2015)

### 3.5.3.4 สถิติที่ใช้ในการประเมินผล

วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ Analysis of Variant (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

## 3.5.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอิมัลชันไก่อ

### 3.5.4.1 ลักษณะเนื้อสัมผัส

วัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธี texture profile analysis (TPA) โดยตัดอิมัลชันไก่อหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอร์ไลซ์ให้เป็นชิ้นที่มีความกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร และหนา 15 มิลลิเมตร ใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส น้ำหนักโหลดเซลล์ 50 กิโลกรัม หัววัดทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (P/50) กดขึ้นไก่อลงไกร้อยละ 40 ของความหนาด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วก่อนหัววัดสัมผัสตัวอย่าง (pre-test speed) และความเร็วหัววัดขณะเคลื่อนที่กลับ (post-test speed) 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง (25-30 องศาเซลเซียส) (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b; กรรวิ และประภาศรี, 2561)

ค่านวณพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความแข็ง (hardness) ซึ่งเท่ากับแรงสูงสุดเมื่อกดตัวอย่างครั้งที่ 1 ในหน่วยนิวตัน การยึดเกาะ (cohesiveness) ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนงานที่เกิดขึ้นจากการกดตัวอย่างครั้งที่ 2 เทียบกับการกดครั้งตัวอย่างที่ 1 ในหน่วยร้อยละ ความยืดหยุ่น (springiness) ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนระยะทางที่ตัวอย่างคืนตัวกลับหลังการกดตัวอย่างครั้งที่ 1 ในหน่วยร้อยละ และแรงการเคี้ยว (chewiness) ซึ่งเท่ากับความแข็งคูณด้วยการยึดเกาะคูณด้วยความยืดหยุ่น ในหน่วยนิวตัน (Bourne, 2002)

#### 3.5.4.2 โครงสร้างระดับจุลภาค

ตัดอิมัลชันไก่อยหลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ให้เป็นชิ้นที่มีความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร และหนา 5 มิลลิเมตร แล้วแช่ (fix) ในสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ เข้มข้นร้อยละ 2.5 ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7.2 ที่อุณหภูมิตู้เย็น นานข้ามคืน ล้างด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7.2 นาน 15 นาที 2 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 15 นาที ทำแห้งในเอทานอลที่ไล่ความเข้มข้นจากต่ำไปสูง จากร้อยละ 30, 50, 70, 95 และ 100 นาน 10 นาที 3 ครั้ง ทำแห้งแบบคริติคัลพอยท์ ตัดลงบนแท่นสแตนเลส เคลือบด้วยทอง แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่แรงดันไฟฟ้าเร่ง (accelerating voltage) 10 กิโลโวลต์ (ดัดแปลงจาก Horita และคณะ, 2014)

#### 3.5.4.3 สถิติที่ใช้ในการประเมินผล

วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ Analysis of Variant (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชันของระบบอิมัลชันไก่อ

##### 4.1.1 การกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชัน

การกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อสำหรับไก่อในรีทอร์ทเพาซ์เพื่อให้เกิดสภาวะปลอดเชื้อทางการค้า (commercial sterility) เป็นการปรับปรุงมาจากกรรมวิธีการผลิตที่กำหนดในงานวิจัยของกรรวิ และประภาศรี (2561) ใน 2 ประเด็น ได้แก่ การลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ (CUT) ให้สั้นลง ช่วยให้อาหารสัมผัสกับความร้อนในปริมาณต่ำลง ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่มีผลจากความร้อน และการเพิ่มช่วงเวลาก่อนฆ่าเชื้อ (process time) ให้นานขึ้นเพื่อให้ค่า  $F_0$  (sterilizing value) สูงขึ้น อยู่ในช่วง 12-15 นาที ซึ่งเป็นเกณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ในประเทศเขตร้อน ช่วยให้สามารถเก็บผลิตภัณฑ์ได้อย่างปลอดภัยที่อุณหภูมิเก็บรักษาสูงถึง 40 องศาเซลเซียส (Heinz และ Hautzinger, 2007) ทั้งนี้การลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อเพื่อให้อาหารได้รับความร้อนต่ำลงระดับหนึ่งจะช่วยชดเชยกับการเพิ่มค่า  $F_0$  ซึ่งจะส่งผลให้อาหารได้รับความร้อนสูงขึ้นได้บางส่วน โดยรายละเอียดของไก่อในรีทอร์ทเพาซ์ก่อนนำไปฆ่าเชื้อซึ่งจะส่งผลต่อการกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อแสดงดังตารางที่ 4.1

##### ตารางที่ 4.1 การกำหนดรายละเอียดไก่อในรีทอร์ทเพาซ์ก่อนการฆ่าเชื้อ

รายละเอียด	ค่าที่กำหนด
ขนาดชิ้นไก่อ กว้าง x ยาว x หนา	3 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร
น้ำหนักไก่อต่อชิ้น	26-31 กรัม
บรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนตัว	รีทอร์ทเพาซ์แบบใส พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ 13/ พอลิเอไมด์ 15/พอลิโพรพิลีน 70 (AlOx coated PET 25 13/OPA 15/ CPP 70)
ขนาดบรรจุภัณฑ์ กว้าง x ยาว	7 เซนติเมตร x 12 เซนติเมตร
การปิดผนึกบรรจุภัณฑ์	ปิดผนึกแบบสุญญากาศ สภาวะเครื่องปิดผนึกความดัน 10 มิลลิบาร์
อุณหภูมิก่อนเริ่มการฆ่าเชื้อ	15-20 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ดีการปรับลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิมixa เชื้อของกระบวนการฆ่าเชื้อไก่อยในรีโอร์ทเพาซ์ แม้จะมีผลให้อุณหภูมิเครื่องฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่จะส่งผลให้อุณหภูมิอาหารที่จุดที่ร้อนซ้ำที่สุดในภาชนะบรรจุ (cold point) เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิมixa เชื้อต่ำลง ซึ่งมีผลต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิอาหารในช่วงเวลาฆ่าเชื้อต่ำลงและมีผลให้ค่า  $F_0$  ต่ำลงด้วย ดังนั้นในการกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อจึงต้องเพิ่มช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิมixa เชื้อให้นานขึ้นเพื่อชดเชยช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิมixa เชื้อที่สั้นลง โดยกรรมวิธีการผลิตสำหรับไก่อยในรีโอร์ทเพาซ์แสดงดังตารางที่ 4.2

กระบวนการผลิตเดิม (กรรมวิธีการผลิตที่ 1) มีช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิมixa เชื้อนาน 23 นาที ช่วงเวลาฆ่าเชื้อนาน 6 นาที รวมเวลาทั้งกระบวนการ 52 นาที เมื่อปรับลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิมixa เชื้อลงเหลือ 13 นาที ในกรรมวิธีการผลิตที่ 2 จึงปรับเพิ่มช่วงเวลาก่อนฆ่าเชื้อเป็น 8 นาที เพื่อให้ได้ค่า  $F_0$  ใกล้เคียงกับกรรมวิธีที่ 1 เวลารวมทั้งกระบวนการจึงลดลงเหลือ 44 นาที ขณะที่ในกรรมวิธีการผลิตที่ 3 และ 4 จะใช้ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิมixa เชื้อที่ลดลงเหลือ 13 นาทีเท่ากับกรรมวิธีที่ 2 แต่จะเพิ่มช่วงเวลาก่อนฆ่าเชื้อเป็น 10 และ 14 นาที (เพิ่มจากกรรมวิธีการผลิตที่ 1 เท่ากับ 4 และ 8 นาทีตามลำดับ) เพื่อเพิ่มค่า  $F_0$  ให้อยู่ในช่วง 12-15 นาทีตามที่ต้องการ โดยเวลารวมทั้งกระบวนการเท่ากับ 46 และ 50 นาทีตามลำดับ ซึ่งยังสั้นกว่าเมื่อเทียบกับกรรมวิธีการผลิตที่ 1

ตารางที่ 4.2 การกำหนดกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการฆ่าเชื้อไก่อในรีโอร์ทเพาช์

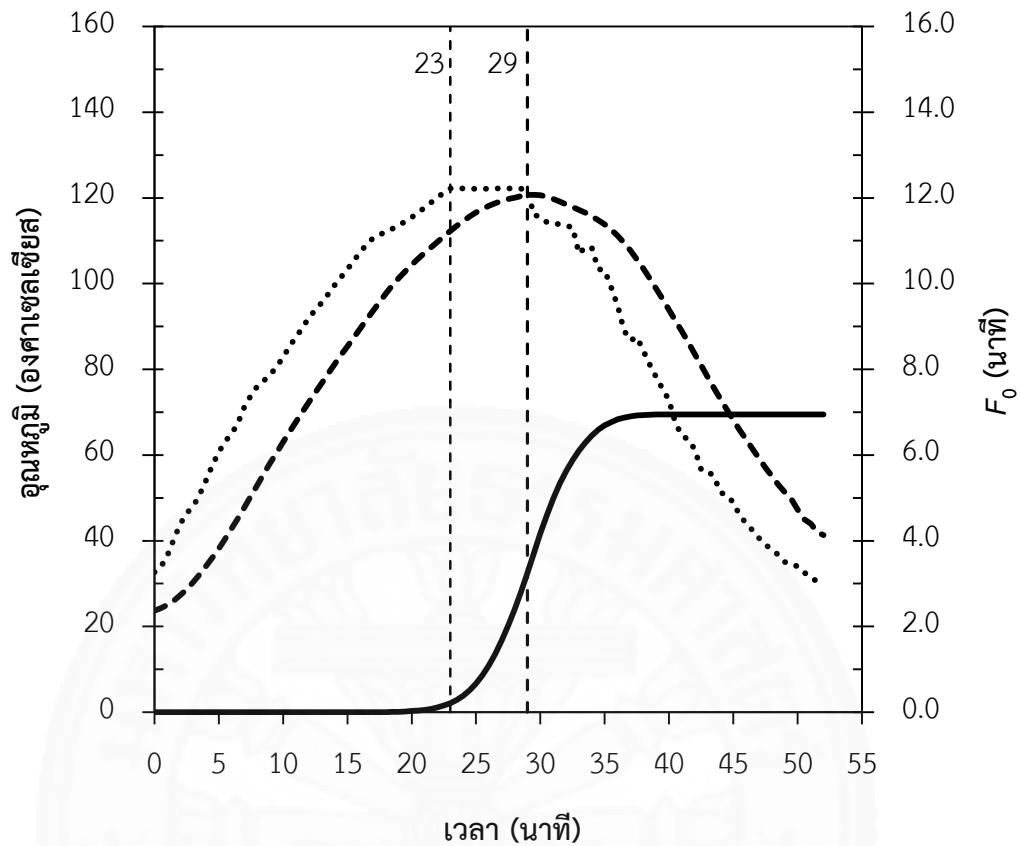
ชั้นที่	ช่วงเวลาของกระบวนการฆ่าเชื้อ	สภาวะเครื่องฆ่าเชื้อที่กำหนด		เวลาที่กำหนด (นาที)			
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	กรรมวิธีที่ 1	กรรมวิธีที่ 2	กรรมวิธีที่ 3	กรรมวิธีที่ 4
1	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	70	1.00	7	4	4	4
2	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	90	1.20	5	3	3	3
3	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	110	1.60	5	2	2	2
4	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	115	2.10	3	2	2	2
5	ก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	122	2.20	3	2	2	2
6	ฆ่าเชื้อ	122	2.20	6	8	10	14
7	ทำให้เย็น	110	2.00	5	5	5	5
8	ทำให้เย็น	90	1.80	3	3	3	3
9	ทำให้เย็น	60	1.50	5	5	5	5
10	ทำให้เย็น	40	1.00	5	5	5	5
11	ทำให้เย็น	30	0.50	5	5	5	5
เวลารวมทั้งกระบวนการ (นาที)				52	44	46	50

เครื่องฆ่าเชื้อจะเพิ่ม-ลดอุณหภูมิหรือความดันให้ถึงสภาวะที่กำหนดภายในเวลาที่กำหนดโดยอัตโนมัติภายใต้ขีดจำกัดของเครื่องรวมทั้งไอน้ำและน้ำเย็นที่มี

การทดสอบการแทรกผ่านความร้อนในเครื่องฆ่าเชื้อ (heat penetration test) สำหรับไก่โยนในรีทอร์ทเพาซ์สูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ตามกรรมวิธีการผลิตที่ 1 ถึง 4 (ตารางที่ 4.2) ค่า  $F_0$  ของแต่ละกระบวนการที่คำนวณด้วยวิธี General method รวมทั้งระยะเวลาในช่วงก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อและช่วงฆ่าเชื้อ แสดงดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 สำหรับอุณหภูมิเครื่องฆ่าเชื้อ อุณหภูมิอาหาร และค่า  $F_0$  ที่วัดและคำนวณได้สำหรับกรรมวิธีการผลิตที่ 1 ถึง 4 แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่า อุณหภูมิเครื่องฆ่าเชื้อและอุณหภูมิอาหารของกรรมวิธีการผลิตที่ 2 ในช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อมีอัตราการเพิ่มขึ้นเร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรรมวิธีการผลิตที่ 1 (รูปที่ 4.1 และ 4.2) แต่อุณหภูมิอาหารเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อของกรรมวิธีการผลิตที่ 1 กลับสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรรมวิธีการผลิตที่ 2 ประมาณ 10 องศาเซลเซียส ขณะที่  $F_0$  ต่ำกว่าประมาณ 0.2 นาที (ตารางที่ 4.3) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อในกรรมวิธีการผลิตที่ 2 ให้นานขึ้น 2 นาที จึงสามารถเข้าไปชดเชยความแตกต่างดังกล่าวได้ โดยพบว่า อุณหภูมิอาหารเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อเกือบจะไม่แตกต่างกัน (120.69 กับ 120.57 องศาเซลเซียส) และค่า  $F_0$  ของกรรมวิธีการผลิตที่ 1 และ 2 ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 6.50 ถึง 7.00 (ตารางที่ 4.3) แสดงให้เห็นว่า เมื่อลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อลง 10 นาที สามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อให้นานขึ้น 2 นาที

สำหรับกรรมวิธีการผลิตที่ 3 และ 4 ซึ่งมีการเพิ่มช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อให้นานขึ้นจากกรรมวิธีที่ 2 ไปอีก 2 และ 6 นาทีตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิอาหารเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อใกล้เคียงกับกรรมวิธีการผลิตที่ 2 ตามการปรับลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อให้สั้นลง (ตารางที่ 4.3) ขณะที่อุณหภูมิอาหารเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อให้นานขึ้นกว่ากรรมวิธีการผลิตที่ 2 (จาก 120.57 องศาเซลเซียส เป็น 121.40 และ 121.84 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) และส่งผลให้ค่า  $F_0$  ของกรรมวิธีการผลิตที่ 3 และ 4 เพิ่มขึ้นเป็น 9.05 และ 13.15 นาทีตามลำดับ (ตารางที่ 4.3)

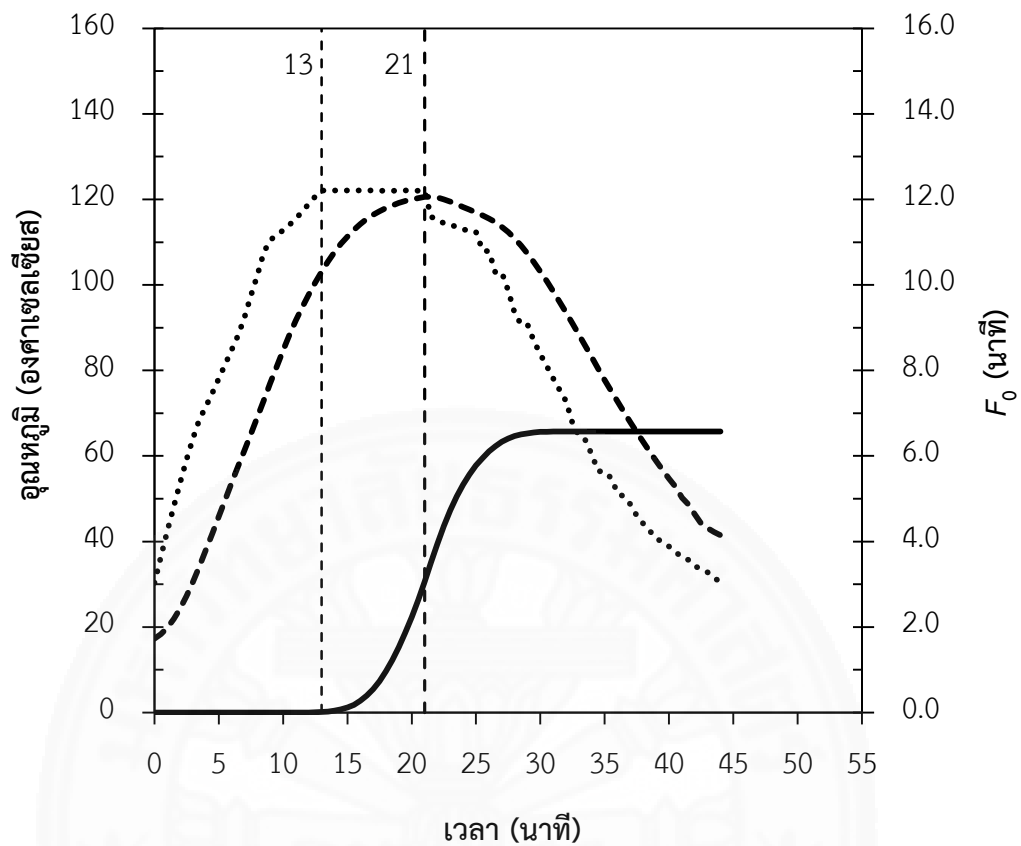
นอกจากนี้ยังพบว่า หลังสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อไปแล้ว ค่า  $F_0$  ของกระบวนการยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปอีกระยะหนึ่ง สังเกตได้จากความแตกต่างระหว่างค่า  $F_0$  เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อและ  $F_0$  เมื่อสิ้นสุดกระบวนการฆ่าเชื้อที่ไม่น้อยกว่า 3.5 นาที โดยความแตกต่างนี้จะยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อนานขึ้นเนื่องจากอาหารจะยังมีอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อสูงขึ้น (ตารางที่ 4.3) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของไก่โยนที่เป็นอาหารแข็งมีเนื้อแน่น เกิดการถ่ายโอนความร้อนด้วยการนำ (conduction) ส่งผลให้อุณหภูมิอาหารไม่ลดลงทันทีที่เครื่องฆ่าเชื้อเข้าสู่ช่วงเวลาทำให้เย็นและค่า  $F_0$  ยังเพิ่มขึ้นอยู่ช่วยให้ลดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อให้สั้นลงได้เล็กน้อย หรือถือเป็นส่วนเผื่อความปลอดภัยให้กับผลิตภัณฑ์อีกชั้นหนึ่ง (Featherstone, 2015)



**รูปที่ 4.1** การแทรกผ่านความร้อนในเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับไถ่ย่อยไนรีทอร์ทเพาซ์เมื่อใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ 23 นาทีและช่วงเวล่าฆ่าเชื้อ 6 นาที

กำหนดให้

- ..... หมายถึง อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อ
- หมายถึง อุณหภูมิไถ่ย่อยไนรีทอร์ทเพาซ์ที่จุดที่ร้อนซ้ำที่สุด
- หมายถึง  $F_0$  ของกระบวนการฆ่าเชื้อตามกรรมวิธีที่กำหนด
- หมายถึง ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อและช่วงเวล่าฆ่าเชื้อ



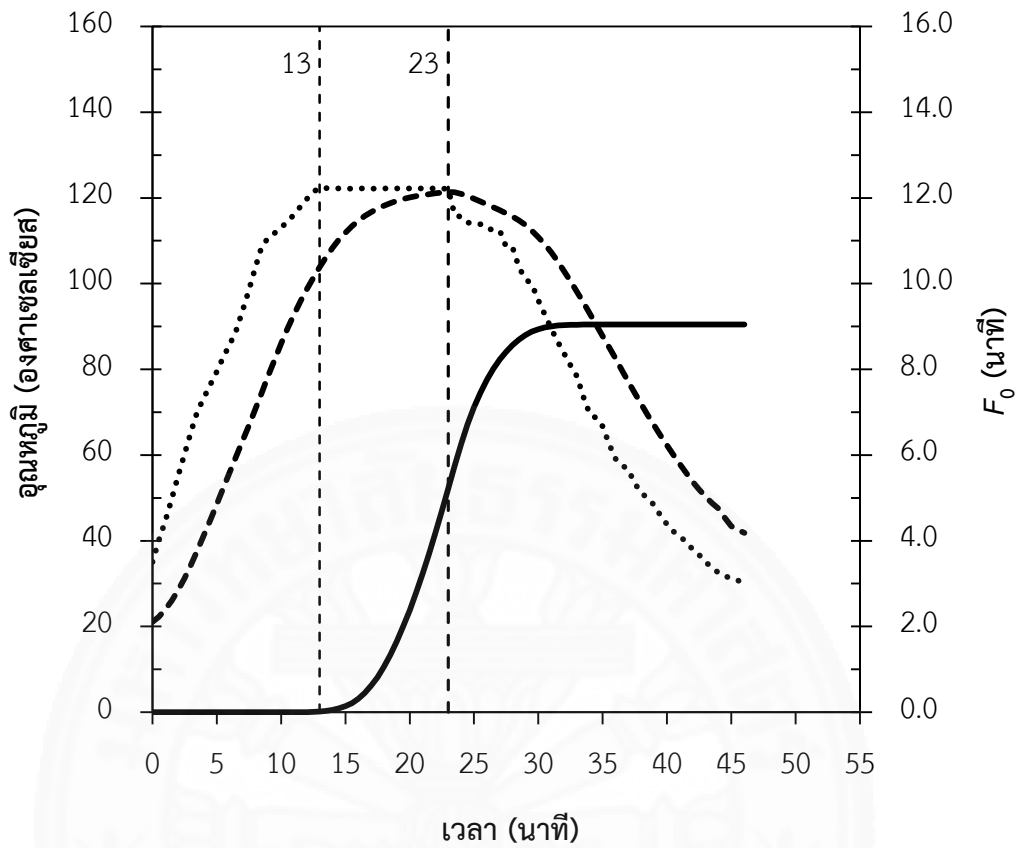
**รูปที่ 4.2** การแทรกผ่านความร้อนในเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์เมื่อใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ 13 นาทีและช่วงเวลาก่อนฆ่าเชื้อ 8 นาที

กำหนดให้ ..... หมายถึง อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อ

--- หมายถึง อุณหภูมิไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ที่จุดที่ร้อนซ้ำที่สุด

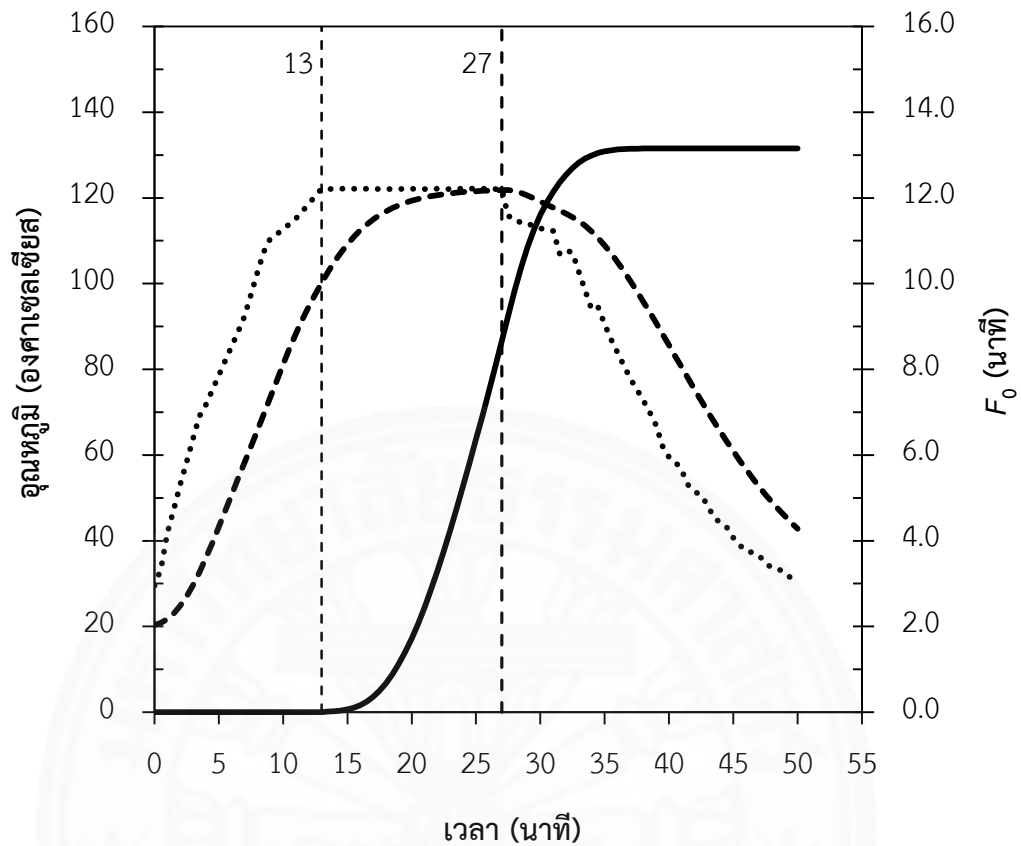
— หมายถึง  $F_0$  ของกระบวนการฆ่าเชื้อตามกรรมวิธีที่กำหนด

---- หมายถึง ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อและช่วงเวลาก่อนฆ่าเชื้อ



**รูปที่ 4.3** การแทรกผ่านความร้อนในเครื่องชงกาแฟสำหรับไถ่ยอไนรีทอร์ทเพาซ์เมื่อใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิชงกาแฟ 13 นาทีและช่วงเวลาก่อนชงกาแฟ 10 นาที กำหนดให้

- ..... หมายถึง อุณหภูมิภายในเครื่องชงกาแฟ
- หมายถึง อุณหภูมิไถ่ยอไนรีทอร์ทเพาซ์ที่จุดที่ร้อนซ้าที่สุด
- หมายถึง  $F_0$  ของกระบวนการชงกาแฟตามกรรมวิธีที่กำหนด
- หมายถึง ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิชงกาแฟและช่วงเวลาก่อนชงกาแฟ



**รูปที่ 4.4** การแทรกผ่านความร้อนในเครื่องฆ่าเชื้อสำหรับไถ่ยอไนรีทอร์ทเพาซ์เมื่อใช้กรรมวิธีการผลิตที่มีช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ 13 นาทีและช่วงเวล่าฆ่าเชื้อ 14 นาที กำหนดให้ ..... หมายถึง อุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อ  
 --- หมายถึง อุณหภูมิไถ่ยอไนรีทอร์ทเพาซ์ที่จุดที่ร้อนซ้ำที่สุด  
 ——— หมายถึง  $F_0$  ของกระบวนการฆ่าเชื้อตามกรรมวิธีที่กำหนด  
 - - - - หมายถึง ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อและช่วงเวล่าฆ่าเชื้อ

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของกระบวนการฆ่าเชื้อไก่อโยในรีโทอร์ทเพาซ์ที่ใช้กรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน

พารามิเตอร์ของกระบวนการและผลิตภัณฑ์	กรรมวิธีที่ 1	กรรมวิธีที่ 2	กรรมวิธีที่ 3	กรรมวิธีที่ 4
เวลารวมทั้งกระบวนการ (นาที)	52	44	46	50
ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ (นาที)	23	13	13	13
อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ (องศาเซลเซียส)	112.24	103.07	103.83	101.18
$F_0$ เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ (นาที)	0.21	0.02	0.02	0.00
ช่วงเวลามาเชื้อ (นาที)	6	8	10	14
อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลามาเชื้อ (องศาเซลเซียส)	120.69	120.57	121.40	121.84
$F_0$ เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลามาเชื้อ (นาที)	3.25	3.06	5.22	8.67
$F_0$ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ (นาที)	6.95	6.58	9.05	13.15

จากผลการวิจัยส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่า กรรมวิธีการผลิตที่ 4 สามารถใช้สำหรับ กระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชันของไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ได้ โดยใช้ระยะเวลาทั้งกระบวนการ 50 นาที ต่ำกว่ากรรมวิธีเดิม 2 นาที แต่ให้ค่า  $F_0$  มากกว่าเดิม 2 เท่า อยู่ในช่วง 12-15 นาที ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวสูงขึ้นเมื่อต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ทั้งนี้รายละเอียดปัจจัยวิกฤตที่ส่งผลต่อกระบวนการฆ่าเชื้อและจะต้องได้รับการควบคุมทุกครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ปัจจัยวิกฤตของกรรมวิธีการผลิตที่กำหนดสำหรับการฆ่าเชื้อไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์

รายละเอียด	ค่าที่กำหนด
น้ำหนักชิ้นไก่อย	ไม่เกิน 31 กรัม
ขนาดชิ้นไก่อย กว้าง x ยาว x หนา	ไม่เกิน 3 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร
ความดันเครื่องปิดผนึกสุญญากาศ	ไม่เกิน 10 มิลลิบาร์
จำนวนถาดต่อเครื่องฆ่าเชื้อ	ไม่เกิน 10 ถาด
จำนวนไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ต่อถาด	ไม่เกิน 30 ซอง
ชนิดของถาดในเครื่องฆ่าเชื้อ	สีเหลี่ยมผืนผ้า ขอบเตี้ย มีรูพรุน
การจัดวางรีทอร์ทเพาซ์	แนวนอน แถวละ 5 ซอง 6 แถว
อุณหภูมิไก่อยก่อนเริ่มการฆ่าเชื้อ	ไม่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส
ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ	ไม่ต่ำกว่า 13 นาที
อุณหภูมิช่วงเวลาก่อนฆ่าเชื้อ	ไม่ต่ำกว่า 122 องศาเซลเซียส
ช่วงเวลาก่อนฆ่าเชื้อ	ไม่ต่ำกว่า 14 นาที

#### 4.1.2 การประเมินค่า $F_0$ ของกระบวนการ

การประเมินค่า  $F_0$  ของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชันตามกรรมวิธีการผลิตที่กำหนด สำหรับไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์สูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ ด้วยวิธี General method แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่า กรรมวิธีการผลิตที่กำหนด (หัวข้อ 4.1.1) แม้จะเป็นกรรมวิธีการผลิตที่มาจากการทดสอบกับไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์สูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ แต่สามารถใช้กับการฆ่าเชื้อไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์สูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ ได้ทุกสูตร โดยกระบวนการฆ่าเชื้อไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ทุกสูตรมีค่า  $F_0$  ไม่ต่ำกว่า 12 นาที ทั้งนี้ไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์สูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีค่า  $F_0$  ต่ำกว่าสูตรที่ใช้ อิมัลชัน น้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร ( $p \leq 0.05$ ) แต่ไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p > 0.05$ )

ตารางที่ 4.5  $F_0$  ของกระบวนการฆ่าเชื้อไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	$F_0$ เมื่อสิ้นสุด ช่วงเวลาฆ่าเชื้อ (นาที)	$F_0$ เมื่อสิ้นสุด กระบวนการ (นาที)
มันไก่	$8.67 \pm 0.76^{ab}$	$13.15 \pm 0.52^{ab}$
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	$8.56 \pm 0.49^a$	$12.80 \pm 0.43^a$
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI	$9.64 \pm 0.26^b$	$13.76 \pm 0.17^b$
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG	$9.29 \pm 0.69^b$	$13.75 \pm 0.46^b$

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ผลการวิจัยส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนเฟสไขมันของไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์จากมันไก่เป็นน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งหรืออิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 ชนิด ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงความร้อนของไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ในระดับหนึ่ง แต่ไม่ได้มีผลมากพอที่จะทำให้จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนกรรมวิธีการผลิตที่กำหนดสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชันดังจะเห็นได้จากค่า  $F_0$  ซึ่งยังคงเป็นไปตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้

#### 4.1.3 การประเมินคุณภาพทางจุลินทรีย์

การประเมินคุณภาพทางจุลินทรีย์ของไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์สูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าว 3 รูปแบบ ต่างกันทดแทนมันไก่ หลังจากผ่านการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชันตามกรรมวิธีการผลิตที่กำหนดซึ่งให้ค่า  $F_0$  ไม่ต่ำกว่า 12 นาที แสดงดังตารางที่ 4.6

โดยพบว่า ไก่อยในรีทอร์ทเพาซ์ทุกสูตรมีคุณภาพทางจุลินทรีย์เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดในกฎหมาย ได้แก่ ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) และประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง มาตรฐานอาหารด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (กระทรวงสาธารณสุข, 2556) ซึ่งได้ระบุปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) ปริมาณยีสต์และราทั้งหมด (total yeast and mold count) และปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (coliform) รวมทั้งแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคอีก 2 ชนิด ได้แก่ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*) และแซลโมเนลลา (*Salmonella* spp.)

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังไม่พบคลอสตริเดียม โบทูลินัม (*Clostridium botulinum*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคชนิดสำคัญที่สุดที่พบในอาหารประเภทที่ผ่านการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลเซชันและมีความเป็นกรดต่ำ จึงยืนยันได้ชัดเจนว่า กรรมวิธีการผลิตที่กำหนดสามารถให้

ปริมาณความร้อนกับอาหารได้มากพอ โดยกฎหมายกำหนด  $F_0$  ไม่น้อยกว่า 3 นาที ซึ่งเพียงพอสำหรับทำลายสปอร์ของคลอสทริเดียม โบทูลินัม จนถึงระดับที่ยอมรับได้ ดังนั้นไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ทุกสูตรจึงมีความปลอดภัยต่อการบริโภค

ทั้งนี้ผลตรวจวิเคราะห์ยังพบแบคทีเรียสร้างสปอร์ที่ชอบอุณหภูมิปานกลางและไม่ต้องการออกซิเจน (anaerobic mesophilic spore-former) ในระดับต่ำมากและไม่พบแบคทีเรียสร้างสปอร์ที่ชอบอุณหภูมิสูงและไม่ต้องการออกซิเจน (anaerobic thermophilic spore-former) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ไถ่ยอในรีทอร์ทเพาซ์มีความคงตัวในการเก็บรักษามากพอจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงกว่าปกติที่พบได้ในประเทศเขตร้อน ตรงกับการกำหนดค่า  $F_0$  ที่ตั้งไว้ให้อยู่ในช่วง 12-15 นาที เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวสูงไม่เกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย



ตารางที่ 4.6 คุณภาพทางจุลินทรีย์ของไก่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน

ประเภทของจุลินทรีย์	มาตรฐาน	ไก่ยอในรีทอร์ทเพาซ์ที่ใช้เฟสไขมันต่างกัน			
		มันไก่	น้ำมันรำข้าว แช่เยือกแข็ง	อิมัลชันน้ำมันรำข้าว ผสม SPI	อิมัลชันน้ำมันรำข้าว ผสม SC กับ MTG
จุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนีต่อกรัม)	<1,000	<10	<10	15	<10
จุลินทรีย์ทั้งหมดที่ 55 องศาเซลเซียส (โคโลนีต่อกรัม)	<1,000	<10	<10	<10	<10
ยีสต์และราทั้งหมด (โคโลนีต่อกรัม)	<100	<10	<10	<10	<10
โคลิฟอร์ม (เอ็มพีเอ็นต่อกรัม)	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0	<3.0
แบคทีเรียสร้างสปอร์ที่ขอบอุณหภูมิปานกลางและไม่ ต้องการออกซิเจน (โคโลนีต่อกรัม)	ไม่ระบุ	<10	<10	<10	<10
แบคทีเรียสร้างสปอร์ที่ขอบอุณหภูมิสูงและไม่ต้องการ ออกซิเจน	ไม่ระบุ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
คลอสตริเดียม โบทูลินัม (ใน 1 กรัม)	ไม่ระบุ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
สแตฟีโลค็อกคัส ออเรียส (ใน 25 กรัม)	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
แซลโมเนลลา (ใน 25 กรัม)	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ

## 4.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของระบบอิมัลชันไก่อ

### 4.2.1 การประเมินความคงตัว

#### 4.2.1.1 อิมัลชันน้ำมันรำข้าว

การประเมินคงตัวของอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ใช้ระบบทำให้คงตัว (stabilizing system) หรือชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ต่างกัน ได้แก่ โพรตีนถั่วเหลืองสกัด และเคซีนผสมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสจากจุลินทรีย์ (MTG) โดยวัดปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด (TFR) น้ำที่แยกได้ (WR) และของแข็งที่เหลืออยู่ (FR) ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งพบว่า อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดต่ำมาก โดยมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 1 เมื่อเทียบระหว่างอิมัลชันน้ำมันรำข้าว 2 ชนิด พบว่า อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI มีปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดและน้ำที่แยกได้สูงกว่าอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC กับ MTG ( $p \leq 0.05$ ) แต่ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสัดส่วนระหว่างปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดกับน้ำที่แยกได้ยังพบว่า น้ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในของเหลวที่แยกได้จากอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI ขณะที่ในของเหลวที่แยกได้จากอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC กับ MTG จะพบว่า มีน้ำเป็นองค์ประกอบเพียงครั้งเดียว

ตารางที่ 4.7 ความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ใช้ระบบทำให้คงตัวแตกต่างกัน

ชนิดของอิมัลชันน้ำมันรำข้าว	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	ของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำที่แยกได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งที่เหลืออยู่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) <sup>ns</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	0.37 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	0.30 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.07 $\pm$ 0.04
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	0.12 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	0.06 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	0.06 $\pm$ 0.03

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

ปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดหลังจากให้ความร้อนซึ่งมีค่าต่ำมาก แสดงให้เห็นว่า อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้งชนิดที่ผสม SPI และชนิดที่ผสม SC กับ MTG มีคุณลักษณะการยึดเกาะกับไขมันและน้ำได้สูงมาก งานวิจัยของ Delgado-Pando และคณะ (2010) Jimenez-Colmenero และคณะ (2010b) และ Herrero และคณะ (2011a) ได้รายงานว่ อิมัลชันน้ำมันพืชมีคุณลักษณะการยึดเกาะกับไขมันและยึดเกาะกับน้ำที่สูงเช่นเดียวกันเพียงแต่ใช้น้ำมันพืชชนิดแตกต่างกัน นอกจากนี้ Jimenez-Colmenero (2007) ได้รายงานว่ อิมัลชันน้ำมันพืชที่ทำให้คงตัวด้วยการใช้โปรตีนถั่วเหลืองและ/หรือเคซีน ได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวางด้วยสมบัติที่เหมาะสมของอิมัลชันน้ำมันดังกล่าวในการปรับปรุงสูตรของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ผ่านการทำให้สุกหลายชนิด โดยเป็นการใช้เพื่อทดแทนไขมันสัตว์ในสูตรดั้งเดิม

ความคงตัวที่สูงกว่าของอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC กับ MTG เมื่อเทียบกับอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI อาจเกิดจากอันตรกิริยาของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสกับโปรตีนในระบบอิมัลชัน โดยในงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในการเพิ่มความคงตัวให้กับระบบอิมัลชันที่ใช้เคซีนเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (รวมไปถึงโปรตีนถั่วเหลืองด้วย) (Muguruma และคณะ, 2003; Lee และคณะ, 2006) ซึ่งเคซีนจัดเป็นซับสเตรทที่มีความเหมาะสมมากสำหรับใช้กับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (Lee และคณะ, 2006) เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสช่วยให้ฟิล์มโปรตีนที่สร้างขึ้นจากเคซีนซึ่งไปห่อหุ้มหยดน้ำมันรำข้าวในระบบอิมัลชันน้ำมันรำข้าวมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยการสร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างกรดอะมิโนไลซีนและกลูตามีนในโปรตีนเคซีน (Delgado-Pando และคณะ, 2010; Gonzalo-Pando และคณะ, 2010; Herrero และคณะ, 2011b) นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่า อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจากผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสอาจมีส่วนทำให้อิมัลชันน้ำมันที่เตรียมโดยมีส่วนผสมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมีพฤติกรรมยืดหยุ่นคล้ายของแข็งมากกว่า เมื่อเทียบกับอิมัลชันน้ำมันที่ไม่มีส่วนผสมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (Gonzalo-Pando และคณะ, 2010; Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b)

#### 4.2.1.2 อิมัลชันไก่ยอ

การประเมินคงตัวของอิมัลชันไก่ยอสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ ด้วยการวัดปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด น้ำที่แยกได้ และของแข็งที่เหลืออยู่ ดังตารางที่ 4.8 พบว่า ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์แสดงความคงตัวทั้ง 3 พารามิเตอร์ ของอิมัลชันไก่ยอทุกสูตรมีลักษณะคล้ายกันมาก โดยอิมัลชันไก่ยอทุกสูตรมีปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำในช่วงร้อยละ 0.91 ถึง 2.01 ทั้งนี้อิมัลชันไก่ยอสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่มีปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดสูงสุดเมื่อเทียบกับอิมัลชันไก่ยอสูตรอื่นที่ใช้ น้ำมันรำข้าว ( $p > 0.05$ ) ในขณะที่อิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแซ่เยือกแข็งทดแทนมันไก่มีปริมาณต่ำที่สุดสำหรับของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดของอิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

และสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งจะพบว่า มีปริมาณต่ำกว่าอิมัลชันไคยอสูตรควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) แต่สำหรับอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI กลับพบว่า ไม่ต่างจากอิมัลชันไคยอสูตรควบคุม ( $p > 0.05$ )

นอกจากนี้ถึงแม้ว่าปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดและน้ำที่แยกได้ของอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI จะมากกว่าอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC กับ MTG ( $p \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4.7) แต่เมื่อใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 ชนิด ทดแทนมันไก่ในอิมัลชันไคยอพบว่า อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตรมีปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดและน้ำที่แยกได้ไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ )

เมื่อพิจารณาน้ำที่แยกได้พบว่า มีเพียงอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเท่านั้นที่มีปริมาณต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p \leq 0.05$ ) ขณะที่อิมัลชันไคยออีก 2 สูตร ที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่อมีปริมาณน้ำที่แยกได้ไม่ต่างจากสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p > 0.05$ ) นอกจากนี้จะเห็นว่า น้ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด โดยคิดเป็นร้อยละ 86.8 ถึง 92.4 (โดยน้ำหนัก) โดยอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีสัดส่วนน้ำในของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดต่ำที่สุด (ร้อยละ 86.8) ขณะที่อิมัลชันไคยอสูตรอื่นมีสัดส่วนของน้ำใกล้เคียงกันที่ประมาณร้อยละ 92 ของของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด

ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่จากของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด (เมื่อระเหยน้ำออกไปจนหมดแล้ว) ของอิมัลชันไคยอทุกสูตรนั้นไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) แม้ว่าสัดส่วนของของแข็งที่เหลืออยู่ในของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดจากอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งน่าจะมีค่ามากที่สุดก็ตาม (เนื่องจากเป็นสูตรที่มีสัดส่วนน้ำน้อยที่สุดในของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด)

ตารางที่ 4.8 ความคงตัวของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	ของเหลวที่แยกได้ทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำที่แยกได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของแข็งที่เหลืออยู่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) <sup>ns</sup>
มันไก่	2.01 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	1.85 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	0.16 $\pm$ 0.01
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	0.91 $\pm$ 0.08 <sup>c</sup>	0.79 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	0.11 $\pm$ 0.04
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	1.67 $\pm$ 0.33 <sup>ab</sup>	1.54 $\pm$ 0.30 <sup>a</sup>	0.13 $\pm$ 0.04
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	1.44 $\pm$ 0.40 <sup>bc</sup>	1.33 $\pm$ 0.38 <sup>ab</sup>	0.10 $\pm$ 0.02

<sup>a,b,c</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

การประเมินความคงตัวของอิมัลชันไก่อยู่ชี้ให้เห็นว่า อิมัลชันไก่อยู่ทุกสูตรไม่ว่าจะใช้เฟสไขมันชนิดใดมีความคงตัวในระดับสูงเมื่อพิจารณาจากปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดซึ่งมีปริมาณต่ำมาก ทั้งนี้โดยทั่วไปกลไกการทำให้ไขมันสัตว์ที่เป็นส่วนผสมในอิมัลชันเนื้อสัตว์คงตัวเกี่ยวข้องโดยตรงกับการสร้างชั้นบางๆ ของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ (โดยเฉพาะโปรตีนไมโอซิน) ห่อหุ้มเม็ดไขมันไว้ เรียกว่า การสร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟส (IPF) (Gordon และ Barbut, 1992) ความคงตัวที่เพิ่มขึ้นของอิมัลชันไก่อยู่สูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งอาจเกิดจากขนาดของหยดน้ำมันรำข้าวที่เล็กกว่าและกระจายตัวได้มากกว่า เมื่อเทียบกับเม็ดไขมันของมันไก่ในอิมัลชันไก่อยู่สูตรควบคุม พื้นที่ผิวของหยดน้ำมันที่ถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีนจึงเพิ่มมากขึ้น การเกิดฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสมากขึ้น อันตรกิริยาระหว่างหยดน้ำมันและโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่เป็นโครงสร้างของอิมัลชันจึงเพิ่มขึ้นด้วย โครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์จึงแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้มีความคงตัวสูงขึ้น ดังที่มิงงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า การใช้ไขมันทดแทนไขมันจากสัตว์ส่งผลให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวสูงขึ้น (Youssef และ Barbut, 2009; Youssef และ Barbut, 2010; Delgado-Pando และคณะ, 2011; Zhuang และคณะ, 2016)

การผสมอิมัลชันน้ำมันให้ทำหน้าที่เป็นเฟสไขมันในการเตรียมอิมัลชันเนื้อสัตว์ เป็นกระบวนการที่เรียกว่า การทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำ (double-emulsification) โดยทั่วไปส่งผลให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่จะใช้ในการสร้างเป็นโครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์มีมากขึ้น โปรตีนที่เพิ่มขึ้นนี้มีสาเหตุเนื่องจากหยดน้ำมันในอิมัลชันน้ำมันนั้นได้ถูกทำให้คงตัวโดยการห่อหุ้มด้วยฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสมาก่อนแล้ว โดยเป็นโปรตีนที่ไม่ใช่โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จากเนื้อสัตว์ ซึ่งผสมลงไประหว่างการทำให้เกิดอิมัลชันก่อนล่วงหน้า (pre-emulsification) ดังนั้น ความต้องการโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์เพื่อใช้ในการสร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสในระหว่างการทำให้เกิดอิมัลชันเนื้อสัตว์จึงลดลงมาก (Herrero และคณะ, 2012) โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ส่วนนี้จึงไปทำหน้าที่สร้างเป็นโครงสร้างของอิมัลชันเนื้อสัตว์ได้อย่างเต็มที่ส่งผลให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวมากขึ้น นอกจากนี้ Carballo และคณะ (1996a) ยังอธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงไขมันหรือความชื้นในส่วนผสมของอิมัลชันเนื้อสัตว์จะส่งผลต่อความเข้มข้นของโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโครงร่างตาข่ายโปรตีนหรือการเกิดโครงสร้างเจลในอิมัลชันเนื้อสัตว์ และส่งผลต่อความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์

จากคำอธิบายข้างต้นของการทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ความคงตัวของอิมัลชันไก่อยู่สูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SPI เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มากพอที่จะทำให้แตกต่าง (สูงกว่า) เมื่อเทียบกับอิมัลชันไก่อยู่สูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณน้ำที่มากในอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 42 โดยคำนวณจากปริมาณน้ำที่เติมลงไปเป็นส่วนผสมในอิมัลชันน้ำมันรำข้าว ทั้งนี้ น้ำเป็นส่วนผสมที่มีหน้าที่ทดแทนการลดลงของ

น้ำมันรำข้าวในสูตร ซึ่งเมื่อเทียบระหว่างอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งกับสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวจะพบว่า สูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าว นั้นมีปริมาณน้ำมันรำข้าวลดลงไปประมาณ ครึ่งหนึ่ง และไม่ได้มีการลดปริมาณน้ำแข็งที่ใช้เป็นส่วนผสมในอิมัลชันไคยอ รวมทั้งไม่ได้มีการเติมสาร ยึดเกาะหรือสารเพิ่มเนื้อเข้ามา น้ำที่เพิ่มขึ้นในอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI จึง ทำให้ต้องการโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์มากขึ้นเพื่อเกิดโครงสร้างเจลของอิมัลชันเนื้อสัตว์ แต่ได้รับการ ชดเชยไปส่วนใหญ่ด้วยโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่มีอยู่มากขึ้นจากการทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำ

ในทางกลับกันความคงตัวของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าว ผสม SC กับ MTG เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาจากปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดซึ่งต่ำกว่า อิมัลชันไคยอสูตรควบคุมที่ไขมันไก่ ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นบทบาทสำคัญของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ในการทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์คงตัวเมื่อใช้ร่วมกับเคซีน เนื่องจากปัจจัยอื่นไม่มีความแตกต่างกันทั้งการ ทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำหรือการเพิ่มขึ้นของน้ำในสูตร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่รายงานว่า เอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนสสามารถสร้างพันธะเชื่อมโยงในโปรตีนเนื้อสัตว์ได้ด้วย โดยโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่ ละลายน้ำแล้วเป็นซับสเตรทที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเช่นกัน (Kuraishi และคณะ, 1997) ดังนั้นจึงช่วยเสริมอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเนื้อสัตว์กับเคซีนและส่งผล ให้โครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวมากยิ่งขึ้น (Kurth และ Rogers, 1984)

อย่างไรก็ตามความคงตัวที่ไม่แตกต่างกัน เมื่อเทียบระหว่างอิมัลชันไคยอ สูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI และสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG แม้ อิมัลชัน น้ำมันรำข้าว 2 ชนิด จะมีความคงตัวต่างกันมาก อาจเป็นเพราะกลไกที่ทำให้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 ชนิด มีความคงตัวในอิมัลชันเนื้อสัตว์ไม่แตกต่างกัน อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโปรตีนถั่วเหลือง สกัดกับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ไม่แตกต่างจากระหว่างเคซีนกับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ โดยทั้งโปรตีน ถั่วเหลืองสกัดและเคซีนต่างทำหน้าที่เป็นฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสห่อหุ้มหยดน้ำมันรำข้าวเหมือนกัน เพียงแต่ในอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG นั้นมีส่วนผสมของเอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนสด้วยจึงส่งผลให้ความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์มีแนวโน้มที่สูงกว่าดังเหตุผลที่ อธิบายไปก่อนหน้านี้

#### 4.2.2 การประเมินการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อน

##### 4.2.2.1 อิมัลชันไคยอหลังทำให้สุก

การประเมินการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไคยอสูตร ควบคุมที่ไขมันไก่ และสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนไขมันไก่ ด้วยการวัดน้ำหนัก ที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งจะพบว่า ระดับการสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันไคยอทุกสูตร หลังทำให้สุกด้วยความร้อนอยู่ในระดับต่ำโดยมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ของน้ำหนักอิมัลชันก่อนทำให้สุก (ค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 2.04 ถึง 6.28) หรือคิดเป็นร้อยละผลได้ของกระบวนการแปรรูป (processing

yield) ประมาณร้อยละ 93 ถึง 98 โดยอิมัลชันไคยอสูตรควบคุมที่ใช้มันไคมีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งประมาณ 3 เท่า ( $p \leq 0.05$ ) ขณะที่อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร มีการสูญเสียน้ำหนักไม่ต่างกัน ( $p > 0.05$ ) และทั้ง 2 สูตร มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอิมัลชันไคยอสูตรควบคุมที่ใช้มันไค ( $p \leq 0.05$ )

น้ำหนักที่สูญเสียเกิดจากการสูญเสียของเหลวระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งจะเห็นว่า น้ำเป็นองค์ประกอบเกือบทั้งหมดในของเหลวที่สูญเสีย ซึ่งของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไคยอทุกสูตรระหว่างทำให้สุกมีปริมาณน้ำไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 96 ถึง 97 (โดยน้ำหนัก) หรือมีน้ำสูญเสียจากอิมัลชันไคยอประมาณร้อยละ 2 ถึง 6

สำหรับปริมาณความชื้นของอิมัลชันไคยอหลังทำให้สุกอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ที่มีความชื้นใกล้เคียงกัน ได้แก่ กลุ่มที่ประกอบด้วยอิมัลชันไคยอสูตรควบคุมที่ใช้มันไคกับสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง และกลุ่มที่ประกอบด้วยอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไคทั้ง 2 สูตร โดยกลุ่มหลังมีความชื้นสูงกว่ากลุ่มแรกร้อยละ 6-7 (โดยน้ำหนัก)

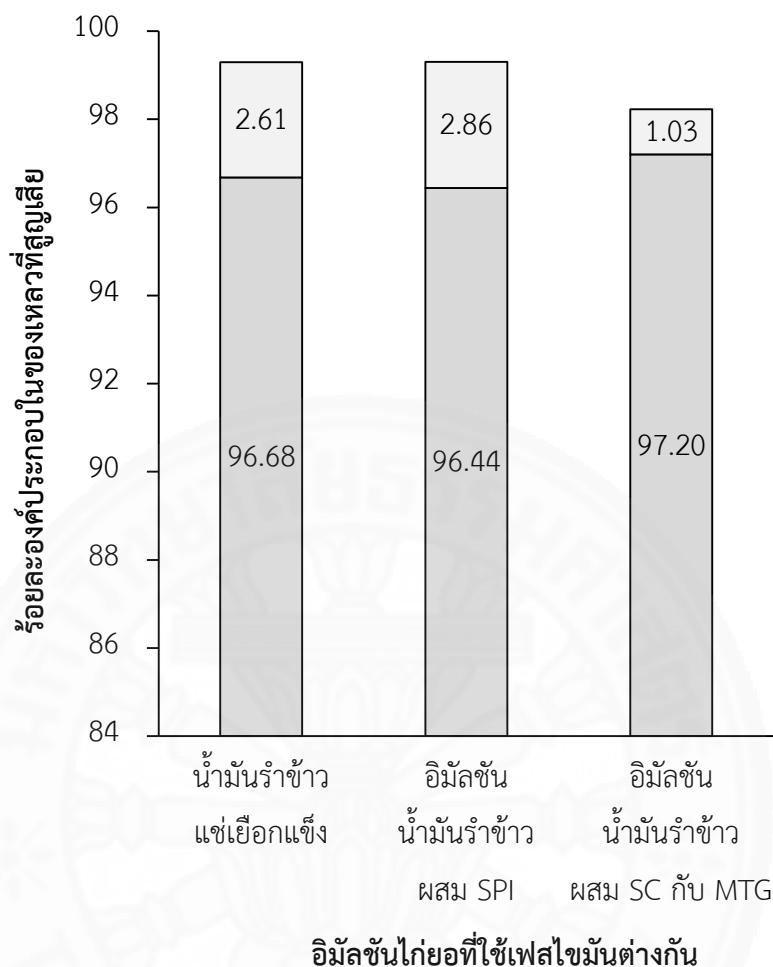
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของอิมัลชันไคยอแต่ละสูตรหลังทำให้สุกพบว่า มีความแตกต่างกันในทิศทางเดียวกับการสูญเสียน้ำหนัก ส่วนองค์ประกอบบางชนิดในของเหลวที่สูญเสียระหว่างการทำให้สุกจากอิมัลชันไคยอทั้ง 4 สูตร ได้แก่ ความชื้นและไขมัน แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นว่า อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG มีร้อยละของไขมันในของเหลวที่สูญเสียหลังให้ความร้อนต่ำที่สุด และต่ำกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI ประมาณ 2.5 เท่า

ตารางที่ 4.9 การสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	น้ำหนักที่สูญเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความชื้นของ ของเหลวที่สูญเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก) <sup>ns</sup>	น้ำที่สูญเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
มันไก่	6.28 $\pm$ 0.88 <sup>a</sup>	96.67 $\pm$ 1.51	6.07 $\pm$ 0.85 <sup>a</sup>	60.93 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	2.04 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	96.68 $\pm$ 0.65	1.98 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	58.25 $\pm$ 0.61 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	5.17 $\pm$ 0.86 <sup>c</sup>	96.44 $\pm$ 1.13	4.14 $\pm$ 0.18 <sup>c</sup>	66.09 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	5.45 $\pm$ 0.42 <sup>c</sup>	97.20 $\pm$ 0.35	5.30 $\pm$ 0.41 <sup>d</sup>	67.30 $\pm$ 0.35 <sup>d</sup>

<sup>a,b,c,d</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )



**รูปที่ 4.5** องค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก

กำหนดให้  หมายถึง ความชื้น  
 หมายถึง ไขมัน

เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักระหว่างทำให้สุกของอิมัลชันไก่ยอ รวมถึงความชื้นในของเหลวที่สูญเสียระหว่างทำให้สุกจะเห็นได้ว่า มีทิศทางเดียวกับความคงตัวของอิมัลชันไก่ยอ (ปริมาณของเหลวที่แยกได้ทั้งหมดและปริมาณน้ำที่แยกได้) การสูญเสียน้ำหนักระหว่างทำให้สุกของอิมัลชันไก่ยอจึงสัมพันธ์กับความคงตัว โดยการสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำลงจะหมายถึงความคงตัวที่สูงขึ้นและสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกันดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2.1.2 ทั้งนี้การตกตะกอนจากความร้อนของโปรตีนไมโอโพรตีนระหว่างทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์สุกทำให้โปรตีนไมโอโพรตีนอุ้มน้ำได้ต่ำลงตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียส ขึ้นไป (Barbut, 1999)

สำหรับปริมาณความชื้นของอิมัลชันไก่อหลังทำให้สุกจะเห็นได้ว่า มีความสอดคล้องกับส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมอิมัลชันในแต่ละสูตร โดยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่มีความชื้นสูงกว่า เนื่องจากมีส่วนผสมของน้ำมากกว่าซึ่งเป็นน้ำที่ผสมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันน้ำมันรำข้าว (ร้อยละ 42 ของส่วนผสมอิมัลชันน้ำมัน) นอกจากนี้แม้อิมัลชันไก่อสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่มีการสูญเสียน้ำมากกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง (แตกต่างกันประมาณร้อยละ 4 ของน้ำหนักของอิมัลชันไก่อก่อนทำให้สุก) แต่ความชื้นของอิมัลชันไก่อสูตรควบคุมไม่ได้ลดลงจนต่ำกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง ซึ่งอาจเป็นเพราะน้ำที่ยังตกค้างอยู่ในมันไก่จากขั้นตอนการแยกมันไก่ออกจากหนังไก่ที่มีความชื้นค่อนข้างสูงส่งผลให้อิมัลชันไก่อสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่มีความชื้นก่อนทำให้สุกที่สูงกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งได้

ในระหว่างขั้นตอนการทำให้สุก เม็ดไขมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์จะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียสขึ้นไป (Barbut, 1999) โดยในอิมัลชันเนื้อสัตว์หลังทำให้สุกจะพบว่า ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่ห่อหุ้มเม็ดไขมันไว้จะเสียหายโดยเกิดช่องเปิดหรือรูขนาดเล็กจำนวนหนึ่งแต่ไขมันจะไม่แยกตัวออกมา โดยการแยกตัวของไขมันอาจเกิดขึ้นถ้าฟิล์มโปรตีนถูกทำลายไปก่อนที่โครงร่างตาข่ายของโปรตีนจะสร้างขึ้นเมื่อโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์เกิดการตกตะกอน (Zayas, 2012) การแยกตัวของไขมันระหว่างการทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์สุกอาจเกิดจากการลอยของไขมันมาที่ผิวหน้า (creaming) การเกาะกลุ่มของเม็ดไขมัน (flocculation) และการรวมตัวของเม็ดไขมัน (coalescence) (Toldra, 2010) การสูญเสียไขมันของอิมัลชันเนื้อสัตว์มักเกิดตามหลังการสูญเสียน้ำ และการเกิดช่อง (channel) ในโครงสร้างอิมัลชันนับเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียไขมันและไขมันเกิดขึ้นได้บางส่วน โดยในอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่มีความคงตัวต่ำจะพบว่า เม็ดไขมันจะเกิดช่องที่ทำให้ไขมันสูญเสียออกผ่านฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟส (Barbut, 2015)

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า องค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียในระหว่างขั้นตอนทำให้สุกของอิมัลชันเนื้อสัตว์จะชี้ให้เห็นความคงตัวของอิมัลชันระหว่างทำให้สุกและยังรวมไปถึงความคงตัวของเฟสไขมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์ได้ด้วย

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียระหว่างอิมัลชันไก่อสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่จะเห็นว่า อิมัลชันไก่อสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG จะมีปริมาณไขมันในของเหลวที่สูญเสียต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI (อิมัลชันไก่อ 2 สูตร มีการสูญเสียน้ำหนักไม่แตกต่างกัน) ซึ่งผลการวิจัยส่วนนี้แสดงให้เห็นบทบาทที่สำคัญของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสร่วมกับเคซีนในการเพิ่มความคงตัวให้กับอิมัลชันน้ำมันที่ใช้เป็นเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อ โดยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มโปรตีนซึ่งห่อหุ้มหยดน้ำมันเอาไว้ และสอดคล้องกับผลการวัดความคงตัวของอิมัลชันน้ำมันรำข้าวในหัวข้อ 4.2.1.1

สำหรับองค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งซึ่งแตกต่างจากสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI เพียงเล็กน้อยอาจชี้ให้เห็นว่า ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสในอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีความเสียหายเช่นกัน แต่ในภาพรวมโครงสร้างตาข่ายของโปรตีนที่ล้อมรอบหยดน้ำมัน มีความแข็งแรงมากกว่า สอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น

#### 4.2.2.2 อิมัลชันไคยอหลังฆ่าเชื้อ

การสูญเสียน้ำหนักจากขั้นตอนฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ของอิมัลชันไคยอสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ จะแสดงด้วย พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.10 ส่วนรูปที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบบางชนิดในของเหลวที่สูญเสีย ซึ่งเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่สูญเสียหลังฆ่าเชื้อแล้ว (ตารางที่ 4.10) จะเห็นได้ว่าการสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตรไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) และอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 10 ถึง 11 ของน้ำหนักอิมัลชันก่อนฆ่าเชื้อ แต่มากกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง ( $p \leq 0.05$ ) ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 7 อย่างไรก็ตามร้อยละ ผลได้ของกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์สำหรับอิมัลชันไคยอทุกสูตรยังคงอยู่ในระดับที่สูง (มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 88.66 ไปจนถึงร้อยละ 92.67)

เมื่อรวมการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อนทั้งขั้นตอนการทำให้สุกและการฆ่าเชื้อจะพบว่า อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ แต่แตกต่างกันน้อยเพียงประมาณร้อยละ 1 ถึง 2 ของน้ำหนักอิมัลชันไคยอก่อนทำให้สุก ซึ่งอาจอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้เนื่องจากเป็นสูตรที่ลดไขมันลงไปต่ำกว่าสูตรควบคุมประมาณครึ่งหนึ่ง ขณะที่อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีการสูญเสียน้ำหนักรวม 2 ขั้นตอนที่ทำให้ความร้อนต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 9.37 ของน้ำหนักอิมัลชันไคยอก่อนทำให้สุก และต่ำกว่าประมาณ 1 ใน 3 เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่

สำหรับความชื้นในของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไคยอทุกสูตรไม่พบว่ามี ความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในของเหลวที่สูญเสียระหว่างทำให้สุก ปริมาณน้ำที่สูญเสียระหว่างฆ่าเชื้อของอิมัลชันไคยอแต่ละสูตรจึงมีทิศทางเดียวกับการสูญเสียน้ำหนักหลังฆ่าเชื้อ นอกจากนี้ความชื้นที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 85-88 ยังชี้ให้เห็นว่า น้ำเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในของเหลวที่สูญเสีย เช่นเดียวกับในของเหลวที่สูญเสียระหว่างทำให้สุก รวมทั้งยังพบว่าความชื้นของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่อังคงสูงกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมและสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งทดแทนมันไก่

องค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง (รูปที่ 4.6) มีสัดส่วนไขมันประมาณร้อยละ 11 (โดยน้ำหนัก) ซึ่งมากกว่าเมื่อเทียบกับอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร โดยของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SPI มีปริมาณไขมันต่ำที่สุด และต่ำกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งประมาณ 2 เท่า ส่วนของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SC กับ MTG มีปริมาณไขมันสูงกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SPI ประมาณร้อยละ 4 (โดยน้ำหนัก)

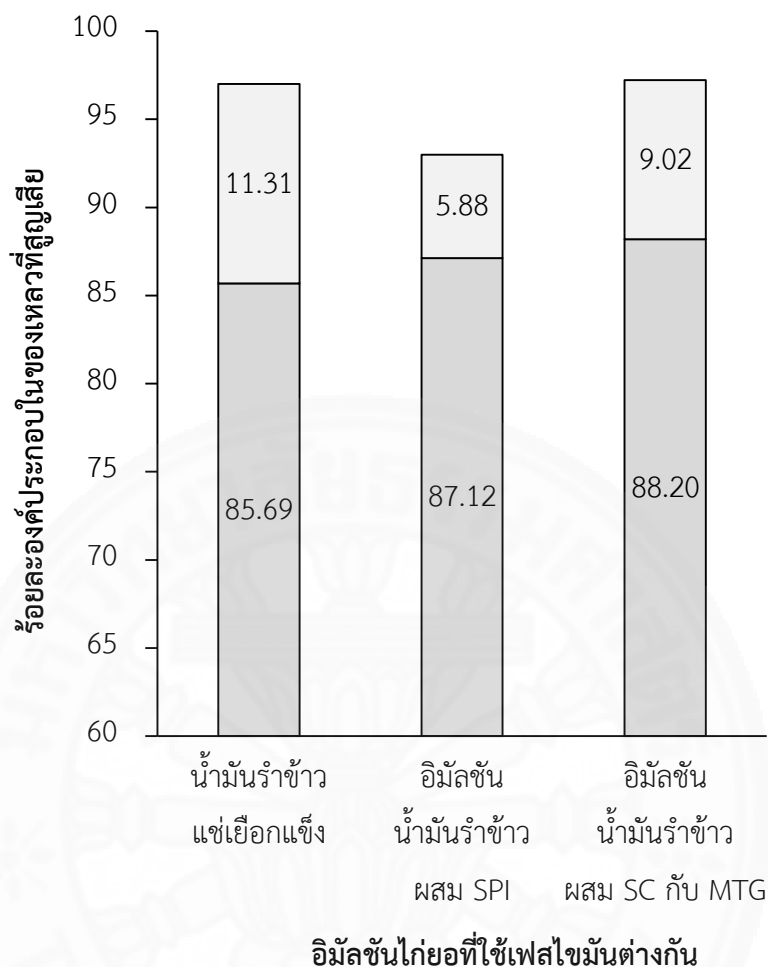


ตารางที่ 4.10 การสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	น้ำหนักที่สูญเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความชื้นของ ของเหลวที่สูญเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก) <sup>ns</sup>	น้ำที่สูญเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
มันไก่	7.90 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	87.22 $\pm$ 0.80	6.89 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	57.49 $\pm$ 1.50 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	7.33 $\pm$ 0.43 <sup>a</sup>	85.69 $\pm$ 0.54	6.28 $\pm$ 0.37 <sup>a</sup>	55.56 $\pm$ 0.39 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	10.73 $\pm$ 0.37 <sup>b</sup>	87.12 $\pm$ 0.95	9.35 $\pm$ 0.33 <sup>b</sup>	63.03 $\pm$ 0.21 <sup>c</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	11.34 $\pm$ 0.74 <sup>b</sup>	88.20 $\pm$ 0.36	10.00 $\pm$ 0.66 <sup>b</sup>	63.60 $\pm$ 0.23 <sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ

กำหนดให้  หมายถึง ความชื้น  
 หมายถึง ไขมัน

ผลการวิจัยส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของอิมัลชันไก่ยอทุกสูตร และส่งผลให้โครงร่างตาข่ายโปรตีนในอิมัลชันเนื้อสัตว์ถูกทำลายไปบางส่วนจนไม่สามารถกักเก็บน้ำไว้ได้มากเท่าเดิม การขยายตัวของส่วนผสมทั้งน้ำและไขมันรวมไปถึงอากาศมีส่วนทำให้เกิดการสูญเสียของเหลวโดยเฉพาะการทำลายฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่ห่อหุ้มเม็ดไขมันหรือหยดน้ำมันเอาไว้ โดยความแตกต่างของน้ำหนักที่สูญเสียและความชื้นของอิมัลชันไก่ยอหลังฆ่าเชื้อระหว่างอิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร กับสูตรอื่นอาจเป็นเพราะสัดส่วนน้ำในส่วนผสมของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่สูงกว่า ทำให้เมื่อโครงสร้างเจลของอิมัลชัน

เนื้อสัตว์เสียหายจากความร้อนจึงมีปริมาณน้ำที่สูญเสียออกมามากกว่า สอดคล้องกับ Toldra (2010) ที่กล่าวว่า การสูญเสียของอิมัลชันเนื้อสัตว์จากความร้อนจะขึ้นกับปริมาณเกลือและปริมาณน้ำในอิมัลชันเนื้อสัตว์

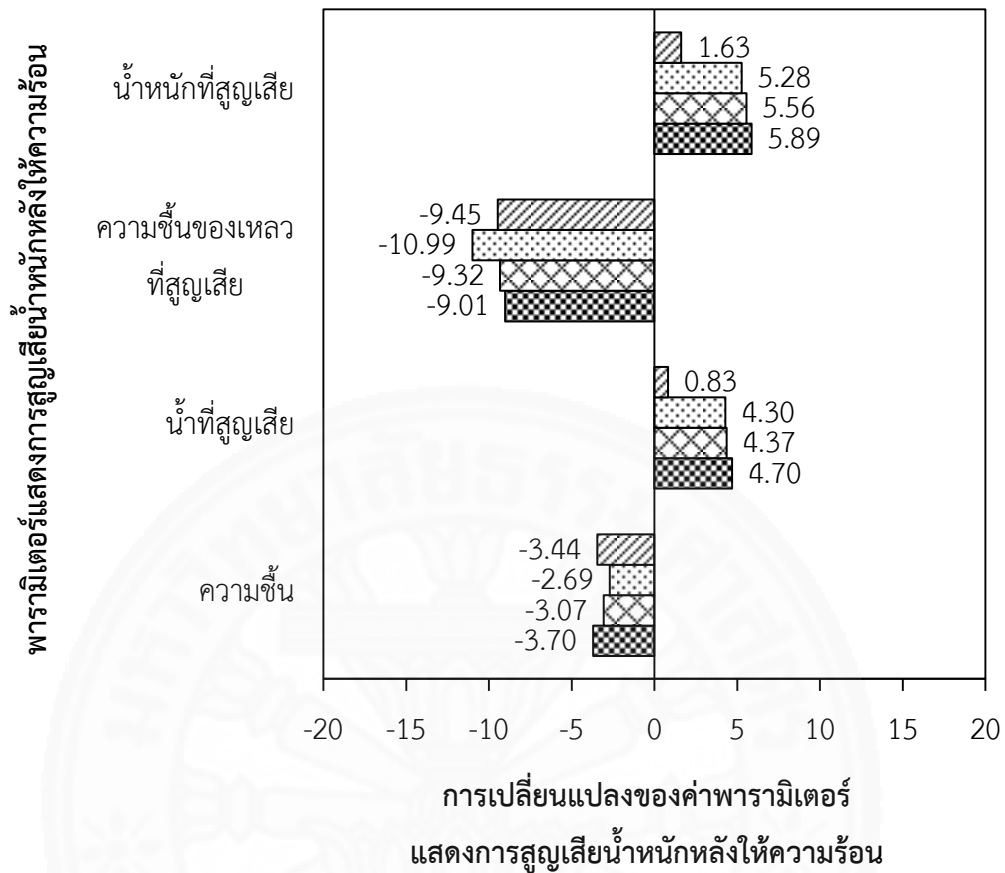
สำหรับปริมาณความชื้นในของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไก่อยหลังฆ่าเชื้อทุกสูตรแม้จะสูงแต่ชี้ให้เห็นว่า มีองค์ประกอบอื่นของอิมัลชันไก่อยที่สูญเสียไปในระดับหนึ่งเช่นกัน โดยเมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบในของเหลวที่สูญเสียจะเห็นได้ว่ามีไขมันอยู่จำนวนหนึ่งที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับในของเหลวที่สูญเสียระหว่างทำให้สุกแสดงให้เห็นว่า การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มีผลในการรบกวนอย่างชัดเจนต่อระบบที่ทำให้เฟสไขมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์คงตัว ทั้งนี้การให้ความร้อนกับอิมัลชันเนื้อสัตว์ ถ้าใช้อุณหภูมิสูงหรือใช้ระยะเวลายาวนาน เม็ดไขมันมีการขยายตัวในขณะที่โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์มีการหดตัวลง ไขมันยังทำให้โครงร่างตาข่ายของโปรตีนฉีกขาดและเคลื่อนที่ขึ้นมายังผิวหน้าของอิมัลชันเนื้อสัตว์ (Sams, 2001)

ไขมันในของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง ซึ่งสูงกว่าอีก 2 สูตร อาจเป็นข้อบ่งชี้ให้เห็นว่า फिल्मโปรตีนระหว่างเฟสที่สร้างขึ้นจากโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์มีความทนทานต่อการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ได้ไม่แตกต่างกับฟิล์มที่สร้างจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือที่สร้างจากเคซีนเมื่อใช้ร่วมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

ส่วนของเหลวที่สูญเสียจากอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG ซึ่งมีไขมันเป็นองค์ประกอบมากกว่าสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI อาจเป็นเพราะความแข็งที่มากเกินไปของฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่สร้างจากเคซีนโดยมีเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้น ทำให้มีความยืดหยุ่นไม่มากเท่ากับฟิล์มที่สร้างจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เมื่อน้ำมันรำข้าวได้รับความร้อนและขยายตัวจึงทำให้ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสเสียหายมากกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจสอดคล้องกับคำอธิบายว่า การเกิดฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่มีลักษณะค่อนข้างบางและยืดหยุ่นได้ล้อมรอบเม็ดไขมันทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวที่สูงระหว่างได้รับความร้อน ขณะที่ฟิล์มโปรตีนซึ่งหนาและไม่ยืดหยุ่นจะไม่ยอมให้ไขมันขยายตัวระหว่างได้รับความร้อนจึงเกิดแรงดันที่มากเกินไปจนดันให้ฟิล์มโปรตีนเกิดการฉีกขาดเป็นรูขนาดใหญ่และเกิดการสูญเสียไขมันรวมทั้งระบบอิมัลชันถูกทำลายด้วย (Jones และ Mandigo, 1982; Youssef และ Barbut, 2011; Barbut, 2015) อย่างไรก็ตามการเกิดรูขนาดเล็กบนฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสในขณะที่ให้ความร้อนอิมัลชันกลับมีความสำคัญในการเป็นกลไกช่วยลดแรงดันที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของเม็ดไขมันและทำให้ความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์ยังคงอยู่ (Barbut, 2015) นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่กล่าวว่า การสูญเสียน้ำหนักของอิมัลชันเนื้อสัตว์อาจเกิดขึ้นจากโครงร่างตาข่ายของโปรตีนที่สานต่อกันอย่างแน่นมากจนขึ้นไปสร้างแรงดันให้กับส่วนเฟสไขมันและส่งผลให้เกิดการผลักดันให้เฟสไขมันเข้ามาเบียดกันจนเกิดการรวมตัวของเม็ดไขมันในที่สุดโดยเกิดขึ้นระหว่างที่อิมัลชันเนื้อสัตว์ได้รับความร้อน

ความร้อน และยังสามารถทำให้โครงร่างตาข่ายของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์บางส่วนในอิมัลชันเนื้อสัตว์บีบ น้ำออกมามากขึ้นอีกด้วย (Youssef และ Barbut, 2011) นอกจากนี้อาจเป็นผลจากอุณหภูมิในการ เกิดเจลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการทำให้อิมัลชันไคโยสุกแต่ระหว่าง การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์อุณหภูมิสูงพอจะทำให้เกิดเจลได้จึงช่วยทำให้ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสที่ ห่อหุ้มหยดน้ำมันมีความแข็งแรงมากขึ้นและทนต่อความร้อนได้ดี (Zayas, 2012)

การเปรียบเทียบความแตกต่างของพารามิเตอร์แสดงการสูญเสียน้ำหนัก ระหว่างหลังทำให้สุกกับหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่า การฆ่าเชื้อจะส่งผลให้ ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียและน้ำที่สูญเสียของอิมัลชันไคโยทุกสูตรสูงขึ้นอีกเมื่อเทียบกับการทำให้ สุก โดยอิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ไขมันไก่มีการเพิ่มขึ้นต่ำที่สุดส่วนสูตรอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ ปริมาณความชื้นในของเหลวที่สูญเสียของอิมัลชันไคโยทุกสูตรต่ำลงซึ่งหมายถึงว่า มีการสูญเสีย องค์ประกอบอื่นสูงขึ้นระหว่างการฆ่าเชื้อเทียบกับระหว่างการทำให้สุก อย่างไรก็ตามการฆ่าเชื้อมีผลให้ ความชื้นของอิมัลชันไคโยทุกสูตรลดลงไปมากกว่าเดิมไม่มากนัก การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักน้ำที่สูญเสีย หลังฆ่าเชื้อเมื่อเทียบกับหลังทำให้สุกของอิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ไขมันไก่ซึ่งต่ำกว่าสูตรอื่น อาจเป็น เพราะอิมัลชันไคโยสูตรอื่นมีความคงตัวในระหว่างการทำให้สุกสูงกว่าสูตรควบคุม แต่เมื่อผ่านการ ฆ่าเชื้อที่ใช้ความร้อนสูงกว่าก็ไม่อาจจะรักษาความคงตัวเอาไว้ในระดับสูงได้อีก น้ำหนักที่สูญเสียหลัง ฆ่าเชื้อจึงมีความแตกต่างจากหลังทำให้สุกมากกว่าสูตรควบคุม และส่งผลต่อปริมาณน้ำที่สูญเสียใน ทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.7 ความแตกต่างของการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อนของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้มันไก่

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง มีค่าต่ำกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุก

ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง มีค่าสูงกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุก

## 4.2.3 การประเมินความสามารถในการอุ้มน้ำ

### 4.2.3.1 อิมัลชันไคยอลหลังทำให้สุก

การประเมินความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไคยอลหลังทำให้สุก สำหรับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ ด้วยการวัดน้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัด (EFL) และปริมาณของเหลวที่บีบอัดได้ (EF) แสดงดังตารางที่ 4.11

โดยเมื่อพารามิเตอร์ 2 ค่า เพิ่มขึ้น จึงหมายถึงว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์จะมีความสามารถในการอุ้มน้ำที่ต่ำลง (อิมัลชันเนื้อสัตว์กักเก็บน้ำเอาไว้ภายในโครงสร้างได้ต่ำลง) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 2 นี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และในภาพรวมค่าที่วัดได้ไม่สูงนัก โดยมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ทั้งนี้ น้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดและของเหลวที่บีบอัดได้ของอิมัลชันไคยอลสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแซ่เยือกแข็งทดแทนมันไก่อ่ากว่าอิมัลชันไคยอลสูตรอื่นทั้งหมด ( $p \leq 0.05$ ) และเมื่อเทียบกับอิมัลชันไคยอลสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่พบว่า อิมัลชันไคยอลสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร มีน้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดสูงกว่าสูตรควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) แต่มีปริมาณของเหลวที่บีบอัดได้ไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดของอิมัลชันไคยอลทุกสูตรจะต่ำกว่าของเหลวที่บีบอัดได้

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไคยอลที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคยอล	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	น้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของเหลวที่บีบอัดได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
มันไก่	4.84 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	7.94 $\pm$ 0.74 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแซ่เยือกแข็ง	3.67 $\pm$ 0.61 <sup>b</sup>	6.32 $\pm$ 1.10 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	5.90 $\pm$ 0.45 <sup>c</sup>	8.93 $\pm$ 0.68 <sup>a</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	6.04 $\pm$ 0.99 <sup>c</sup>	8.97 $\pm$ 1.47 <sup>a</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

น้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดสำหรับอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวซึ่งสูงกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ เป็นผลจากการที่อิมัลชันไคยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวนี้มีน้ำเป็นส่วนผสมสูงกว่าสูตรควบคุม ซึ่งเมื่อคำนวณเทียบกับปริมาณความชื้นในอิมัลชันไคยอแต่ละสูตร จะเห็นว่า ปริมาณของเหลวที่บีบอัดได้ไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม ทั้งนี้ผลการวิจัยในส่วนนี้มีความสอดคล้องกับการประเมินความคงตัวของอิมัลชันและการสูญเสียน้ำหนักหลังทำให้สุก

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากของเหลวที่บีบอัดได้จะเห็นว่า อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร มีความสามารถในการอุ้มน้ำไม่ต่างจากอิมัลชันไคยอสูตรควบคุม แม้อิมัลชันไคยอทั้ง 2 สูตร จะมีน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมมากกว่าสูตรควบคุมมากถึงประมาณ 2.3 เท่า ซึ่งอาจอธิบายได้จากผลของการทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำส่งผลให้ปริมาณโปรตีนโมโนโอไฟบริลลาร์ที่พร้อมจะสร้างเป็นโครงสร้างเจลเพิ่มขึ้นจึงมีส่วนช่วยรักษาความสามารถในการอุ้มน้ำเอาไว้ในระดับเดียวกับอิมัลชันไคยอสูตรควบคุม สำหรับของเหลวที่บีบอัดได้ของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแห้งเยือกแข็งซึ่งมีปริมาณต่ำที่สุดอาจอธิบายได้ด้วยผลของขนาดที่เล็กกว่าและการกระจายตัวที่มากกว่าของหยดน้ำมันรำข้าวเทียบกับเม็ดไขมันไก่ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างเจลมีความแข็งแรงสูงขึ้น

#### 4.2.3.2 อิมัลชันไคยอหลังฆ่าเชื้อ

ความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไคยอหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์สำหรับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งพบว่า พารามิเตอร์ทั้ง 2 นี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับอิมัลชันไคยอหลังทำให้สุก โดยน้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดและของเหลวที่บีบอัดได้ของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแห้งเยือกแข็งต่ำกว่าสูตรอื่น ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวมีน้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดสูงกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p \leq 0.05$ ) แต่มีปริมาณของเหลวที่บีบอัดได้ไม่ต่างกัน ( $p > 0.05$ )

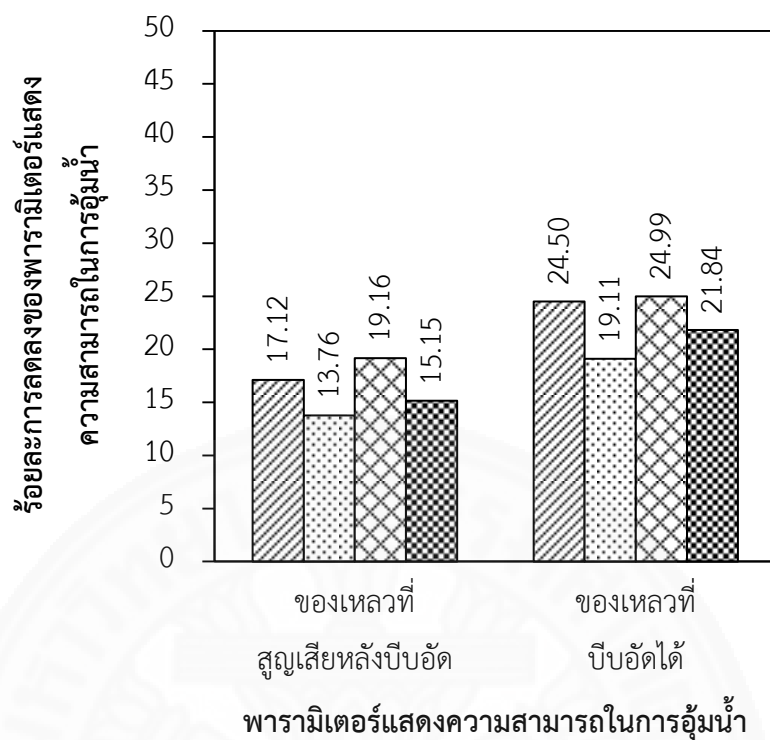
น้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวซึ่งสูงกว่าสูตรควบคุมขณะที่ของเหลวที่บีบอัดได้กลับไม่ต่างกัน อธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกับอิมัลชันไคยอหลังทำให้สุกโดยเป็นผลจากปริมาณน้ำในส่วนผสมที่สูงกว่า ทั้งนี้ผลการวิจัยส่วนนี้ให้ผลใกล้เคียงกับการประเมินการสูญเสียน้ำหนักหลังฆ่าเชื้อในหัวข้อ 4.2.2.2 โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตาข่ายของโปรตีนจากผลของความร้อนที่ใช้ฆ่าเชื้อส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง

ตารางที่ 4.12 ความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไคยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคยอ	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	น้ำหนักที่สูญเสีย หลังบีบอัด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ของเหลวที่บีบอัดได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
มันไก่	5.67 $\pm$ 0.71 <sup>a</sup>	9.89 $\pm$ 1.45 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	4.18 $\pm$ 0.67 <sup>b</sup>	7.52 $\pm$ 1.20 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	7.04 $\pm$ 0.69 <sup>c</sup>	11.17 $\pm$ 1.12 <sup>a</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	6.95 $\pm$ 0.36 <sup>c</sup>	10.93 $\pm$ 0.55 <sup>a</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไคยอหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์กับอิมัลชันไคยอหลังทำให้สุก ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่สูญเสียหลังบีบอัดและของเหลวที่บีบอัดได้ต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI ซึ่งอาจชี้ให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แสดงความสามารถในการอุ้มน้ำที่ต่ำกว่าหมายถึงอิมัลชันไคยอสูตรนั้นมีโครงสร้างเจลที่มีความคงตัวต่อความร้อน (thermal stability) สูงกว่าส่งผลให้รักษาการกักเก็บน้ำเอาไว้ในโครงสร้างได้มากกว่าหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์



**รูปที่ 4.8** ความแตกต่างของความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

- กำหนดให้
- ▨ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้มันไก่
  - ▤ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง
  - ▥ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI
  - ▧ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

#### 4.2.4 การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้าง

##### 4.2.4.1 อิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุก

ความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันไก่ยอที่ได้จากการวัดค่าพารามิเตอร์ 3 ด้าน ประกอบด้วย แรงกตทะเล (PF) ความทนทานต่อการกตทะเล (PS) และความแข็งแรงของเจล (GS) สำหรับอิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุกสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าว 3 รูปแบบ ที่แตกต่างกันทดแทนมันไก่ แสดงตารางที่ 4.14 โดยเมื่อพารามิเตอร์ 3 ด้าน มีค่าสูงขึ้นจะชี้ให้เห็นว่าอิมัลชันมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น ซึ่งพบว่า อิมัลชันไก่ยอทั้ง 3 สูตร ที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ จะมีค่าแรงกตทะเลและความทนทานต่อการกตทะเลไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) อีกทั้งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p \leq 0.05$ ) โดยอิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ

MTG มีค่าสูงกว่าสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI อยู่เล็กน้อย สำหรับความแข็งแรงของเจลจะพบว่า อิมัลชันไคโยทั้ง 3 สูตร ที่ใช้น้ำมันรำข้าวมีแนวโน้มสูงกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ แต่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

ผลการวิจัยส่วนนี้ยังคงชี้ให้เห็นผลของความแตกต่างเฟสไขมันในอิมัลชันไคโยที่มีผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการประเมินความคงตัว การสูญเสียน้ำหนัก และความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไคโยในหัวข้อก่อนหน้านี้ และสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกัน



ตารางที่ 4.13 ความแข็งแรงของโครงสร้างของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	แรงกตทะเลล (นิวตัน)	ความทนต่อการกตทะเลล (นิวตันต่อตารางเซนติเมตร)	ความแข็งแรงของเจล (จุด) <sup>ns</sup>
มันไก่	6.88 $\pm$ 0.56 <sup>a</sup>	24.34 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>	8.20 $\pm$ 0.48
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	8.38 $\pm$ 0.49 <sup>b</sup>	29.66 $\pm$ 1.75 <sup>b</sup>	9.42 $\pm$ 0.67
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	8.26 $\pm$ 0.38 <sup>b</sup>	29.24 $\pm$ 1.33 <sup>b</sup>	9.31 $\pm$ 1.63
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	9.46 $\pm$ 0.27 <sup>b</sup>	33.46 $\pm$ 0.96 <sup>b</sup>	9.51 $\pm$ 0.52

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

#### 4.2.4.2 อิมัลชันไถยอหลังฆ่าเชื้อ

ความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันของอิมัลชันไถยอหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ สำหรับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบทดแทนมันไก่ แสดงตารางที่ 4.14 ซึ่งพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้แต่ละด้านเปรียบเทียบระหว่างอิมัลชันไถยอแต่ละสูตรมีทิศทางใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากอิมัลชันไถยอหลังทำให้สุก

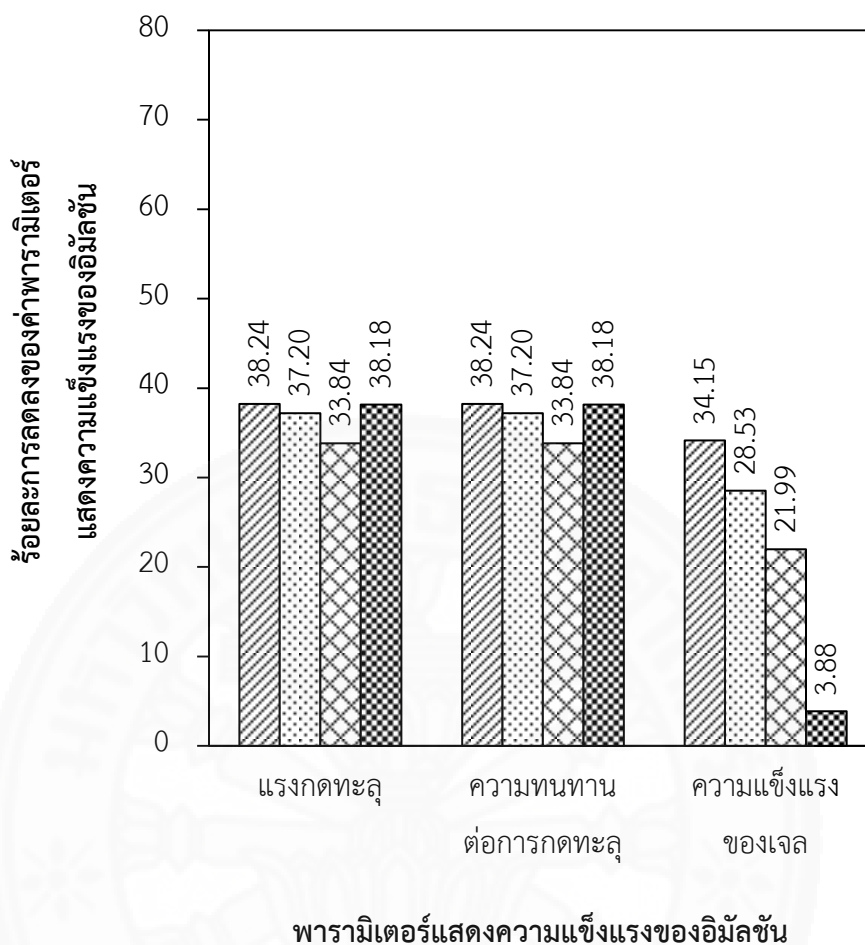
เมื่อพิจารณาอิมัลชันไถยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร จะเห็นว่า โครงสร้างอิมัลชันหลังฆ่าเชื้อยังคงมีความแข็งแรงสูงกว่าสูตรควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) เหมือนกับที่วัดได้หลังจากทำให้สุก ขณะที่อิมัลชันไถยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีความแข็งแรงของโครงสร้างหลังฆ่าเชื้อไม่แตกต่างจากสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI ( $p > 0.05$ ) สำหรับอิมัลชันไถยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG พบว่า มีความแข็งแรงของโครงสร้างมากที่สุด โดยค่าความแข็งแรงของเจลจะสูงกว่าอิมัลชันไถยอสูตรอื่นทุกสูตร ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับค่าแรงกตหะลุและความทนทานต่อการกตหะลุมีแนวโน้มสูงกว่าสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

การลดลงของความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันไถยอเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์เทียบกับหลังทำให้สุก แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจะพบว่า การลดลงของแรงกตหะลุและความทนทานต่อการกตหะลุไม่ต่างกันมากนักในแต่ละสูตรของอิมัลชันไถยอ แต่การลดลงในภาพรวมสูงกว่าเมื่อเทียบการลดลงของค่าความแข็งแรงของเจล ทั้งนี้ความแข็งแรงของเจลของอิมัลชันไถยอแต่ละสูตรลดลงในระดับต่างกัน โดยอิมัลชันไถยอสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 สูตร มีการลดลงของความแข็งแรงของเจลต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ซึ่งสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG มีการลดลงต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่า อิมัลชันไถยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG ทนต่อผลของการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ได้มากกว่าสูตรอื่นค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้ผลการวิจัยส่วนนี้ยังคงชี้ให้เห็นผลของชนิดของไขมันและระบบที่ทำให้ไขมันคงตัวที่ต่างกันให้อิมัลชันไถยอต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันโดยเฉพาะความแข็งแรงของเจล และยังชี้ให้เห็นว่า ความคงตัวของอิมัลชันที่สูงกว่าตั้งแต่ก่อนทำให้สุกยังคงส่งผลต่อเนื่องถึงความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันภายหลังจากการฆ่าเชื้อ ดังนั้น จึงอาจอธิบายผลการวิจัยส่วนนี้ได้ด้วยเหตุผลเดียวกันกับการประเมินความคงตัวของอิมัลชันในหัวข้อ 4.2.1.2

ตารางที่ 4.14 ความแข็งแรงของโครงสร้างของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	แรงกตทะเล (นิวตัน)	ความทนต่อการกตทะเล (นิวตันต่อตารางเซนติเมตร)	ความแข็งแรงของเจล (จูล)
มันไก่	4.25 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	15.03 $\pm$ 0.54 <sup>a</sup>	5.40 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	5.26 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	18.63 $\pm$ 0.47 <sup>b</sup>	6.74 $\pm$ 0.49 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	5.47 $\pm$ 0.41 <sup>bc</sup>	19.35 $\pm$ 1.46 <sup>bc</sup>	6.54 $\pm$ 0.46 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	5.85 $\pm$ 0.35 <sup>c</sup>	20.69 $\pm$ 1.23 <sup>c</sup>	9.14 $\pm$ 0.31 <sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )



รูปที่ 4.9 ความแตกต่างของความแข็งแรงของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้ไขมันไก่

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

#### 4.2.5 การประเมินค่าสี

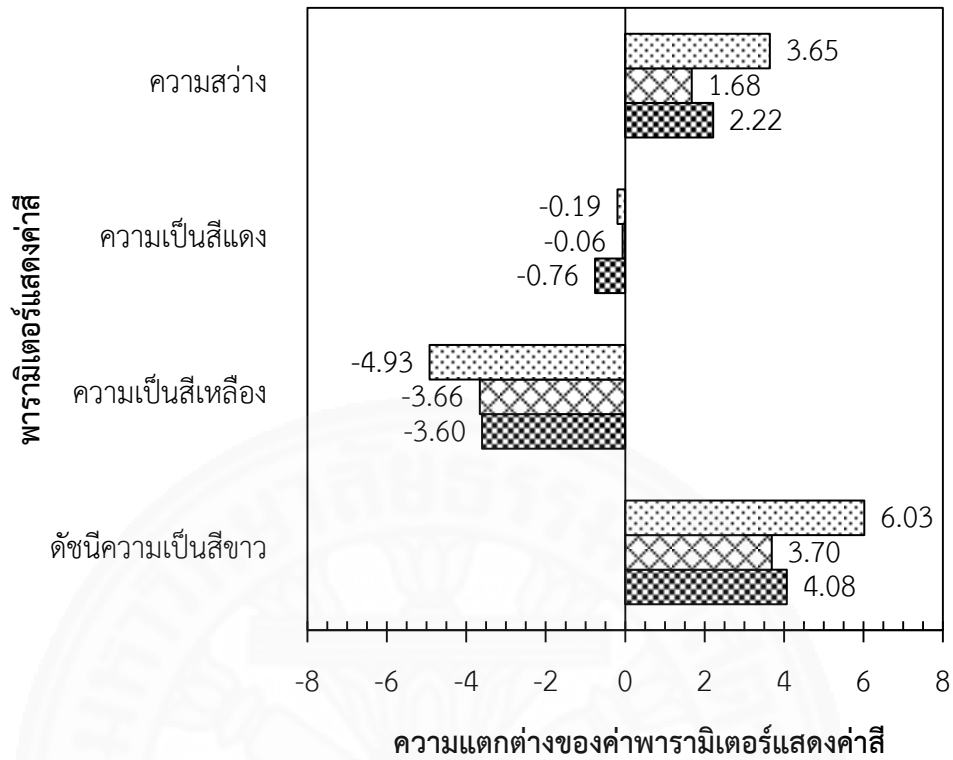
##### 4.2.5.1 อิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุก

การประเมินค่าสีของอิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุกสำหรับอิมัลชันไก่ยอสูตรควบคุมและสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวที่ต่างกัน 3 รูปแบบ ด้วยการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความสว่าง ( $L^*$ ) ความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) ความเป็นสีเหลือง ( $b^*$ ) และดัชนีความเป็นสีขาว ( $WI$ ) แล้วเปรียบเทียบ

ความแตกต่างระหว่างอิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร กับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ แสดงดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.15 สำหรับสีภายนอก (ที่ผิวหน้าของอิมัลชันไคโย) ส่วนสีภายใน แสดงดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.16

เมื่อพิจารณาสีภายนอกของอิมัลชันไคโยที่ใช้ไขมันรำข้าวทั้ง 3 สูตร พบว่า ความสว่างเพิ่มขึ้น ดัชนีความเป็นสีขาวเพิ่มขึ้น และความเป็นสีเหลืองลดลง เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ (รูปที่ 4.10) โดยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีระดับการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ในทุกพารามิเตอร์ ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นความเป็นสีเหลืองที่ไม่ต่างจากสูตรอื่น ( $p > 0.05$ ) ส่วนสูตรที่ใช้อิมัลชันไขมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร มีการเปลี่ยนแปลงไม่ต่างกัน ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 4.15) ขณะที่ความเป็นสีแดงของอิมัลชันไคโยทุกสูตรเกือบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม สำหรับสีภายในนั้น มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างระหว่างอิมัลชันไคโยแต่ละสูตรเหมือนกับสีภายนอก เพียงแต่ระดับของการเปลี่ยนแปลงสีต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสีภายนอก

การเปรียบเทียบความแตกต่างของสีภายในและภายนอกสำหรับอิมัลชันไคโยแต่ละสูตรหลังทำให้สุก แสดงดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.17 ซึ่งพบว่า ภายในของอิมัลชันไคโยเมื่อเทียบกับภายนอก มีความสว่างและดัชนีความเป็นสีขาวสูงกว่า แต่ความเป็นสีเหลืองต่ำกว่า ส่วนความเป็นสีแดงแทบไม่พบความแตกต่าง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอิมัลชันไคโยแต่ละสูตรไม่พบความแตกต่างระหว่างความสว่าง ความเป็นสีเหลือง รวมไปถึงดัชนีความเป็นสีขาว ( $p > 0.05$ ) ยกเว้นความแตกต่างโดยรวมของสี ซึ่งพบว่า อิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้อิมัลชันไขมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร มีค่าความแตกต่างที่ต่ำกว่าสูตรควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) ในขณะที่อิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีค่าความแตกต่างโดยรวมของสีต่ำกว่าสูตรควบคุมแต่ไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.10 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก เทียบกับอิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่หลังทำให้สุก

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไคโยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง มีค่าต่ำกว่าเทียบกับอิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่

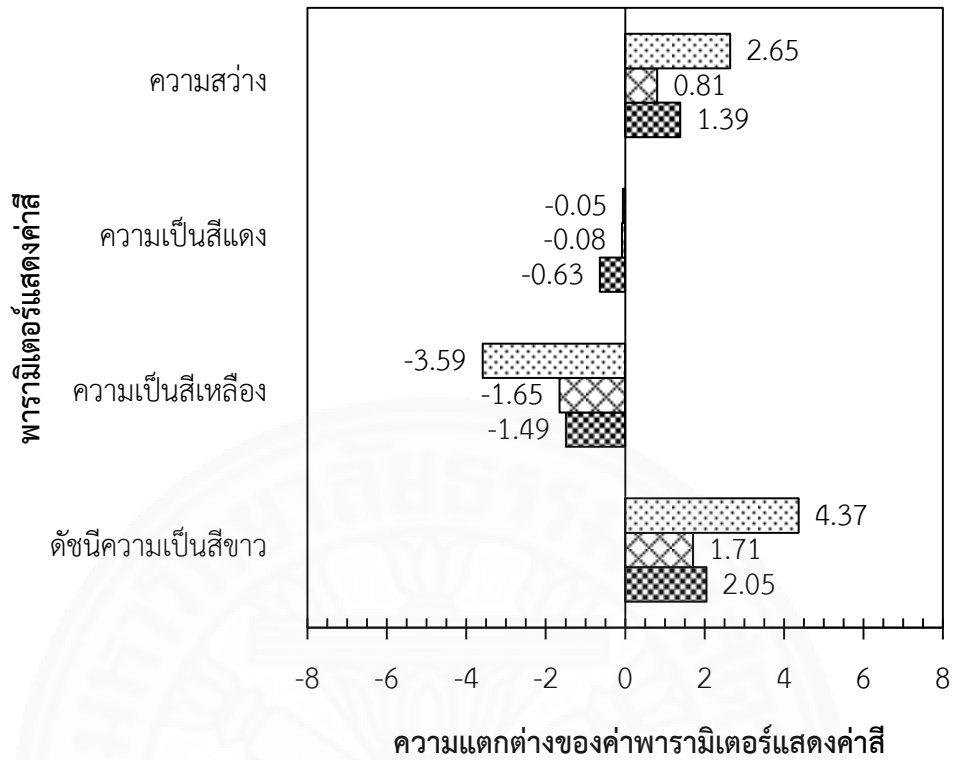
ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง มีค่าสูงกว่าเทียบกับอิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่

ตารางที่ 4.15 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุกเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่หลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ )	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ )	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ ) <sup>ns</sup>	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta WI$ )	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ )
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	3.65 $\pm$ 0.26 <sup>b</sup>	-0.19 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	-4.93 $\pm$ 0.13	6.03 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	6.14 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	1.68 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	-0.06 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	-3.66 $\pm$ 1.10	3.70 $\pm$ 0.72 <sup>a</sup>	4.05 $\pm$ 0.99 <sup>a</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	2.22 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	-0.76 $\pm$ 0.21 <sup>b</sup>	-3.60 $\pm$ 0.74	4.08 $\pm$ 0.72 <sup>a</sup>	4.32 $\pm$ 0.74 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )



รูปที่ 4.11 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุกเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่หลังทำให้สุก

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

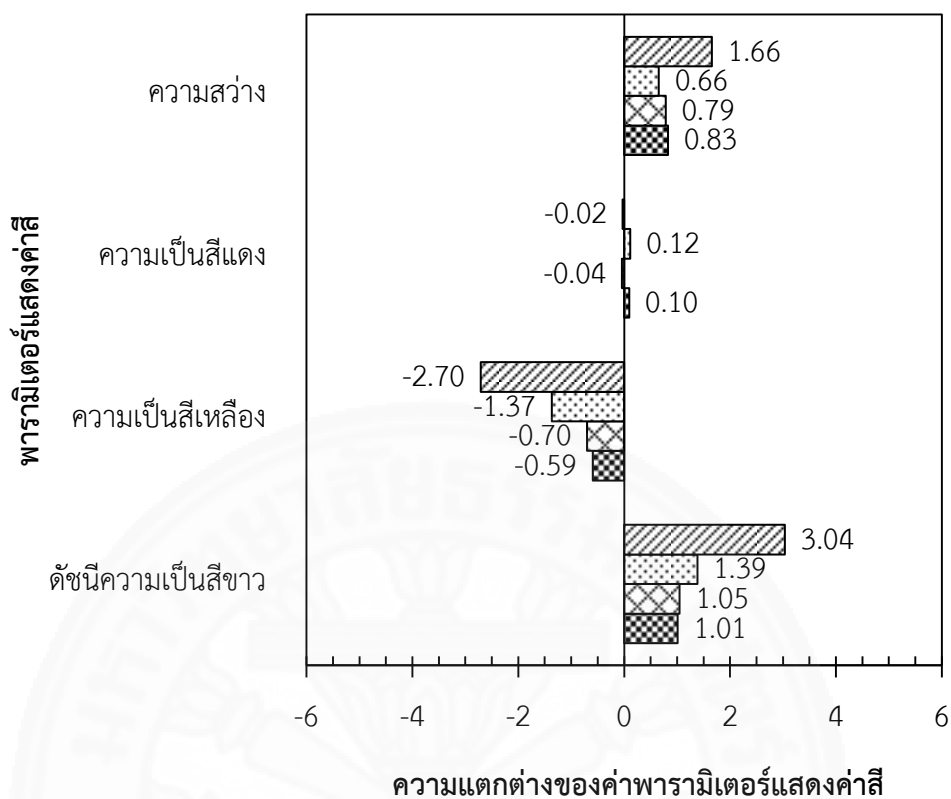
ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง มีค่าต่ำกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่

ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง มีค่าสูงกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่

ตารางที่ 4.16 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุกเทียบกับอิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่หลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ )	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ )	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ )	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta W$ )	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ )
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	2.65 $\pm$ 0.53 <sup>b</sup>	-0.05 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	-3.59 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	4.37 $\pm$ 0.43 <sup>b</sup>	4.47 $\pm$ 0.34 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	0.81 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	-0.08 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	-1.65 $\pm$ 0.84 <sup>a</sup>	1.71 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	1.93 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	1.39 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>	-0.63 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>	-1.49 $\pm$ 0.62 <sup>a</sup>	2.05 $\pm$ 0.53 <sup>a</sup>	2.17 $\pm$ 0.55 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )



รูปที่ 4.12 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน  
หลังทำให้สุก

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้มันไก่

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง ค่าสีภายในต่ำกว่าเทียบกับภายนอก

ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง ค่าสีภายในสูงกว่าเทียบกับภายนอก

ตารางที่ 4.17 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก

ชนิดเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ ) <sup>ns</sup>	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta WI$ ) <sup>ns</sup>	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ )
มันไก่	1.66 ± 0.96	-0.02 ± 0.65	-2.70 ± 1.99	3.04 ± 1.97	3.32 ± 2.00 <sup>b</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	0.66 ± 0.53	0.12 ± 0.00	-1.37 ± 0.04	1.39 ± 0.43	1.56 ± 0.26 <sup>ab</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	0.79 ± 0.34	-0.04 ± 0.13	-0.70 ± 0.84	1.05 ± 0.34	1.28 ± 0.37 <sup>a</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	0.83 ± 0.29	0.10 ± 0.22	-0.59 ± 0.62	1.01 ± 0.53	1.14 ± 0.46 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

ผลการวิจัยส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า ชนิดของเฟสไขมันมีผลต่อค่าสีของอิมัลชัน ใยก้อยหลังทำให้สุกแล้ว โดยเฉพาะความแตกต่างที่สังเกตได้ชัดเจนระหว่างมันไก่ที่ใช้ในสูตรควบคุม และน้ำมันรำข้าวที่ใช้ในอีก 3 สูตร ที่เหลือ ปัจจัยหลักที่ทำให้สีแตกต่างอาจเป็นเพราะหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กส่งผลให้มีการสะท้อนแสงที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับเม็ดไขมันสัตว์ที่มีขนาดใหญ่กว่ามีผลให้ค่าความสว่างของอิมัลชันใยก้อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวหลังทำให้สุกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ดังที่รายงานไว้โดย Kang และคณะ (2017) แต่เนื่องจากปริมาณน้ำมันรำข้าวที่ต่ำกว่าประมาณครึ่งหนึ่งในอิมัลชันใยก้อยสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร เมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าว แชนเยือกแข็ง จึงส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของความสว่างมีระดับที่ต่ำกว่า หรือหมายความว่าปริมาณน้ำมันรำข้าวที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสว่างของอิมัลชันใยก้อยที่ทำให้สุกแล้วสูงขึ้นด้วย

การลดลงของค่าความเป็นสีเหลืองในอิมัลชันใยก้อยที่ทำให้สุกแล้วในสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ อาจเป็นผลมาจากสีเหลืองของน้ำมันรำข้าวที่อ่อนกว่าสีเหลืองของมันไก่ โดยให้ผลในทิศทางตรงข้ามกับงานวิจัยของ Jimenez-Colmenero และคณะ (2010b) ที่พบว่า ใสักรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์หมูมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อทดแทนมันหมูแข็งด้วยอิมัลชันน้ำมันมะกอก เนื่องจากน้ำมันมะกอกมีสีเขียวนเหลืองเมื่อเทียบกับมันหมูแข็งที่มีสีค่อนข้างขาว (มีสีอ่อนกว่าน้ำมัน) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Cheetangdee (2017) ที่ใช้อิมัลชันน้ำมันถั่วเหลืองทดแทนมันหมูในใสักรอกหมูซึ่งพบว่า ค่าความเป็นสีเหลืองของใสักรอกหมูที่ทำให้สุกแล้วเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับใสักรอกที่ใช้มันหมูแข็ง เนื่องจากสีของน้ำมันถั่วเหลืองที่มีค่าความเป็นสีเหลืองที่สูงกว่ามันหมู ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ชนิดของเฟสไขมันที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ค่าความเป็นสีเหลืองของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกแล้วมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการลดลงของค่าความเป็นสีเหลืองของอิมัลชันใยก้อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแชนเยือกแข็งที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณของน้ำมันรำข้าวในอิมัลชันใยก้อยส่งผลต่อการลดลงของค่าความเป็นสีเหลืองมากกว่าเมื่อเทียบกับการเพิ่มปริมาณน้ำในสูตรเพื่อทดแทนไขมันที่ลดลง (ในอิมัลชันใยก้อยสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าว) ซึ่งในงานวิจัยของ Hsu และ Yu (2002) ได้อธิบายไว้ว่ามีผลทำให้ค่าความเป็นสีเหลืองรวมทั้งความเป็นสีแดงต่ำลง

ดังนั้น จากการเพิ่มขึ้นของความสว่างและการลดลงของค่าความเป็นสีเหลืองของอิมัลชันใยก้อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่จึงส่งผลให้ค่าดัชนีความเป็นสีขาวของอิมัลชันใยก้อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของอิมัลชันใยก้อยสอดคล้องกับผลกระทบที่มีต่อค่าสีของอิมัลชันเนื้อสัตว์ของผลิตภัณฑ์หลายชนิดเมื่อใช้น้ำมันหรืออิมัลชันน้ำมันเป็นเฟสไขมัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้นและบางกรณีมีผลให้ค่าความเป็นสีแดงลดลง เช่น การใช้อิมัลชัน

น้ำมันข้าวโพดหรือใช้น้ำมันปลาในไส้กรอกโบโลน่า (Bishop และคณะ, 1993; Caceres และคณะ, 2008) การใช้น้ำมันมะกอกในไส้กรอกแฟรงค์เฟิร์ตเตอร์หมู (Lopez-Lopez และคณะ, 2009) การใช้ไขมันชั้นน้ำมันมะกอกในไส้กรอกแฟรงค์เฟิร์ตเตอร์หมูและในอิมัลชันเนื้อวัว (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b; Youssef และ Barbut, 2011) การใช้ไขมันชั้นน้ำมันงาในเบทเทอร์เนื้อหมู (Kang และคณะ, 2017) การใช้ไขมันชั้นน้ำมันถั่วเหลืองในไส้กรอกหมู (Cheetangdee, 2017)

นอกจากนี้ผลการวิจัยส่วนนี้ยังชี้ให้เห็นว่า ความร้อนระหว่างทำให้สุกซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในและภายนอกของอิมัลชันไก่อแตกต่างกันนั้น (ภายในจะได้รับความร้อนน้อยกว่าภายนอก) ส่งผลให้ค่าสีภายนอกเข้มกว่าสีภายใน โดยจะสังเกตได้ว่าเฟสไขมันที่แตกต่างกันส่งผลให้ระดับความแตกต่างระหว่างสีภายในและภายนอกไม่เท่ากัน ซึ่งค่าสีอิมัลชันไก่อสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวนั้นมีแนวโน้มที่จะได้รับผลกระทบจากความร้อนต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่เล็กน้อย หรือหมายถึงว่าการใช้น้ำมันรำข้าวจะช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของสีให้กับอิมัลชันที่ทำให้สุกแล้วได้ระดับหนึ่ง โดยเฉพาะสูตรที่ใช้ไขมันชั้นน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร ที่มีระดับความแตกต่างของสีโดยรวมที่ต่ำกว่าสูตรอื่น

ทั้งนี้ Wattanachan และคณะ (2005) และ Ayadi และคณะ (2009) รายงานว่า กระบวนการที่ใช้ความร้อนจะส่งผลกระทบต่อสีของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ปีก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อจากมันไก่เป็นน้ำมันรำข้าวสร้างผลกระทบเชิงบวกกับค่าสีของอิมัลชันไก่อหลังทำให้สุกมากกว่าเมื่อเทียบกับผลกระทบเชิงลบจากความร้อนในการทำให้สุก ซึ่ง Resurreccion (2004) อธิบายว่า ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่มีค่าความสว่างสูงขึ้นหรือมีสีสว่างขึ้นเป็นสิ่งที่ต้องการเพื่อทำให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์จะได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคในระดับสูง

#### 4.2.5.2 อิมัลชันไก่อหลังฆ่าเชื้อ

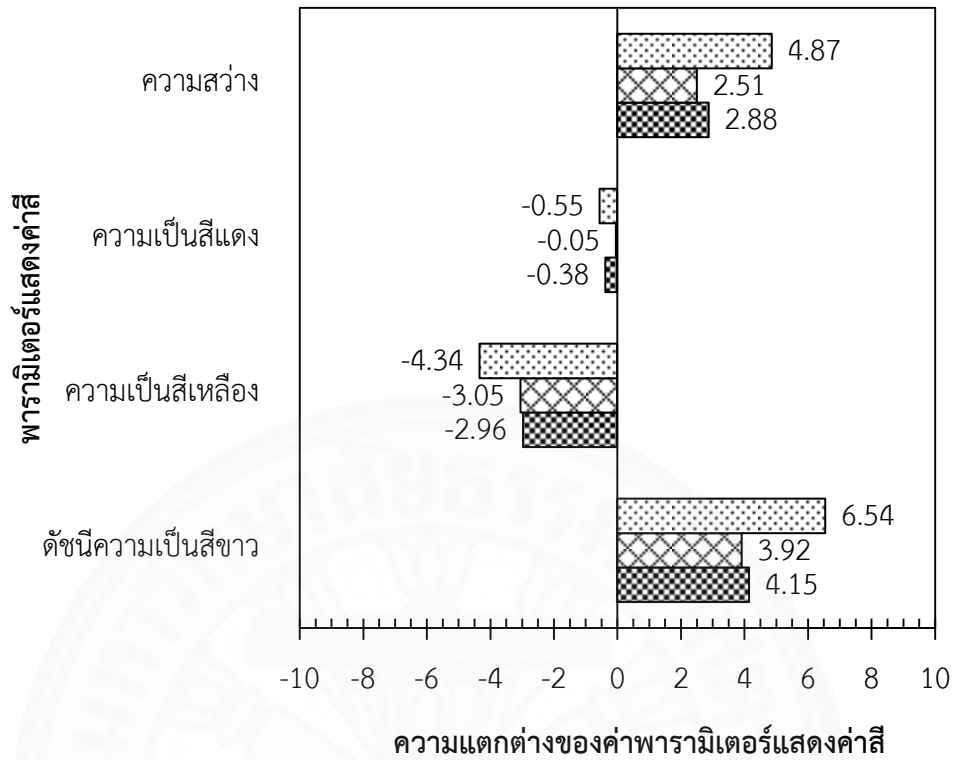
การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสีของอิมัลชันไก่อหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ระหว่างสูตรควบคุมกับสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.18 สำหรับสีภายนอก ส่วนสีภายในแสดงดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.19

สำหรับสีภายนอกพบว่า ความแตกต่างของค่าสีมีทิศทางเดียวกับที่พบในอิมัลชันไก่อหลังทำให้สุก โดยอิมัลชันไก่อที่ใช้ไขมันรำข้าวทั้ง 3 สูตร มีค่าความสว่างและดัชนีความเป็นสีขาวสูงกว่า (ค่าเป็นบวก) แต่ความเป็นสีเหลืองต่ำกว่า (ค่าเป็นลบ) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ (รูปที่ 4.13) ซึ่งพบว่า สูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแซ่เยือกแข็งนั้นแตกต่างมากที่สุดในทุกพารามิเตอร์ ( $p \leq 0.05$ ) ส่วนสูตรที่ใช้ไขมันชั้นน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร มีระดับความแตกต่างไม่ต่างกัน ( $p > 0.05$ ) (ตารางที่ 4.18) ขณะที่ความเป็นสีแดงของทุกสูตรเกือบไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม


สำหรับสีภายในนั้นมีทิศทางความแตกต่างของสีและความแตกต่างระหว่างแต่ละสูตรเหมือนกับสีภายนอก (รูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.19) และทั้งนี้เมื่อเทียบกับอิมัลชันไคโยหลังทำให้สรุปได้ว่า ค่าสีภายในมีแนวโน้มความแตกต่างไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด


เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีภายในและภายนอกสำหรับอิมัลชันไคโยแต่ละสูตรหลังฆ่าเชื้อ ดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.20 พบว่า ภายในของอิมัลชันไคโยเมื่อเทียบกับภายนอกจะมีค่าความสว่างและดัชนีความเป็นสีขาวสูงกว่าแต่มีค่าความเป็นสีเหลืองต่ำกว่า ส่วนค่าความเป็นสีแดงแตกต่างกันน้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอิมัลชันไคโยแต่ละสูตรจะไม่พบความแตกต่างระหว่างพารามิเตอร์เหล่านี้ ( $p > 0.05$ )






รูปที่ 4.13 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่หลังฆ่าเชื้อ

กำหนดให้  หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

 หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

 หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง มีค่าต่ำกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่

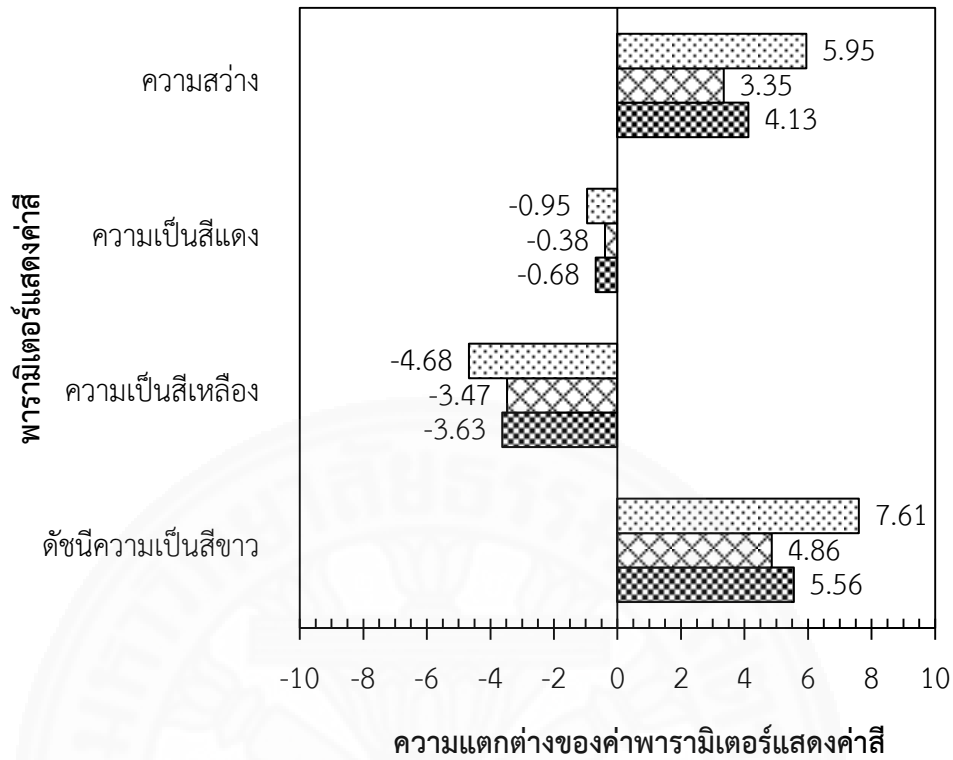
ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง มีค่าสูงกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่

ตารางที่ 4.18 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับอิมัลชันไคโยที่ใช้ไขมันไก่หลังฆ่าเชื้อ

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ )	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ )	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta WI$ )	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ )
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	4.87 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	-0.55 $\pm$ 0.04	-4.34 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	6.54 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	6.54 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	2.51 $\pm$ 0.63 <sup>a</sup>	-0.05 $\pm$ 0.48	-3.05 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	3.92 $\pm$ 0.43 <sup>a</sup>	4.02 $\pm$ 0.40 <sup>a</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	2.88 $\pm$ 0.45 <sup>a</sup>	-0.38 $\pm$ 0.00	-2.96 $\pm$ 0.44 <sup>a</sup>	4.15 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	4.17 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )



**รูปที่ 4.14** ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังจากเข้าเชื่อมเทียบกับอิมัลชันไก่ยอที่ใช้มันไก่หลังจากเข้าเชื่อม

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง มีค่าต่ำกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่ยอที่ใช้มันไก่

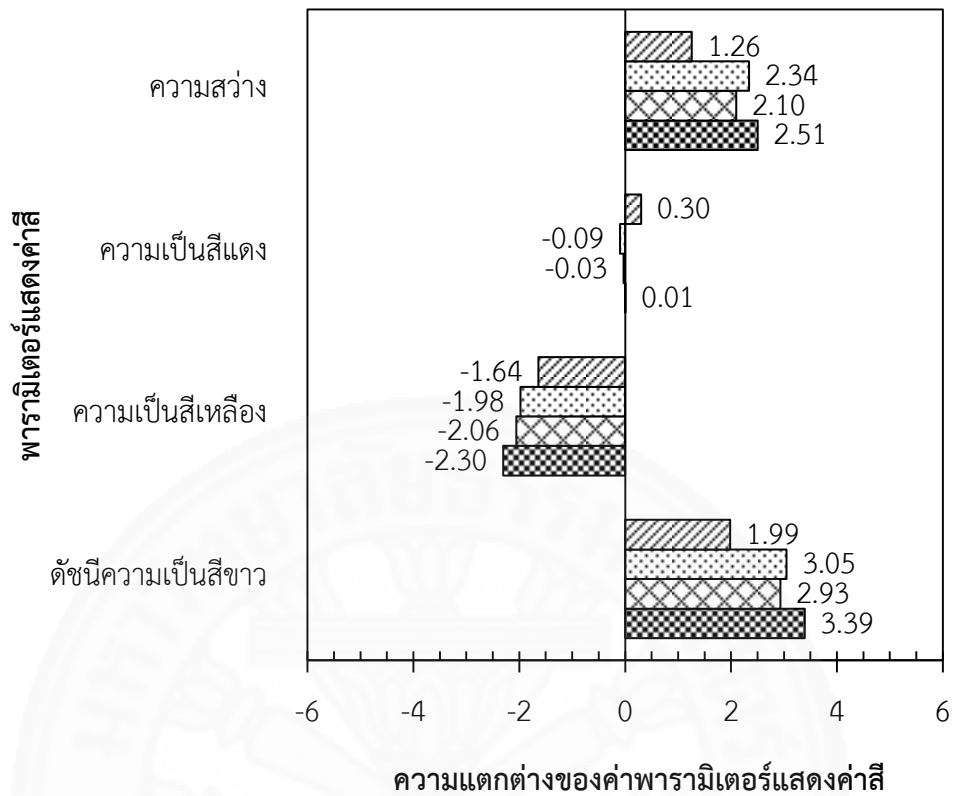
ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง มีค่าสูงกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่ยอที่ใช้มันไก่

ตารางที่ 4.19 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับอิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่หลังฆ่าเชื้อ

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ )	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ ) <sup>ns</sup>	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta WI$ )	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ )
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	5.95 $\pm$ 0.85 <sup>b</sup>	-0.95 $\pm$ 0.07	-4.68 $\pm$ 0.39	7.61 $\pm$ 0.88 <sup>b</sup>	7.63 $\pm$ 0.91 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	3.35 $\pm$ 0.54 <sup>a</sup>	-0.38 $\pm$ 0.51	-3.47 $\pm$ 0.92	4.86 $\pm$ 0.93 <sup>a</sup>	4.88 $\pm$ 0.95 <sup>a</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	4.13 $\pm$ 0.53 <sup>a</sup>	-0.68 $\pm$ 0.39	-3.63 $\pm$ 0.18	5.56 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	5.55 $\pm$ 0.33 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )



รูปที่ 4.15 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไคยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกัน หลังฆ่าเชื้อ

- กำหนดให้
- ▨ หมายถึง อิมัลชันไคยอที่ใช้มันไก่
  - ▤ หมายถึง อิมัลชันไคยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง
  - ▩ หมายถึง อิมัลชันไคยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI
  - ▣ หมายถึง อิมัลชันไคยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG
- ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง ค่าสีภายในต่ำกว่าเทียบกับภายนอก  
 ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง ค่าสีภายในสูงกว่าเทียบกับภายนอก

ตารางที่ 4.20 ความแตกต่างของสีภายในเทียบกับภายนอกของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ ) <sup>ns</sup>	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta WI$ ) <sup>ns</sup>	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ ) <sup>ns</sup>
มันไก่	1.26 $\pm$ 1.64	0.30 $\pm$ 0.78	-1.64 $\pm$ 0.67	1.99 $\pm$ 0.82	2.67 $\pm$ 0.24
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	2.34 $\pm$ 0.85	-0.09 $\pm$ 0.07	-1.98 $\pm$ 0.39	3.05 $\pm$ 0.88	3.07 $\pm$ 0.90
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	2.10 $\pm$ 0.54	-0.03 $\pm$ 0.51	-2.06 $\pm$ 0.92	2.93 $\pm$ 0.93	3.01 $\pm$ 0.92
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	2.51 $\pm$ 0.53	0.01 $\pm$ 0.39	-2.30 $\pm$ 0.18	3.39 $\pm$ 0.28	3.43 $\pm$ 0.27

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

ผลการวิจัยส่วนนี้ยังคงชี้ให้เห็นผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงเฟสไขมันในอิมัลชันไคโยจากมันโกไปเป็นน้ำมันรำข้าวได้อยู่เช่นเดียวกันกับผลที่เกิดขึ้นกับอิมัลชันไคโยที่ทำให้สุกแล้ว ไม่ว่าจะเป็ผลจากขนาดของหยดน้ำมันรำข้าว ปริมาณของน้ำมันรำข้าวในสูตร ปริมาณของน้ำในสูตร รวมไปถึงสีของน้ำมันรำข้าวเอง จึงอาจกล่าวได้ว่า แม้อิมัลชันไคโยจะผ่านขั้นตอนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้ว ผลเชิงบวก (เช่นที่เกี่ยวข้องกับความสว่างหรือดัชนีความเป็นสีขาว) จากการใช้ไขมันรำข้าวเป็นเฟสไขมันที่มีต่อสีของอิมัลชันไคโยยังคงอยู่ โดยไม่ได้รับผลกระทบจากการใช้ความร้อนในกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า อิมัลชันไคโยที่ฆ่าเชื้อแล้วจะแสดงสีออกมาอย่างไรจึงขึ้นกับชนิดของเฟสไขมันที่เลือกใช้เป็นหลัก และการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์นั้นไม่ได้สร้างผลกระทบที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อพารามิเตอร์แสดงค่าสีของอิมัลชันไคโยหลังฆ่าเชื้อที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันแต่อย่างใด

สำหรับความแตกต่างของค่าสีของอิมัลชันไคโยที่ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้วระหว่างภายในกับภายนอกจะสังเกตได้ว่า ไม่เหมือนกับกรณีของอิมัลชันไคโยที่ทำให้สุกแล้ว โดยอิมัลชันไคโยที่ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้วทุกสูตรแม้ว่าจะยังมีสีภายนอกที่คล้ำกว่าสีภายในเช่นเดิม เนื่องจากบริเวณผิวภายนอกของอิมัลชันไคโยได้รับปริมาณความร้อนระหว่างการฆ่าเชื้อสูงกว่าเนื้อภายใน แต่ระดับความแตกต่างระหว่างสีภายในกับภายนอกในระหว่างอิมัลชันไคโยสูตรต่างๆ นั้นกลับเท่ากัน (ในอิมัลชันไคโยที่ทำให้สุกแล้วจะพบว่า สูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวมีระดับความแตกต่างของค่าสีต่ำกว่าสูตรอื่น) ซึ่งอาจเป็นเพราะขนาดของอิมัลชันไคโยในรีทอร์ทเพาซ์ขณะผ่านขั้นตอนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับอิมัลชันไคโยขณะผ่านขั้นตอนการทำให้สุก (อิมัลชันไคโยเมื่อทำให้สุกแล้วจะผ่านขั้นตอนตัดแบ่งเป็นชิ้นขนาดเล็กก่อนบรรจุในรีทอร์ทเพาซ์ โดยขนาดชิ้นเล็กกว่ามากเมื่อเทียบกับขนาดพิมพ์ที่ใช้บรรจุอิมัลชันไคโยระหว่างทำให้สุก) ดังนั้นอาจแสดงให้เห็นว่า เฟสไขมันที่แตกต่างกันไม่ได้มีส่วนทำให้อิมัลชันไคโยที่ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้วมีความสม่ำเสมอของสีแตกต่างกัน

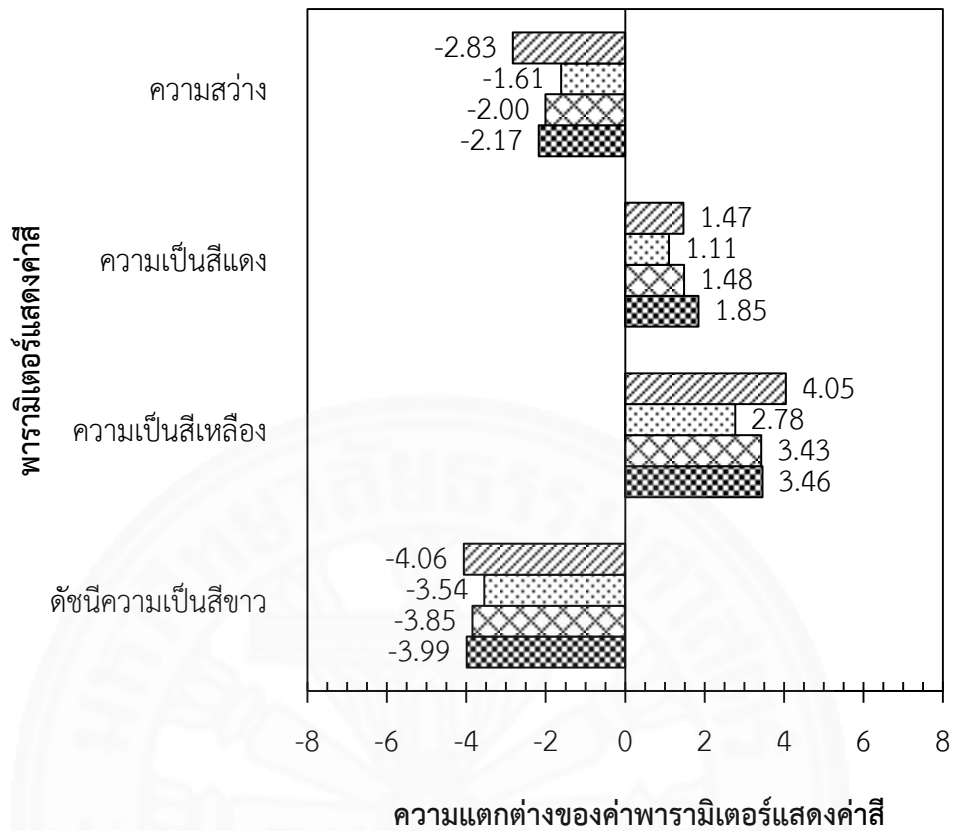
การเปรียบเทียบค่าสีระหว่างอิมัลชันไคโยหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์กับหลังทำให้สุกสำหรับสีภายนอกแสดงดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.21 สำหรับสีภายในแสดงดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.22

เมื่อพิจารณาสีภายนอกพบว่า อิมัลชันไคโยที่ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้วทุกสูตรมีค่าความสว่างและค่าดัชนีความเป็นสีขาวต่ำลง (ค่าเป็นลบ) เมื่อเปรียบเทียบกับอิมัลชันไคโยที่ทำให้สุกแล้ว ขณะที่ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองสูงขึ้น (ค่าเป็นบวก) ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอิมัลชันไคโยแต่ละสูตรพบว่า ความแตกต่างของค่าสีในทุกพารามิเตอร์ระหว่างอิมัลชันไคโยที่ทำให้สุกแล้วกับที่ฆ่าเชื้อแล้วไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ )

สำหรับสีภายในพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีทิศทางเหมือนกับสีภายนอกทุกสูตร ยกเว้นอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแะเยือกแข็งที่แทบไม่พบความแตกต่างของค่าความสว่าง

ส่วนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอิมัลชันไคยอแต่ละสูตรพบว่า อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร มีระดับความแตกต่างของค่าความสว่างดัชนีความเป็นสีขาว รวมไปถึงความแตกต่างโดยรวมของสี ต่ำกว่าหลายเท่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นค่าความเป็นสีเหลืองซึ่งสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแะเยือกแข็งไม่แตกต่างจากสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p > 0.05$ ) แต่สำหรับสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวจะแตกต่างจากสูตรควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) ขณะที่ค่าความเป็นสีแดงทุกสูตรไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ )





รูปที่ 4.16 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไถयोที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไถयोที่ไขมันไก่อ

หมายถึง อิมัลชันไถयोที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไถयोที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไถयोที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

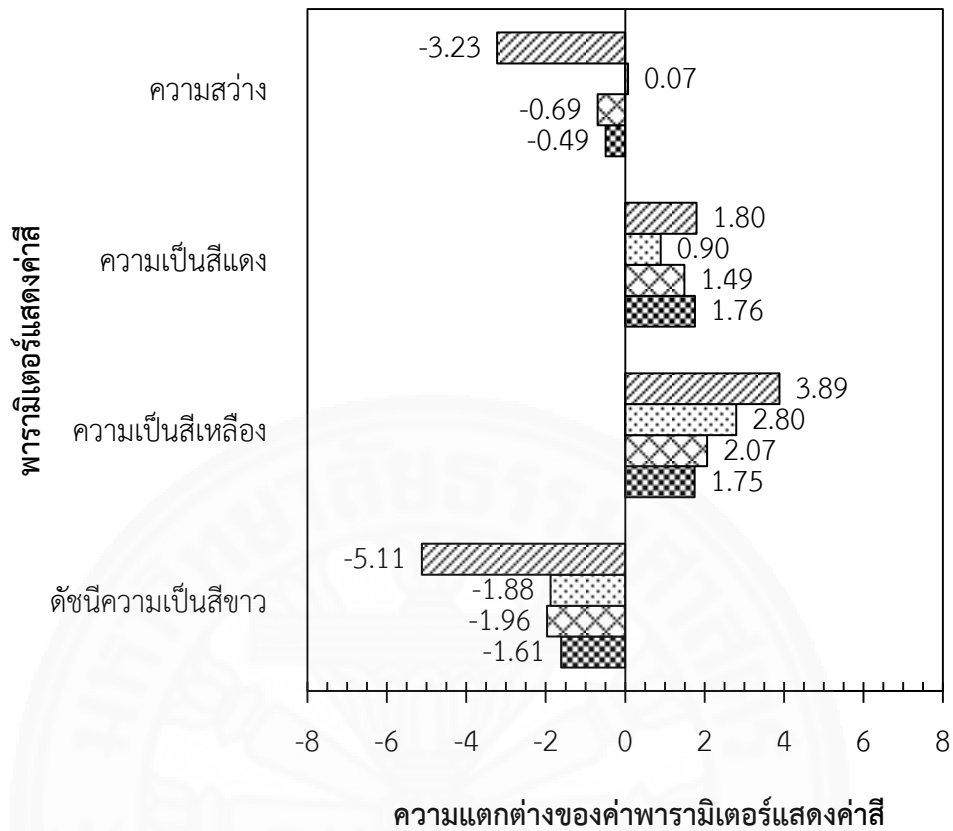
ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง มีค่าต่ำกว่าเทียบกับอิมัลชันไถयोหลังทำให้สุก

ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง มีค่าสูงกว่าเทียบกับอิมัลชันไถयोหลังทำให้สุก

ตารางที่ 4.21 ความแตกต่างของสีภายนอกของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคโย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ ) <sup>ns</sup>	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta WI$ ) <sup>ns</sup>	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ ) <sup>ns</sup>
มันไก่	-2.83 $\pm$ 0.96	1.47 $\pm$ 0.15	4.05 $\pm$ 1.94	-4.06 $\pm$ 0.53	5.21 $\pm$ 1.97
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	-1.61 $\pm$ 0.04	1.11 $\pm$ 0.04	2.78 $\pm$ 0.97	-3.54 $\pm$ 0.07	3.42 $\pm$ 0.79
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	-2.00 $\pm$ 0.63	1.48 $\pm$ 0.48	3.43 $\pm$ 0.47	-3.85 $\pm$ 0.43	4.31 $\pm$ 0.42
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	-2.17 $\pm$ 0.45	1.85 $\pm$ 0.00	3.46 $\pm$ 0.44	-3.99 $\pm$ 0.02	4.50 $\pm$ 0.12

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )



รูปที่ 4.17 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังจากเข้าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

กำหนดให้ หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้มันไก่

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

หมายถึง อิมัลชันไก่ยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ความแตกต่างเป็นลบ หมายถึง มีค่าต่ำกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุก

ความแตกต่างเป็นบวก หมายถึง มีค่าสูงกว่าเทียบกับอิมัลชันไก่ยอหลังทำให้สุก

ตารางที่ 4.22 ความแตกต่างของสีภายในของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				
	ความสว่าง ( $\Delta L^*$ )	ความเป็นสีแดง ( $\Delta a^*$ ) <sup>ns</sup>	ความเป็นสีเหลือง ( $\Delta b^*$ )	ดัชนีความเป็น สีขาว ( $\Delta W$ )	ความแตกต่าง โดยรวม ( $\Delta E^*$ )
มันไก่	$-3.23 \pm 1.64^a$	$1.80 \pm 0.78$	$3.89 \pm 0.67^a$	$-5.11 \pm 0.82^a$	$5.58 \pm 0.73^a$
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	$0.07 \pm 0.85^b$	$0.90 \pm 0.07$	$2.80 \pm 0.39^{ab}$	$-1.88 \pm 0.88^b$	$3.00 \pm 0.36^b$
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	$-0.69 \pm 0.54^b$	$1.49 \pm 0.51$	$2.07 \pm 0.92^b$	$-1.96 \pm 0.93^b$	$2.76 \pm 0.80^b$
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	$-0.49 \pm 0.53^b$	$1.76 \pm 0.39$	$1.75 \pm 0.18^b$	$-1.61 \pm 0.28^b$	$2.57 \pm 0.25^b$

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

ผลการวิจัยส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ ส่งผลต่อค่าสีของอิมัลชันไก่อยโดยทำให้สีที่ผิวภายนอกคล้ำขึ้นจากผลของความร้อน

นอกจากนี้ การที่อิมัลชันไก่อยทุกสูตรทั้งสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวที่แตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีภายนอกเมื่อเปรียบเทียบระหว่างหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์กับหลังทำให้สุกไม่แตกต่างกัน ซึ่งให้เห็นว่า การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสีภายนอก ขณะที่การใช้เฟสไขมันที่แตกต่างกันในอิมัลชันไก่อยแต่ละสูตรกลับไม่ได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีภายนอก เพียงแต่มีผลกระทบอยู่บ้าง โดยสังเกตได้จากอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 สูตรที่มีความเปลี่ยนแปลงของค่าสีต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่เล็กน้อย

สำหรับสีของเนื้อภายในอิมัลชันไก่อยหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ซึ่งพบว่า มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงแตกต่างออกไปจากสีภายนอกซึ่งให้เห็นถึงผลของเฟสไขมันที่แตกต่างกันที่มีต่อสีภายในอย่างชัดเจน โดยจะเห็นได้ว่า อิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีภายในหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์เทียบกับหลังทำให้สุกต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่อย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเนื้อภายในของอิมัลชันไก่อยได้รับความร้อนต่ำกว่าผิวภายนอกจึงทำให้ผลจากเฟสไขมันที่แตกต่างกันที่มีต่อค่าสีมีความชัดเจนต่อสีภายในมากกว่าเมื่อเทียบกับผลที่ปรากฏกับสีภายนอกของอิมัลชันไก่อย

ดังนั้น ในภาพรวมผลการวิจัยส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้เฟสไขมันในอิมัลชันไก่อยที่เป็นน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI หรืออิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG ส่งผลในเชิงบวกต่อคุณลักษณะด้านสีของอิมัลชันไก่อยในรีโอมิเตอร์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้ว

#### 4.3 ศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสของระบบอิมัลชันไก่อย

##### 4.3.1 การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันแอมพลิจูด

การประเมินสมบัติทางวิทยากระแสของอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ ด้วยการทดสอบในรีโอมิเตอร์แบบควบคุมความเครียดเฉือน โดยมีการแปรผันแอมพลิจูด (amplitude sweep) แล้ววัดค่ามอดูลัสสะสม ( $G'$ ) และมอดูลัสสูญเสีย ( $G''$ ) แสดงดังรูปที่ 4.18

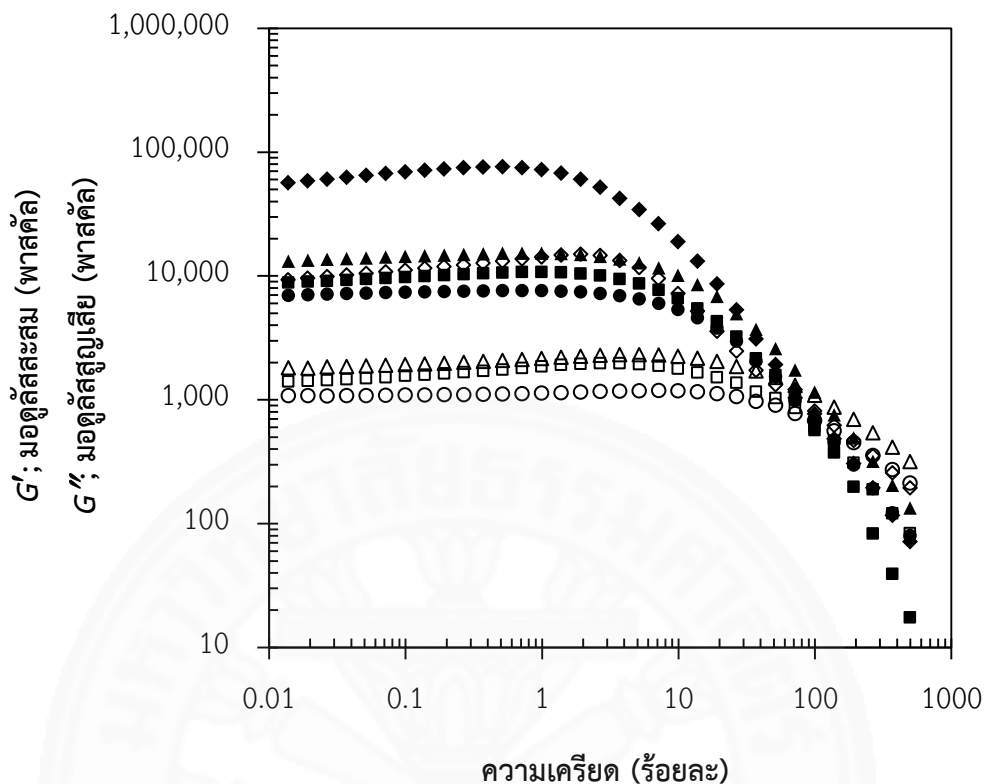
จากรีโอมแกรมจะเห็นได้ว่า มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันไก่อยทั้ง 4 สูตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น โดยจะสังเกตได้ว่า การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสทั้ง 2 ค่า เริ่มตั้งแต่แอมพลิจูดต่ำที่สุดที่ใช้ในการทดสอบ หรือที่ระดับความเครียดเฉือนร้อยละ 0.01 ซึ่ง

เป็นค่าขีดจำกัดล่างของเครื่องมือวัด ไปจนถึงที่ระดับความเครียดเฉือนประมาณร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 10 โดยแตกต่างกันไม่มากเมื่อเทียบระหว่างอิมัลชันไถ่ย่อยแต่ละสูตร

เมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นอีกจะพบว่า เริ่มส่งผลกระทบต่อทำให้ทั้งค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียลดลงอย่างชัดเจน โดยจากรีโอแกรมจะสังเกตเห็นได้ในช่วงตั้งแต่ว่าระดับความเครียดเฉือนประมาณร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 10 เป็นต้นไป นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ค่ามอดูลัสสะสมของอิมัลชันไถ่ย่อยทุกสูตรจะเริ่มลดลงที่ระดับความเครียดเฉือนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการลดลงของมอดูลัสสูญเสีย รวมทั้งพบว่า มอดูลัสสะสมมีอัตราการลดลงที่เร็วกว่าเมื่อเทียบกับมอดูลัสสูญเสีย

นอกจากนี้การทดสอบแบบแปรผันแอมพลิจูดยังพบว่า มอดูลัสสะสมของอิมัลชันไถ่ย่อยทุกสูตรมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับมอดูลัสสูญเสีย โดยความแตกต่างระหว่างมอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียมีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันทุกสูตร





รูปที่ 4.18 มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันไคโยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันแอมพลิจูดด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้จุดทึบ หมายถึง มอดูลัสสะสม

จุดโปร่ง หมายถึง มอดูลัสสูญเสีย

■ และ □ หมายถึง อิมัลชันไคโยที่ใช้มันไก่

▲ และ △ หมายถึง อิมัลชันไคโยที่ใช้ไขมันรำข้าวแฉะเยือกแข็ง

● และ ○ หมายถึง อิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

◆ และ ◇ หมายถึง อิมัลชันไคโยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ลักษณะสำคัญของการทดสอบแบบพลวัตประเภทเฉือนไป-กลับ (oscillatory shear) เป็นการทำให้ตัวอย่างอาหารเสีรูปร่างในระดับต่ำโดยเลือกใช้แอมพลิจูดระดับต่ำ ซึ่งหมายถึงความเค้นหรือความเครียดสูงสุดที่กระทำกับตัวอย่างมีค่าไม่มากพอจะทำให้โครงสร้างของอาหารเกิดความเสียหายหรือถูกทำลาย (yielding) ซึ่งเป็นแบบถาวรไม่สามารถย้อนกลับได้อีก เพื่อให้ค่าตัวแปรต่างๆ ที่วัดได้ยังคงมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างระดับจุลภาคของอาหารอยู่ (Barnes, 2000)

โดยเมื่อใช้แอมพลิฟายด์ต่ำในการทดสอบ อาหารจะแสดงพฤติกรรมอยู่ในช่วงที่ความเค้นและความเครียดเฉือนจะสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (linear viscoelastic region: LVER) โดยมอดูลัสของอาหารที่วัดได้จะไม่ขึ้นกับความเค้นเฉือนหรือความเครียดเฉือนที่ได้รับ (Barnes, 2000; Picout และ Ross-Murphy, 2003)

เมื่ออิมัลชันไถ่ยกทั้ง 4 สูตร แสดงค่ามอดูลัสที่ไม่คงที่ในระหว่างการทดสอบแบบแปรผันแอมพลิฟายด์ (รูปที่ 4.18) หรือหมายถึง มอดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเครียดที่เครื่องมือกระทำกับอิมัลชันไถ่ยกที่กำลังทดสอบอยู่ การทดสอบที่ความเครียดเฉือนเกินกว่าร้อยละ 0.01 จึงไม่อยู่ในช่วงที่ความเค้นและความเครียดเฉือนจะสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ทำให้ในการทดสอบโดยแปรผันความถี่และแปรผันอุณหภูมิต่อไปจึงเลือกความเครียดเฉือนที่ร้อยละ 0.01 ไปใช้

การทดสอบโดยแปรผันแอมพลิฟายด์ชี้ให้เห็นว่า อิมัลชันไถ่ยกทุกสูตรเป็นวัสดุประเภทหยุ่นหนืด (viscoelastic material) เนื่องจากแสดงพฤติกรรมร่วมกันระหว่างความยืดหยุ่นและความหนืด โดยมีทั้งมอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสีย ซึ่งมอดูลัสสะสมจะแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นหรือคล้ายของแข็ง ขณะที่ในทางกลับกันมอดูลัสสูญเสียจะแสดงพฤติกรรมหนืดหรือคล้ายของเหลว (Gunnasekaran และ Ak, 2000; Picout และ Ross-Murphy, 2003) นอกจากนี้มอดูลัสสะสมที่สูงกว่ามอดูลัสสูญเสียยังชี้ให้เห็นว่า อิมัลชันไถ่ยกทุกสูตรมีพฤติกรรมแบบเจล มีความคล้ายของแข็งมากกว่าของเหลว (Picout และ Ross-Murphy, 2003) ผลการวิจัยส่วนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Genccelep และคณะ (2015) ที่ได้ศึกษาแบบจำลองอิมัลชันเนื้อสัตว์ลดไขมัน ซึ่งทดแทนไขมันด้วยน้ำมันข้าวโพด (ไม่ได้เตรียมเป็นอิมัลชันน้ำมัน) ผสมแป้งมันฝรั่งดิบหรือแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างๆ และงานวิจัยของ Felisberto และคณะ (2015) ที่ศึกษาอิมัลชันเนื้อสัตว์ลดไขมันและเกลือ โดยทดแทนไขมันด้วยสารเพิ่มเนื้อที่มีสมบัติพรีไบโอติกชนิดต่างกัน ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า มอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันเนื้อสัตว์ต่ำกว่ามอดูลัสสะสม

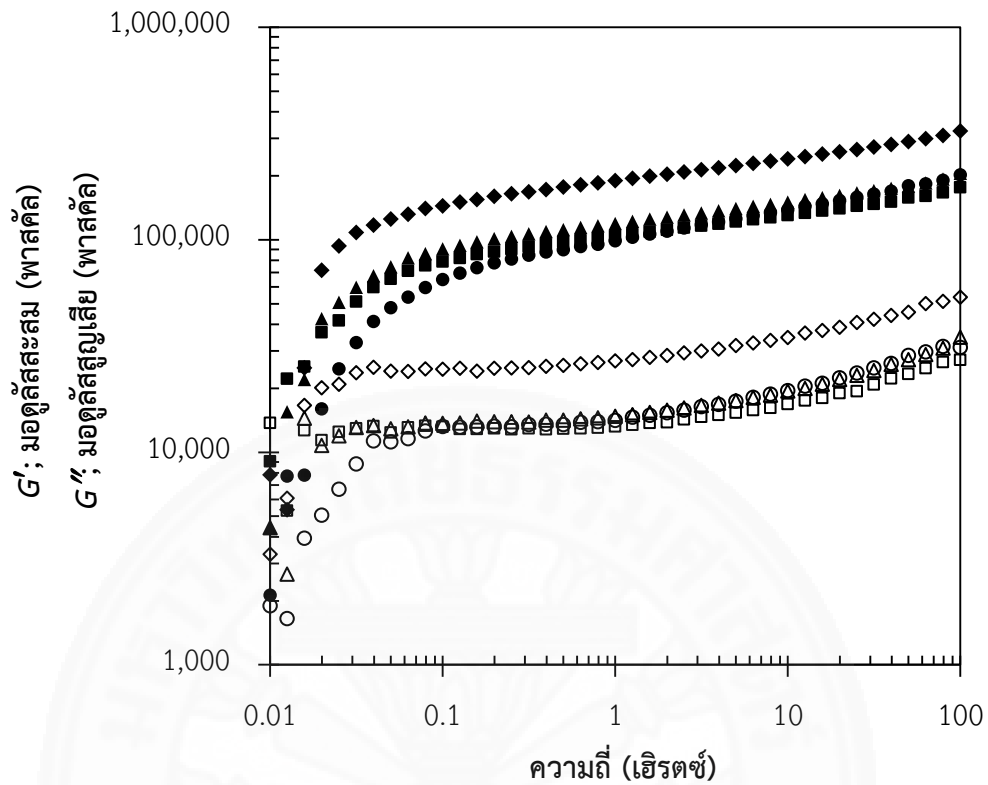
#### 4.3.2 การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันความถี่

การประเมินสมบัติทางวิทยากระแสของอิมัลชันไถ่ยกสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ ด้วยการทดสอบในรีโอมิเตอร์โดยแปรผันความถี่ (frequency sweep) ให้ผลดังรูปที่ 4.19 และ 4.20

จากรูปที่ 4.19 จะพบว่า มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันไถ่ยกทั้ง 4 สูตร จากการทดสอบแบบแปรผันความถี่ ยังคงมีแนวโน้มเหมือนกับที่พบในการทดสอบแบบแปรผันแอมพลิฟายด์ โดยมอดูลัสสะสมมีค่ามากกว่ามอดูลัสสูญเสียตลอดช่วงความถี่ที่ใช้ทดสอบ รวมทั้งไม่พบการตัดกันระหว่างเส้นกราฟแสดงค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสีย โดยการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสทั้งสองเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน คือ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าอิมัลชันไถ่ยกสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SC กับ MTG ทดแทนมันไก่ มีค่ามอดูลัสสะสมและ

มอดูลัสสูญเสียสูงกว่าเมื่อเทียบกับอิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และอิมัลชันไคโยที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่อีก 2 สูตร ได้แก่ สูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง และสูตรที่ใช้ไขมันอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI โดยทั้ง 3 สูตร มีค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียใกล้เคียงกันมากตลอดช่วงความถี่ที่ใช้ทดสอบ

เมื่อพิจารณาแทนเจนต์สูญเสีย ( $\tan \delta$ ) ของอิมัลชันไคโยทั้ง 4 สูตร (รูปที่ 4.20) จะพบว่า ในช่วงความถี่ต่ำแทนเจนต์สูญเสียจะมีค่าสูงแล้วจึงลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงที่ความถี่ประมาณ 0.1 เฮิรตซ์ จึงมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยอยู่ในช่วงประมาณ 0.15 หลังจากนั้นเมื่อความถี่สูงเกิน 10 เฮิรตซ์ แทนเจนต์สูญเสียจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไคโยแต่ละสูตรจะเห็นได้ว่า มีความแตกต่างกันแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ค่อนข้างชัด ได้แก่ กลุ่มที่มีค่าสูงกว่า 2 สูตร และกลุ่มที่มีค่าต่ำกว่า 2 สูตร โดยในกลุ่มที่มีแทนเจนต์สูญเสียสูงกว่า ได้แก่ อิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้งอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI และที่ผสม SC กับ MTG สำหรับกลุ่มที่มีแทนเจนต์สูญเสียต่ำกว่า ได้แก่ อิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งทดแทนมันไก่



รูปที่ 4.19 มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันความถี่ด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้จุดทึบ หมายถึง มอดูลัสสะสม

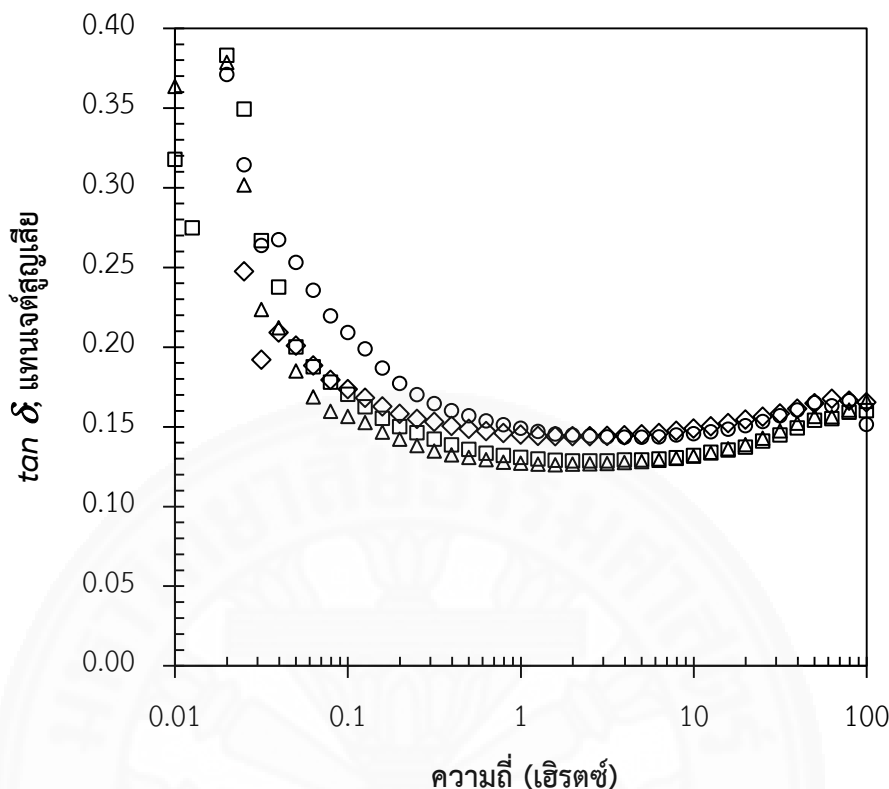
จุดโปร่ง หมายถึง มอดูลัสสูญเสีย

■ และ □ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันไก่อ

▲ และ △ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

● และ ○ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

◆ และ ◇ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG



**รูปที่ 4.20** แทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใส่เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันความถี่ด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้ □ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใสไขมันไก่

△ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใสน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

○ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใสอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

◇ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใสอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

การทดสอบโดยแปรผันความถี่ สำหรับอิมัลชันไก่อยทั้ง 4 สูตร แสดงให้เห็นว่าอิมัลชันไก่อยก่อนทำให้สุกเป็นเจลที่ไม่แข็งแรง (weak gel) ทั้งการที่มีมอดูลัสสะสมซึ่งสูงกว่ามอดูลัสสูญเสีย การที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียในอัตราเกือบจะเท่ากัน (หมายถึง เส้นกราฟเกือบจะขนานกัน และความชันของกราฟที่ไม่สูงมาก ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.3) ซึ่งหมายถึงมอดูลัสเกือบไม่ขึ้นกับความถี่ (Clark และ Ross-Murphy, 1987) รวมทั้งการไม่พบการตัดกัน (cross over) ระหว่างเส้นกราฟที่แสดงค่ามอดูลัสสะสมและค่ามอดูลัสสูญเสีย (Picout และ Ross-Murphy, 2003)

นอกจากนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าวยังเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะในระบบอิมัลชันที่มีกลไกการทำให้ไขมันคงตัวด้วยโปรตีน (protein-stabilized emulsion) (Gunnasekaran และ Ak, 2000) ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับอิมัลชันเนื้อสัตว์ในไก่ยอซึ่งมีกลไกทำให้เฟสไขมันคงตัวด้วยโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จากเนื้อสัตว์

งานวิจัยของ Flores และคณะ (2007) Lorenzo และคณะ (2011) Marchetti และคณะ (2013) Savadkoochi และคณะ (2013) และ Genccelep และคณะ (2015) ได้รายงานไว้เช่นเดียวกันว่า ในอิมัลชันเนื้อสัตว์จะพบว่า มอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นระหว่างการทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันความถี่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์จัดเป็นเจลที่ไม่แข็งแรง สำหรับมอดูลัสสะสมที่สูงกว่ามอดูลัสสูญเสียแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของเจลมีพฤติกรรมยืดหยุ่นมากกว่าหนืด หรือมีความคล้ายของแข็งมากกว่าของเหลวตลอดช่วงความถี่ที่ทดสอบ (Savadkoochi และคณะ, 2013) แม้ว่าอิมัลชันไก่ยอยังไม่ได้ผ่านการทำให้สุกซึ่งเป็นขั้นตอนทำให้เกิดเจลที่สมบูรณ์ก็ตาม

การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันความถี่ยังเป็นการทดสอบที่บ่งบอกความแข็งแรงของโครงสร้างและความคงตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์ได้ โดยอิมัลชันที่มีโครงสร้างแข็งแรงกว่าจะแสดงมอดูลัสสะสมที่สูงกว่า (Mezger, 2006) และความแข็งแรงของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวมากขึ้นเช่นเดียวกับที่รายงานไว้ในงานวิจัยของ Choi และคณะ (2010) Youssef และ Barbut (2011) และ Zhuang และคณะ (2016) รวมทั้งเมื่อมอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของอิมัลชันเนื้อสัตว์มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นจะชี้ให้เห็นว่า อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคงตัวที่ต่ำลง (Savadkoochi และคณะ, 2013)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เมื่อมอดูลัสของอิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG สูงกว่าสูตรอื่นจึงอาจตีความได้ว่า อิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG มีความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันมากกว่าสูตรอื่น และอิมัลชันมีความคงตัวมากกว่าสูตรอื่น ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำ เมื่อโปรตีนเคซีนสร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสห่อหุ้มหยดนํ้ามันรำข้าวระหว่างขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันน้ำมันรำข้าวก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันเนื้อสัตว์อีกครั้ง รวมทั้งเป็นผลจากกิจกรรมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่สร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของโปรตีนเคซีน ทำให้ฟิล์มโปรตีนที่ห่อหุ้มหยदनํ้ามันมีความแข็งแรงมากขึ้น (Herrero และคณะ, 2012) โดยทั้งหมดเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตั้งแต่อิมัลชันไก่ยอยังไม่ได้ผ่านความร้อนเพื่อทำให้สุก ซึ่งจะช่วยให้โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์เกิดเจลและสร้างโครงร่างตาข่ายภายในอิมัลชันเนื้อสัตว์ มีผลให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีความคล้ายของแข็งเพิ่มมากขึ้น (Barbut, 1999) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Herrero และคณะ (2011a และ 2011b) ที่พบว่า อิมัลชันน้ำมันมะกอกที่ผสมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสมีความแข็งแรงของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแทนเจนต์สูญเสียสำหรับอิมัลชันไก่อยทั้ง 4 สูตร ยังคงแสดงให้เห็นว่า อิมัลชันไก่อยก่อนทำให้สุกเป็นเจลที่ไม่แข็งแรง โดยในเจลที่ไม่แข็งแรงจะพบว่า แทนเจนต์สูญเสียมีค่าไม่สูงนัก (Mleko และ Foegeding, 2000; Picout และ Ross-Murphy, 2003; Farahnaky และคณะ, 2010; Savadkoochi และ Farahnaky, 2012) สอดคล้องกับแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยทุกสูตร นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของแทนเจนต์สูญเสียในช่วงความถี่สูงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเจลที่ไม่แข็งแรงเช่นกัน (Picout และ Ross-Murphy, 2003) ซึ่งในอิมัลชันไก่อยทุกสูตรพบการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้เช่นเดียวกัน

แทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร ซึ่งต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งทดแทนมันไก่เล็กน้อย (ประมาณ 0.02) แสดงให้เห็นว่า อิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร มีพฤติกรรมคล้ายของเหลวมากกว่าอีก 2 สูตร ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากปริมาณน้ำในอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวที่มากกว่า เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันน้ำมันรำข้าวจะมีการผสมน้ำลงไปร้อยละ 42 ของน้ำหนักอิมัลชันน้ำมันทั้งหมด

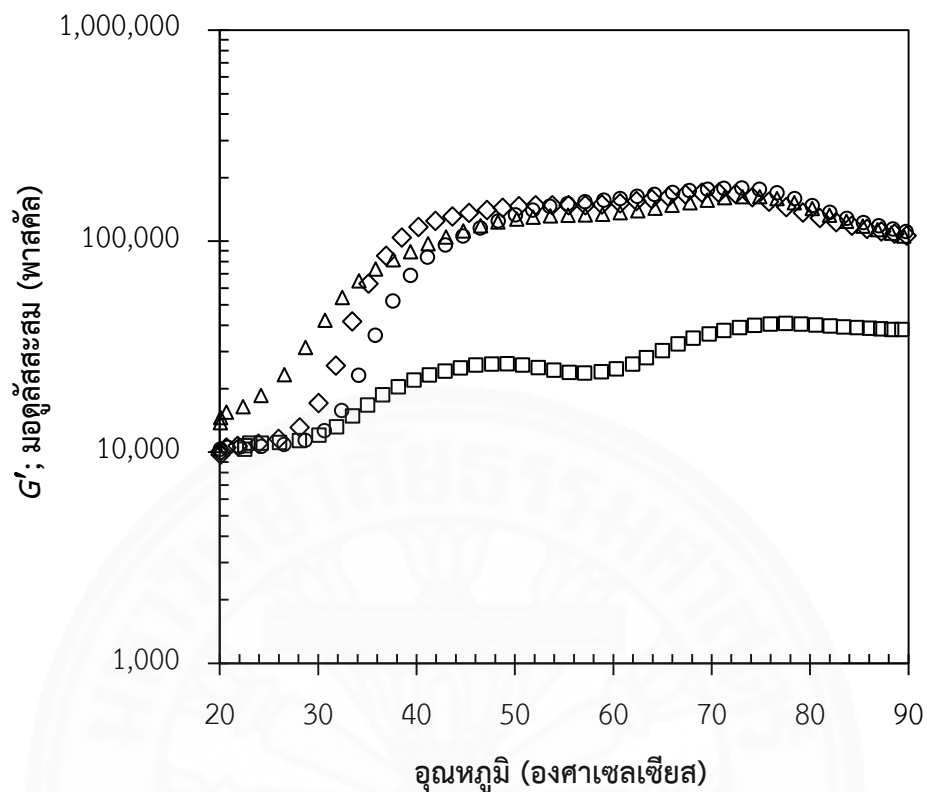
#### 4.3.3 การทดสอบแบบพลวัตโดยแปรผันอุณหภูมิ

การประเมินสมบัติทางวิทยากระแสของอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ ด้วยการทดสอบในรีโอมิเตอร์โดยแปรผันอุณหภูมิ (temperature sweep) แล้ววัดค่ามอดูลัสสะสม แบ่งเป็นช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิและช่วงที่ลดอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 และดังตารางที่ 4.23 ซึ่งการทดสอบลักษณะนี้จะสอดคล้องกับขั้นตอนการทำให้อิมัลชันไก่อยสุกด้วยความร้อน และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางวิทยากระแสของอิมัลชันไก่อยหลังทำให้สุกจะส่งผลต่อเนื่องไปสู่อิมัลชันไก่อยหลังมาเชื่อมดังผลการวิจัยในหัวข้อ 4.2

การทดสอบในช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิจาก 20 เป็น 90 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.21) พบว่า มอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยทั้ง 4 สูตร ในภาพรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร เพิ่มขึ้นสูงกว่ามาก เมื่อเทียบกับอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสมสำหรับอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่อยมีการเพิ่มขึ้นเป็น 2 ช่วง อย่างชัดเจน แต่สำหรับอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็ว ขณะที่ในช่วงที่สองมอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มาก และในช่วงอุณหภูมิสูงมอดูลัสสะสมจะลดลง นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมในช่วงแรกที่มีอุณหภูมิยังไม่สูงมีความแตกต่างกัน โดยอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งจะพบการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมเร็วกว่าอีก 3 สูตร ที่เหลือ ทั้งสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่ออกจากการทดสอบช่วงที่ลดอุณหภูมิจาก 90 เป็น 20 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.22) จะพบว่า มอดูลัสสะสมมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสำหรับอิมัลชันไก่อยทั้ง 4 สูตร แม้ว่าจะพ้นช่วงที่ได้รับความร้อนไปแล้วก็ตาม โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมใกล้เคียงกัน ยกเว้นอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าว แชนเยือกแข็งที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมต่ำกว่าเล็กน้อย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณามอดูลัสสะสมสูงสุดขณะเพิ่มอุณหภูมิและเมื่อสิ้นสุดการเพิ่มอุณหภูมิ (ที่ 90 องศาเซลเซียส) (ตารางที่ 4.23) พบว่า มอดูลัสของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร มากกว่าอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ( $p \leq 0.05$ ) แต่อุณหภูมิที่แสดงค่ามอดูลัสสะสมสูงสุดนั้นไม่แตกต่างกันสำหรับอิมัลชันไก่อยทั้ง 4 สูตร ( $p > 0.05$ ) อย่างไรก็ตามการลดลงของมอดูลัสสะสมจากค่าสูงสุดไปยังค่าสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการเพิ่มอุณหภูมิสำหรับอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมจะต่ำกว่าสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่อีก 3 สูตร สำหรับมอดูลัสสะสมเมื่อสิ้นสุดการลดอุณหภูมิ (ที่ 20 องศาเซลเซียส) จะสังเกตได้ว่า อิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่อยยังคงมีมอดูลัสสะสมต่ำกว่าอีก 3 สูตร อย่างชัดเจน ( $p \leq 0.05$ ) ขณะที่สูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG มีมอดูลัสสะสมมากที่สุดเทียบกับสูตรอื่นที่ใช้ น้ำมันรำข้าว



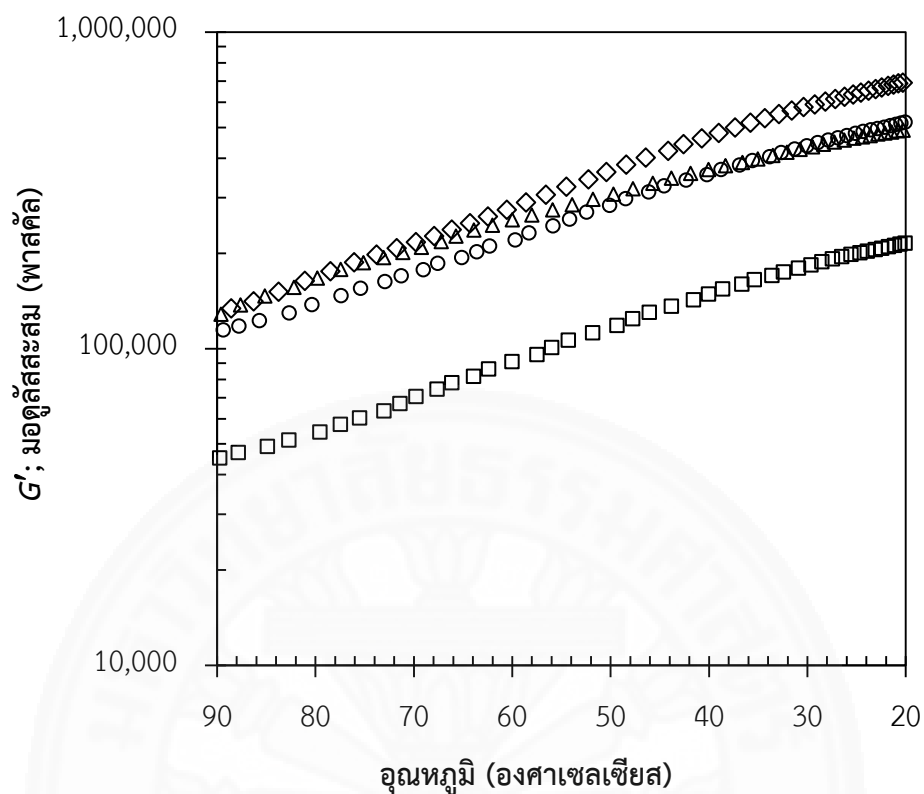
รูปที่ 4.21 โมดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผัน  
 อุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้ □ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่

△ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแซ่เยือกแข็ง

○ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

◇ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG



รูปที่ 4.22 มอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผัน  
อุณหภูมิช่วงที่ทำให้เย็นด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้ □ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่

△ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้น้ำมันรำข้าวแซ่เยือกแข็ง

○ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI

◇ หมายถึง อิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ตารางที่ 4.23 สมบัติทางวิทยาการระแสของอิมัลชันไก่อยที่ใ้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิด้วยรีโอมิเตอร์

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	มอดูลัสสะสมสูงสุด ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ (กิโลพาสคัล)	อุณหภูมิที่แสดง มอดูลัสสะสมสูงสุด (องศาเซลเซียส) <sup>ns</sup>	มอดูลัสสะสมเมื่อ หยุดเพิ่มอุณหภูมิ (กิโลพาสคัล)	มอดูลัสสะสมเมื่อ หยุดลดอุณหภูมิ (กิโลพาสคัล)
มันไก่	43.24 $\pm$ 3.66 <sup>a</sup>	75.37 $\pm$ 3.08	38.96 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	213.65 $\pm$ 24.73 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแ่เยือกแข็ง	164.85 $\pm$ 16.41 <sup>b</sup>	73.14 $\pm$ 0.03	94.37 $\pm$ 2.68 <sup>b</sup>	496.66 $\pm$ 39.53 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	181.73 $\pm$ 51.10 <sup>b</sup>	71.27 $\pm$ 0.03	94.44 $\pm$ 8.13 <sup>b</sup>	518.55 $\pm$ 193.24 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	172.86 $\pm$ 15.09 <sup>b</sup>	70.66 $\pm$ 0.87	104.45 $\pm$ 19.24 <sup>b</sup>	640.13 $\pm$ 53.66 <sup>b</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

เมื่ออิมัลชันเนื้อสัตว์ได้รับความร้อน โพรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในเนื้อสัตว์จะเกิดการเสียสภาพอย่างมากและสร้างเจลที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่น มีเนื้อสัมผัสแบบกึ่งแข็งไม่สามารถไหลได้อีก (Barbut, 1999) อิมัลชันเนื้อสัตว์จึงมีพฤติกรรมทางวิทยากระแสที่เปลี่ยนไปโดยจะมีความคล้ายของเหลวลดลงมาก ขณะที่มีความคล้ายของแข็งสูงขึ้นมากแทน (Dickinson และ Casanova, 1999) ดังนั้นระหว่างการทดสอบแบบแปรผันอุณหภูมิในช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิจาก 20 เป็น 90 องศาเซลเซียสมอดูลัสสะสมที่แสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นและคล้ายของแข็งของอิมัลชันไก่ยกยอทุกสูตรจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังเช่นที่พบในงานวิจัยของ Alvarez และคณะ (2012) Marchetti และคณะ (2013) และ Hu และคณะ (2016) ซึ่งอธิบายไว้ว่า เกิดจากโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์มีการสร้างโครงร่างตาข่ายของโปรตีนหรือเมทริกซ์โปรตีนขึ้นในอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ผ่านความร้อนมาแล้ว

มอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่ยกยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งที่สูงกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ทั้งระหว่างและหลังให้ความร้อน อาจเกิดจากอุณหภูมิของไขมันรำข้าวที่มีค่าต่ำกว่ามันไก่เมื่อขณะผสมกับเนื้อไก่บดในขั้นตอนสับผสมส่งผลให้อุณหภูมิส่วนผสมต่ำกว่าสูตรอื่นประมาณ 4 องศาเซลเซียส (ผลการทดลองเบื้องต้น) และมีผลให้โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในเนื้อไก่ถูกสกัดออกมามากขึ้นดังที่ Kerry และคณะ (2002) อธิบายไว้ว่า การสกัดโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในเนื้อสัตว์ด้วยการเติมเกลือจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิส่วนผสมต่ำลง ปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่สูงขึ้นจึงทำให้โครงสร้างเจลของอิมัลชันไก่ยกยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งมีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ เช่นเดียวกับที่รายงานโดย Smyth และ O'Neill (1997) นอกจากนี้ขนาดของหยดไขมันพืชที่เล็กกว่าเม็ดไขมันสัตว์ยังส่งผลให้โครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์มีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเกิดเจล ดังที่อธิบายไว้ในงานวิจัยของ Youssef และ Barbut (2009 และ 2010) ซึ่งใช้ไขมันคาโนลาทดแทนมันหมูแข็งในไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์

สำหรับมอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่ยกยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร ที่สูงกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ทั้งระหว่างและหลังให้ความร้อนนั้น อาจเป็นผลจากการมีปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่จะสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายของเจลมากกว่าสูตรควบคุม เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันไขมันรำข้าวได้มีการผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือเคซีนลงไปซึ่งจะเข้าไปทำหน้าที่สร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสต่อหุ้มหยดไขมันเอาไว้แล้ว เมื่อเติมอิมัลชันไขมันรำข้าวในขั้นตอนสับผสม โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จึงไม่ต้องเข้าไปทำหน้าที่สร้างฟิล์มโปรตีนอีก (Zhuang และคณะ, 2016) ขณะที่ในสูตรควบคุมที่ใช้มันไคนั้น โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จะต้องทำหน้าที่สร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสต่อหุ้มเม็ดไขมันไก่ เพื่อให้อิมัลชันไก่ยกยอมีความคงตัว (Barbut, 1999) เมื่อปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์สำหรับสร้างเป็นโครงร่างเจลมีมากขึ้นจึงทำให้โครงสร้างเจลของอิมัลชันไก่ยกยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวมีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม นอกจากนี้ไขมันรำข้าวผสม SC กับ MTG นั้น เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสยังมีส่วนช่วยสร้าง

พันธะเชื่อมโยงซึ่งจะเกิดขึ้นทั้งในฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟส (โปรตีนเคซีน) ที่ห่อหุ้มหยดน้ำมันอยู่แล้ว และในโครงร่างตาข่ายของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ มีผลทำให้โครงสร้างเจลมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย (Herrero และคณะ, 2012)

การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอิมัลชันไก่อยที่แบ่งได้เป็น 2 ช่วง เป็นไปตามลักษณะการเกิดเจลโดยทั่วไปของอิมัลชันเนื้อสัตว์ โดยช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจนถึงอุณหภูมิจุดเกิดเจล (gel point) โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์โดยเฉพาะโปรตีนไมโอซินเกิดการคลายตัว (unfolding) ของโครงสร้างหรือเกิดการเสียสภาพ ส่วนหัว (head) ของโมเลกุลของโปรตีนไมโอซินจะเข้ามาเกาะกันเป็นกลุ่ม ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณไม่เกิน 45-48 องศาเซลเซียส ทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์มีพฤติกรรมยืดหยุ่นมากขึ้น แต่ที่จุดนี้ยังไม่เกิดโครงสร้างเจลถาวร สำหรับช่วงอุณหภูมิสูงเมื่อพ้นอุณหภูมิจุดเกิดเจลไปแล้ว ซึ่งโดยปกติจะอยู่ที่ประมาณ 55 องศาเซลเซียส ขึ้นไป โปรตีนที่เกาะกลุ่มจะสร้างโครงร่างตาข่าย และเกิดเป็นโครงสร้างเจลถาวรแบบย้อนกลับไม่ได้ (irreversible gel) (Barbut, 1999; Sams, 2001; Hu และคณะ 2016)

มอดูลัสสะสมในอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงก่อนจุดเกิดเจลเทียบกับหลังจุดเกิดเจล โดยแตกต่างจากอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่อยนั้น อาจเกิดจากความแตกต่างของเฟสไขมันที่ใช้เป็นส่วนผสม นอกเหนือไปจากปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่พร้อมเกิดโครงสร้างเจลของทั้ง 3 สูตร ซึ่งมากกว่าสูตรควบคุม โดยไขมันรำข้าวที่ใช้เป็นเฟสไขมันนั้น ที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดสอบที่ 20 องศาเซลเซียส จะมีสถานะเป็นของเหลวอยู่แล้ว ขณะที่มันไก่อยเป็นของแข็งและเกิดการหลอมเหลวได้อยู่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อิมัลชันไก่อยแสดงพฤติกรรมคล้ายของเหลวมากขึ้น แม้โครงสร้างโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จะเริ่มคลายตัวและเกิดการเกาะกลุ่มกันแล้วส่งผลให้อิมัลชันไก่อยแสดงพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากขึ้นก็ตาม ดังนั้น เมื่ออิมัลชันไก่อยเริ่มเกิดโครงร่างตาข่ายของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดเกิดเจล การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมจึงไม่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากเท่ากับที่พบในสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่

การลดลงของมอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยในช่วงอุณหภูมิสูงหลังโครงสร้างเจลถาวรเกิดขึ้นแล้วอาจเกิดจากการขยายตัวของหยดน้ำมันรวมทั้งอากาศจากความร้อน ทำให้โครงสร้างเจลมีความแน่นน้อยลงส่งผลให้อิมัลชันไก่อยที่เกิดเจลแล้วมีพฤติกรรมยืดหยุ่นต่ำลง การลดลงเล็กน้อยไม่ส่งผลให้มอดูลัสสะสมเมื่อสิ้นสุดการให้ความร้อน (ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส) ของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร ต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ซึ่งผลการวิจัยส่วนนี้อาจชี้ให้เห็นว่า ในขั้นตอนทำให้สุกอุณหภูมิอิมัลชันไก่อยไม่จำเป็นต้องเกิน 75 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิที่ทำให้อิมัลชันไก่อยในแต่ละสูตรมีค่ามอดูลัสสะสมสูงสุดระหว่างการทำทดสอบโดยเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าในช่วงประมาณ 70-75 องศาเซลเซียส มีความสอดคล้องกับการเกิด

โครงสร้างเจลของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่จะเกิดอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวนี้ (Sams, 2001) และใกล้เคียงกับค่าที่รายงานไว้สำหรับอิมัลชันเนื้อสัตว์ในงานวิจัยก่อนหน้านี (Alvarez และคณะ, 2012; Marchetti และคณะ, 2013; Felisberto และคณะ, 2015)

ลักษณะการเริ่มต้นเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยสุตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมันซึ่งเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอิมัลชันไก่อยสุตรอื่น อาจเกิดจากปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ซึ่งถูกสกัดออกมามากกว่าสุตรอื่นเนื่องจากอุณหภูมิส่วนผสมต่ำกว่าดังที่กล่าวถึงไปก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ขนาดของหยดน้ำมันรำข้าวที่เล็กกว่าและมีจำนวนมากกว่าเมื่อเทียบกับเม็ดไขมันในสุตรควบคุมที่ใช้ไขมันไก่ ซึ่งมีผลทำให้โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์สร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสเพื่อห่อหุ้มหยดน้ำมันมากขึ้น โดยในการสร้างฟิล์มระหว่างเฟส โครงสร้างโปรตีนมีการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrange) (Sams, 2001) ซึ่งอาจมีผลให้โปรตีนมีความสามารถในการเกาะเป็นกลุ่มเพื่อเริ่มการเกิดโครงสร้างเจลได้มากขึ้น

การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมของอิมัลชันไก่อยที่เกิดเจลแล้วทั้ง 4 สุตร ระหว่างการทดสอบในช่วงที่ลดอุณหภูมิจาก 90 เป็น 20 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า โครงร่างตาข่ายของโปรตีนในเจलयังคงมีการสร้างต่อไปแม้ไม่ได้รับความร้อนแล้ว (Sams, 2001; Felisberto และคณะ, 2015) โดยการเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ของโปรตีนที่เสียสภาพแล้ว และการกลายเป็นของแข็งของไขมัน (Marchetti และคณะ, 2013) ทั้งนี้ Savadkoochi และคณะ (2013) รายงานว่ามอดูลัสสะสมของอิมัลชันเนื้อสัตว์ในไส้กรอกไก่จากเนื้อไก่แยกกระดูกด้วยเครื่อง (mechanically deboned meat: MDM) เพิ่มขึ้นในช่วงลดอุณหภูมิจากการทดสอบแบบแปรผันอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นมีอัตราคงที่ แสดงให้เห็นว่า โครงร่างตาข่ายของเจลโปรตีนยังคงมีการสร้างอยู่แม้จะผ่านจุดที่เกิดเจลไปแล้วในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ และทำให้โครงสร้างของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่เกิดเจลแล้วมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

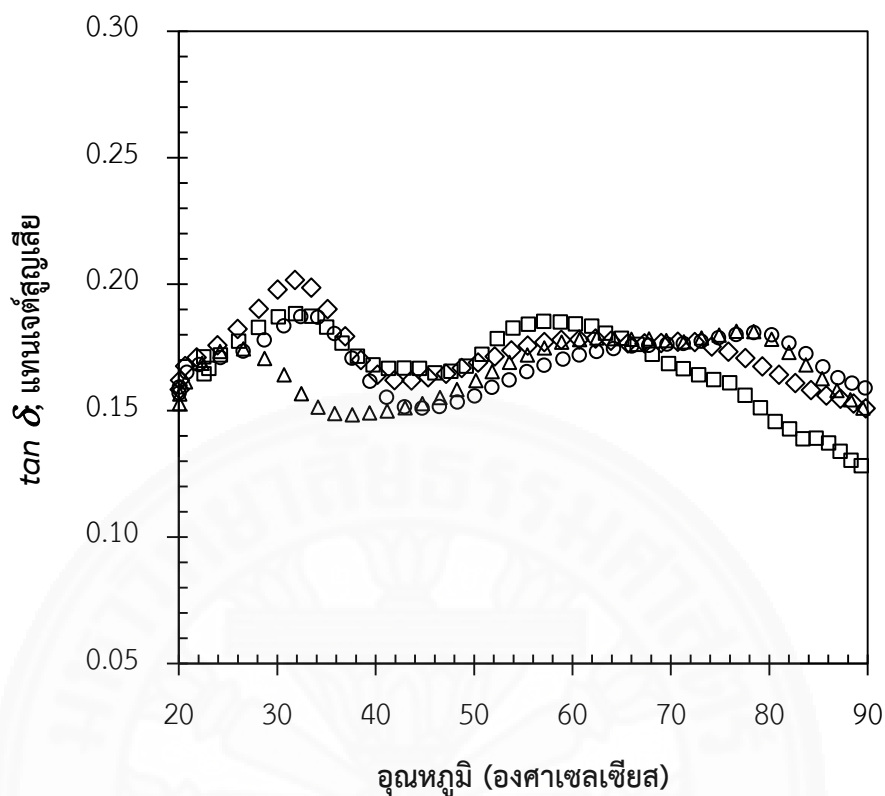
ส่วนการประเมินสมบัติทางวิทยากระแสนของอิมัลชันไก่อยสุตรควบคุมที่ใช้ไขมันไก่และสุตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สุตร ด้วยการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิในรีโอมิเตอร์แล้ววัดค่าแทนเจนต์สูญเสียในช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.23 ขณะที่การวัดค่าความหนืดเชิงซ้อน ( $\eta^*$ ) ร่วมกับแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยแต่ละสุตรในช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิจาก 20 ไปยัง 90 องศาเซลเซียส เพื่อติดตามการเกิดเจลและเพื่อหาอุณหภูมิทรานซิชัน (หมายถึงอุณหภูมิที่แสดงจุดที่โครงสร้างของอิมัลชันไก่อยมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน) แสดงดังรูปที่ 4.24-4.27 และตารางที่ 4.24

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่า ในภาพรวมแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยทุกสุตรมีแนวโน้มลดลง และจะเห็นการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 ช่วง เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสสะสม โดยแทนเจนต์สูญเสียจะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน 2 ครั้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก

20 เป็น 90 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นยอดแหลม 2 ยอด ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า อิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่อจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแทนเจนต์สูญเสียต่างจากอิมัลชันไคโยอีก 3 สูตร ที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่อ รวมทั้งยังพบว่า ตำแหน่งของยอดแหลมของค่าแทนเจนต์สูญเสียยอดแรกสำหรับอิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งจะต่างจากสูตรที่เหลืออย่างชัดเจนโดยพบยอดแหลมที่อุณหภูมิต่ำกว่าสูตรอื่น

ความหนืดเชิงซ้อนของอิมัลชันไคโยแต่ละสูตร (รูปที่ 4.24-4.27) มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับมอดูลัสสะสม (รูปที่ 4.21) โดยการเพิ่มขึ้นแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของแทนเจนต์สูญเสียจะพบว่า เมื่อแทนเจนต์สูญเสียเริ่มลดลงในแต่ละช่วง ความหนืดเชิงซ้อนจะเริ่มเพิ่มขึ้น จึงสามารถระบุอุณหภูมิทรานซิชันได้จากความชันของกราฟแทนเจนต์สูญเสียต่ำที่สุดหรือเมื่อความชันของกราฟความหนืดเชิงซ้อนมีค่ามากกว่า 0.001 ซึ่งจะพบว่า อิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งทดแทนมันไก่อมีอุณหภูมิทรานซิชันช่วงแรกต่ำกว่าสูตรอื่น ( $p \leq 0.05$ ) ประมาณ 5 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิทรานซิชันช่วงแรกของอิมัลชันไคโยอีก 3 สูตร ได้แก่ สูตรควบคุมที่ใช้มันไก่อ และสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่อทั้ง 2 สูตร ไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) โดยมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส

สำหรับอุณหภูมิทรานซิชันช่วงที่ 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิจุดเกิดเจลของอิมัลชันจะพบว่า อิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่อมีอุณหภูมิทรานซิชันต่ำกว่าสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI ( $p \leq 0.05$ ) ประมาณ 4 องศาเซลเซียส ขณะที่ทั้ง 2 สูตรนี้มีอุณหภูมิทรานซิชันช่วงที่ 2 ไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) โดยจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 62 องศาเซลเซียส สำหรับอุณหภูมิทรานซิชันช่วงที่ 2 ของอิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG พบว่าไม่แตกต่างจากอีก 3 สูตร ( $p > 0.05$ )



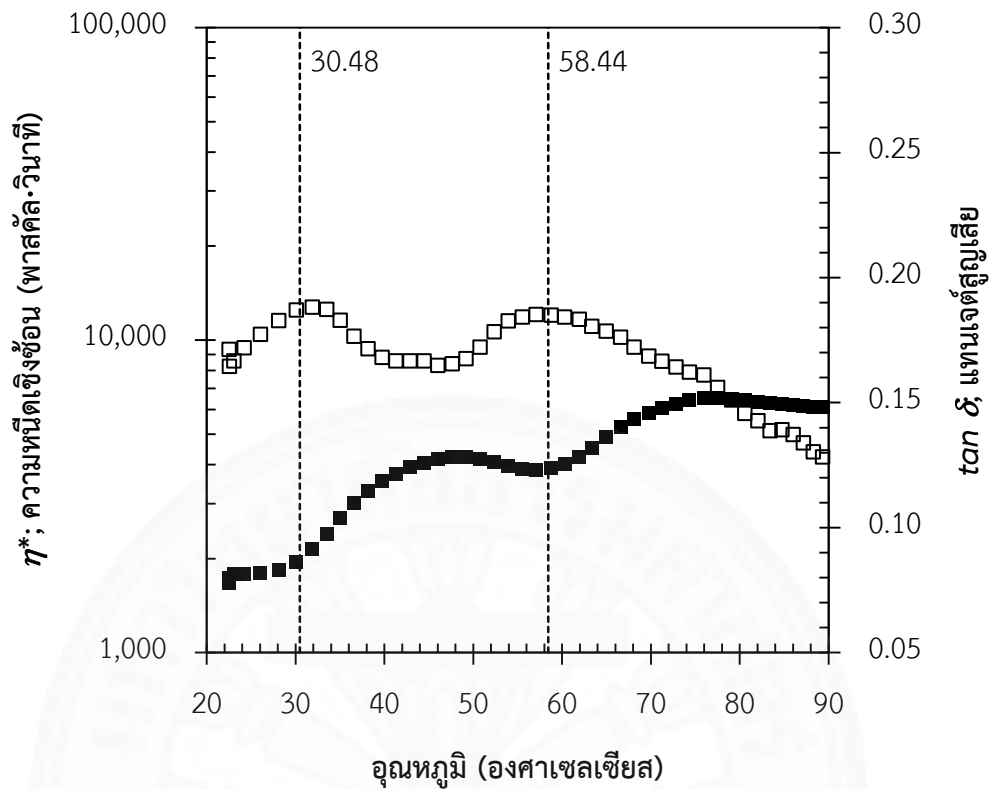
รูปที่ 4.23 แทนเจนต์สูญเสียของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผัน อุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้ □ หมายถึง อีพ็อกซีเรซินที่ใช้ไขมันไก่

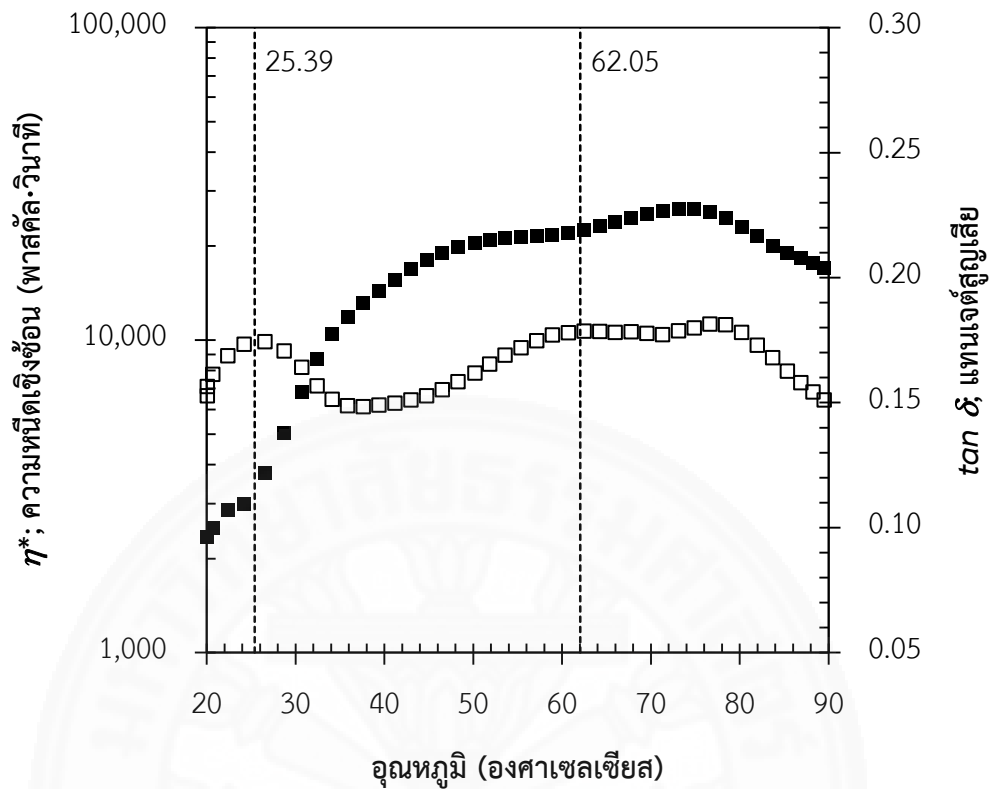
Δ หมายถึง อีพ็อกซีเรซินที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

○ หมายถึง อีพ็อกซีเรซินที่ใช้อีพ็อกซีเรซินน้ำมันรำข้าวผสม SPI

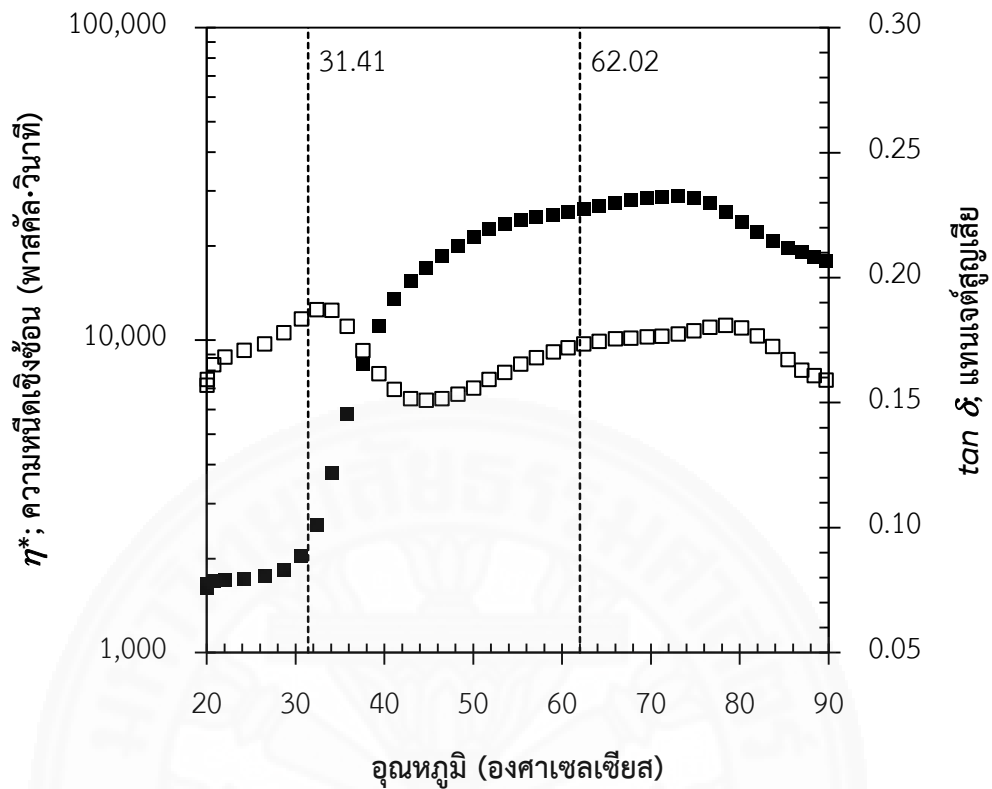
◇ หมายถึง อีพ็อกซีเรซินที่ใช้อีพ็อกซีเรซินน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG



รูปที่ 4.24 ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอีพ็อกซีไคยอนที่ใช้มันไคเป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิจนช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์  
กำหนดให้ ■ หมายถึง ความหนืดเชิงซ้อน  
□ หมายถึง แทนเจนต์สูญเสีย  
----- หมายถึง อุณหภูมิทรานซิชัน



รูปที่ 4.25 ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่ยอที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง เป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์ กำหนดให้ ■ หมายถึง ความหนืดเชิงซ้อน □ หมายถึง แทนเจนต์สูญเสีย ----- หมายถึง อุณหภูมิทรานซิชัน

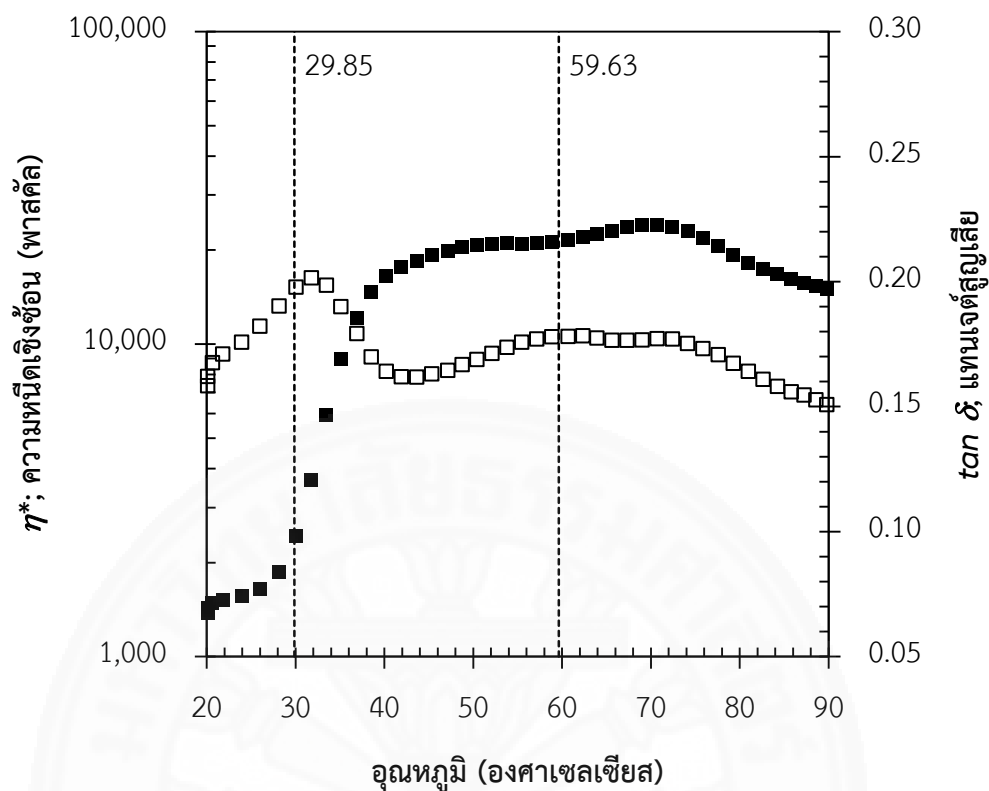


รูปที่ 4.26 ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้ ■ หมายถึง ความหนืดเชิงซ้อน

□ หมายถึง แทนเจนต์สูญเสีย

----- หมายถึง อุณหภูมิทรานซิชัน



**รูปที่ 4.27** ความหนืดเชิงซ้อนและแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิช่วงที่ทำให้ร้อนด้วยรีโอมิเตอร์

กำหนดให้ ■ หมายถึง ความหนืดเชิงซ้อน  
□ หมายถึง แทนเจนต์สูญเสีย  
----- หมายถึง อุณหภูมิทรานซิชัน

**ตารางที่ 4.24** อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสภาพของระหว่างกาการเกิดเจลอิมัลชันไคยอที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันจากการทดสอบโดยแปรผันอุณหภูมิด้วยรีโอมิเตอร์

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไคยอ	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	อุณหภูมิทรานซิชัน ช่วงที่ 1	อุณหภูมิทรานซิชัน ช่วงที่ 2
	(องศาเซลเซียส)	(องศาเซลเซียส)
มันไก่	30.48 $\pm$ 2.72 <sup>b</sup>	58.44 $\pm$ 2.72 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	25.39 $\pm$ 1.36 <sup>a</sup>	62.05 $\pm$ 1.69 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	31.41 $\pm$ 3.13 <sup>b</sup>	62.02 $\pm$ 1.68 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	29.85 $\pm$ 3.25 <sup>b</sup>	59.63 $\pm$ 1.02 <sup>ab</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

การเปลี่ยนแปลงของแทนเจนต์สูญเสียของอิมัลชันไคยอทุกสูตรระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 เป็น 90 องศาเซลเซียส จะสอดคล้องกับการอธิบายกระบวนการเกิดเจลของอิมัลชันไคยอที่แบ่งได้เป็น 2 ช่วง ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ทั้งในประเด็นของการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอิมัลชันไคยอและอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่ออิมัลชันไคยอแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นหรือคล้ายของแข็งเพิ่มมากขึ้นจะไปส่งผลให้แทนเจนต์สูญเสียลดลง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อส่วนหัวของโมเลกุลของโปรตีนไมโอซินจะเข้ามาเกาะกันเป็นกลุ่ม และเมื่อโปรตีนที่เกาะกลุ่มจะสร้างโครงร่างตาข่ายเป็นเจลถาวร ในทางกลับกันเมื่ออิมัลชันไคยอแสดงพฤติกรรมหนืดหรือคล้ายของเหลวมากขึ้นจะส่งผลให้แทนเจนต์สูญเสียเพิ่มขึ้น

ในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นของแทนเจนต์สูญเสีย (มอดูลัสสะสมยังไม่เริ่มต้นเพิ่มขึ้น แต่มอดูลัสสูญเสียเพิ่มขึ้น) เนื่องจากการเริ่มต้นการคลายตัวของโครงสร้างโปรตีน (โปรตีนเริ่มเกิดการเสียสภาพ) ทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์แสดงพฤติกรรมหนืดหรือคล้ายของเหลวเพิ่มขึ้น แต่โปรตีนยังไม่เกาะกลุ่มกันจึงไม่ทำให้พฤติกรรมยืดหยุ่นหรือคล้ายของแข็งเพิ่มขึ้น (Alvarez และคณะ, 2012) โดยในงานวิจัยของ Alvarez และคณะ (2012) รายงานว่า ในช่วงแรกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้ อุณหภูมิจะอยู่ที่ไม่เกิน 28-30 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อพ้นจากช่วงนี้ไปแล้วมอดูลัสสะสมจึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากโปรตีนที่คลายตัวมาแล้วเริ่มเกาะกลุ่มกัน ทำให้อิมัลชันเนื้อสัตว์แสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นหรือคล้ายของแข็งมากขึ้น

นอกจากนี้ในช่วงแรกที่แทนเจนต์สูญเสียเพิ่มขึ้นยังเป็นผลที่สืบเนื่องจากไขมันสัตว์ในอิมัลชันเนื้อสัตว์เกิดการหลอมเหลวด้วย (Barbut, 1999) โดยในงานวิจัยของ Hu และคณะ (2016) พบว่า ในช่วงอุณหภูมิมีมอดูลัสสะสมของอิมัลชันเนื้อสัตว์ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากมันหมูแข็งเกิดการหลอมเหลว สำหรับมันไก่จะหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 13-33 องศาเซลเซียส (Sams, 2001) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยในส่วนนี้

อิมัลชันเนื้อสัตว์ซึ่งโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์มีความคงตัวมากกว่าจะพบยอดแหลมของแทนเจนต์สูญเสียที่อุณหภูมิสูงกว่าในช่วงแรกเริ่มต้นของการเสถียรภาพของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์เนื่องจากโปรตีนมีความสามารถในการละลาย (solubility) ที่ต่ำกว่า จึงมีความสามารถที่น้อยกว่าในการสร้างมวลที่หนืดมากขึ้นของอิมัลชันเนื้อสัตว์ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการเกิดเจล (Alvarez และคณะ, 2012) โดยในงานวิจัยของ Alvarez และคณะ (2012) พบปรากฏการณ์ดังกล่าวเมื่อนำมันคาโนลาหรือน้ำมันมะกอกผสมโปรตีนสกัดจากวอลนัททดแทนมันหมูแข็งในอิมัลชันเนื้อสัตว์ของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแฟรงค์เฟอเตอร์ แต่สำหรับอิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งนั้นจะพบยอดแหลมของแทนเจนต์สูญเสียในช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอิมัลชันไก่ยอสูตรอื่นซึ่งอาจเนื่องจากปริมาณโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่ถูกสกัดออกมาสูงกว่าสูตรอื่น

สำหรับการเพิ่มขึ้นของแทนเจนต์สูญเสียช่วงที่สองเป็นผลจากการคลายตัวของส่วนหาง (tail) ของโมเลกุลโปรตีนไมโอซิน ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิในช่วง 47-54 องศาเซลเซียส (Hu และคณะ, 2016; Zhuang และคณะ, 2016) โดยในอิมัลชันไก่ยอจะพบการเปลี่ยนแปลงนี้เหมือนกันในทุกสูตรและช่วงอุณหภูมิที่เกิดไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิทรานซิชันช่วงที่ 1 ของอิมัลชันไก่ยอสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งซึ่งมีค่าต่ำกว่าสูตรอื่นแสดงให้เห็นว่า อิมัลชันไก่ยอสูตรดังกล่าวมีความสามารถในการเกิดเจลในช่วงแรกมากกว่าสูตรอื่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสสะสมที่เกิดขึ้นเร็วกว่าอิมัลชันไก่ยอสูตรอื่น สำหรับอุณหภูมิทรานซิชันช่วงที่ 1 ของอิมัลชันไก่ยอสูตรควบคุมและสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวจะสอดคล้องกับอุณหภูมิปกติที่พบในอิมัลชันเนื้อสัตว์ซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิไม่เกิน 45-48 องศาเซลเซียส (Hu และคณะ, 2016)

สำหรับอุณหภูมิทรานซิชันช่วงที่ 2 หรืออุณหภูมิจุดเกิดเจลของอิมัลชันเนื้อสัตว์จะเห็นได้ว่า อิมัลชันไก่ยอทุกสูตรมีค่าอุณหภูมินี้มากกว่า 55 องศาเซลเซียส โดยถือว่าเป็นค่าอุณหภูมิตามปกติที่พบได้ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ (Sams, 2001)

#### 4.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอิมัลชันไก่อย

##### 4.4.1 การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัส

##### 4.4.1.1 อิมัลชันไก่อยหลังทำให้สุก

การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยหลังทำให้สุกด้วยวิธี texture profile analysis (TPA) สำหรับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้ผลดังตารางที่ 4.25 โดยจะเห็นได้ว่า อิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทุกสูตร ไม่ว่าจะใช้น้ำมันรำข้าวรูปแบบใดก็ตาม ทั้งน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง และอิมัลชันน้ำมันรำข้าวซึ่งใช้อิมัลซิไฟเออร์ต่างกัน 2 ชนิด (SPI และ SC กับ MTG) ต่างมีค่าความแข็งและแรงการเคี้ยวสูงกว่าอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) อย่างไรก็ตามแรงการเคี้ยวของอิมัลชันไก่อยทั้ง 3 สูตร ที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ ไม่ได้แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) นอกจากนี้จะเห็นว่า แม้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและน้ำมันรำข้าวที่เตรียมเป็นอิมัลชันจะส่งผลต่อความแข็งของอิมัลชันไก่อย ( $p \leq 0.05$ ) แต่กลับไม่มีผลต่อการยึดเกาะและต่อความยืดหยุ่น ( $p > 0.05$ ) ดังนั้น แรงการเคี้ยวของอิมัลชันไก่อยที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทุกสูตรที่สูงกว่าสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่จึงเกิดจากความแตกต่างของความแข็งของอิมัลชันไก่อยเพียงอย่างเดียว ไม่ได้มีผลจากการยึดเกาะและความยืดหยุ่น (เนื่องจากแรงการเคี้ยวเป็นผลรวมของความแข็ง การยึดเกาะ และความยืดหยุ่นของอาหาร)

ตารางที่ 4.25 ลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังทำให้สุก

ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	ความแข็ง (นิวตัน)	การยึดเกาะ (ร้อยละ) <sup>ns</sup>	ความยืดหยุ่น (ร้อยละ) <sup>ns</sup>	แรงการเคี้ยว (นิวตัน)
มันไก่	18.40 $\pm$ 1.99 <sup>a</sup>	73.83 $\pm$ 0.49	88.87 $\pm$ 1.55	12.00 $\pm$ 1.45 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	20.79 $\pm$ 1.65 <sup>b</sup>	73.53 $\pm$ 0.74	88.65 $\pm$ 2.55	13.57 $\pm$ 1.29 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	21.37 $\pm$ 0.67 <sup>b</sup>	72.95 $\pm$ 1.01	87.37 $\pm$ 1.81	13.61 $\pm$ 0.43 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	21.74 $\pm$ 0.42 <sup>b</sup>	73.07 $\pm$ 0.21	88.83 $\pm$ 1.40	14.10 $\pm$ 0.52 <sup>b</sup>

<sup>a,b</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

ผลการวิจัยส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า การทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวยังช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วทุกสูตรเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมซึ่งจะช่วยลดเซกการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสที่เกิดขึ้นเมื่อนำไปผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์ได้ รวมทั้งยังแสดงให้เห็นว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันระหว่างอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้ว 3 สูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่ เป็นผลจากรูปแบบของไขมันที่ใช้ทดแทนมันไก่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง กับอิมัลชันน้ำมันรำข้าว และเป็นผลจากชนิดของระบบรักษาความคงตัวอิมัลชันที่ใช้สำหรับเตรียมอิมัลชันน้ำมันรำข้าว (อิมัลซิไฟเออร์) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และเคซีนผสมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

ลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยหลังทำให้สุกที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่เป็นผลจากคุณลักษณะที่ต่างกันของเฟสไขมันแต่ละชนิดในอิมัลชันไก่อย และเป็นผลจากบทบาทที่ต่างกันของเฟสไขมันชนิดนั้นในเมทริกซ์โปรตีนในอิมัลชัน เนื่องจากองค์ประกอบอื่นในอิมัลชันแทบไม่มีความแตกต่างกัน (รวมถึงปริมาณโปรตีนในเนื้อไก่อย) ซึ่งปรากฏการณ์ลักษณะ นี้มีการรายงานไว้เช่นกันในงานวิจัยของ Herrero และคณะ (2012) ที่ทดแทนมันหมูแข็งด้วยอิมัลชันน้ำมันมะกอกในระบบอิมัลชันของไส้กรอกแพรงเฟอร์เตอร์หมู ทั้งนี้มีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ใช้น้ำมันพืชทดแทนไขมันสัตว์ เช่น คุณลักษณะของน้ำมันพืชที่ใช้ การกระจายตัวในเมทริกซ์โปรตีน (Hong และคณะ, 2004; Martin และคณะ, 2008) รวมทั้งงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า ชนิดไขมันที่แตกต่างกันและการให้ความร้อนที่แตกต่างกันมีผลให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์มีความแตกต่างกัน (Shao และคณะ, 2011)

ทั้งนี้ Youssef และ Barbut (2009 และ 2010) รายงานว่า ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ทดแทนไขมันสัตว์ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ด้วยน้ำมันคาโนลา (ที่ไม่ได้เตรียมเป็นอิมัลชันน้ำมันมาก่อน) มีขนาดของหยดน้ำมันที่เล็กกว่าและลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความแข็งที่มากกว่าเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้มันวัวซึ่งมีเม็ดไขมันที่ขนาดใหญ่ในโครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์ Youssef และ Barbut (2009) ได้อธิบายว่า ความแข็งที่มากกว่าเป็นผลจากจำนวนหยดน้ำมันขนาดเล็กที่มีมากเทียบกับปริมาตรของอิมัลชันที่จำกัดค่าหนึ่ง และ/หรือ เป็นผลจากพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ของหยดน้ำมัน (เมื่อจำนวนหยดมากขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวมากขึ้น) ที่ถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีน จึงเกิดอันตรกิริยาระหว่างหยดน้ำมันและเมทริกซ์โปรตีนมากขึ้น โครงสร้างเมทริกซ์จึงแข็งแรงขึ้น

นอกจากนี้ม้งานวิจัยจำนวนมากที่พบว่า ความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกแล้วเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อิมัลชันน้ำมันพืชหรือน้ำมันปลาทดแทนไขมันสัตว์ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ (Carmona และคณะ, 2011; Delgado-Pando และคณะ, 2010; Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b; Shao และคณะ, 2011; Youssef และ Barbut, 2011)

Muguruma และคณะ (2003) รายงานว่า โพลีเมอร์ชีวภาพที่เตรียมจากโปรตีน (โปรตีนถั่วเหลือง เคซีน และเวย์ โปรตีน) ผสมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ที่เติมลงไป ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ ช่วยปรับปรุงเนื้อสัตว์ของไส้กรอกได้ โดยทำให้ค่าความเค้นแตกหักของไส้กรอกเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันมีงานวิจัยที่รายงานว่า การเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในอิมัลชันประเภทน้ำมันในน้ำของน้ำมันมะกอก มีความเป็นไปได้ที่จะช่วยส่งเสริมอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีน ในอิมัลชันเนื้อสัตว์ได้และจะส่งผลให้เกิดการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ด้วย (Lee และคณะ, 2006; Herrero และคณะ, 2011a, 2011b)

#### 4.4.1.2 อิมัลชันไก่อยหลังฆ่าเชื้อ

ลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยทั้ง 4 สูตร หลังจากผ่านการฆ่าเชื้อ ระดับสเตอริไลซ์ที่ประเมินด้วยวิธี TPA ให้ผลเป็นส่วนใหญ่ไปในทางเดียวกันกับอิมัลชันไก่อยหลัง ทำให้สุก ดังตารางที่ 4.26 โดยจะเห็นได้ว่า อิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ยังคงมีความแข็งแรงการเคี้ยวต่ำกว่าอิมัลชันไก่อยสูตรอื่น ทั้งสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและอิมัลชันน้ำมันรำข้าว ( $p \leq 0.05$ ) เหมือนกับกรณีของอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้ว และยังคงไม่พบว่าอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้วแต่ละสูตรมีความยืดหยุ่นแตกต่างกัน ( $p > 0.05$ ) เช่นเดียวกับกรณีของอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้ว

อย่างไรก็ตามจะพบว่า อิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้วในสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC และ MTG มีความแข็งแรงมากกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง ( $p \leq 0.05$ ) โดยผลการวิจัยส่วนนี้จะแตกต่างจากที่พบในอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้ว ซึ่งความแข็งแรงของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC และ MTG ไม่แตกต่างจากอีก 2 สูตร ที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่เหมือนกัน

นอกจากนี้แม้ว่าค่าการยึดเกาะที่วัดได้จากอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วทุกสูตรจะไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อแล้วกลับพบว่า สูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC และ MTG มีการยึดเกาะต่ำกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง ( $p \leq 0.05$ ) อย่างไรก็ตามการยึดเกาะของอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ ยังคงใกล้เคียงกับสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร ( $p > 0.05$ ) ดังนั้นผลการวิจัยส่วนนี้จึงแสดงให้เห็นว่า แรงการเคี้ยวของอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อแล้วในสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG ที่มากกว่าเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไอนั้น เป็นผลมาจากความแข็งแรงที่มากกว่าเพียงอย่างเดียว ขณะที่ในสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งนั้น เป็นผลร่วมกันจากทั้งความแข็งแรงและการยึดเกาะที่มากกว่าสูตรควบคุม

ตารางที่ 4.26 ลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อ

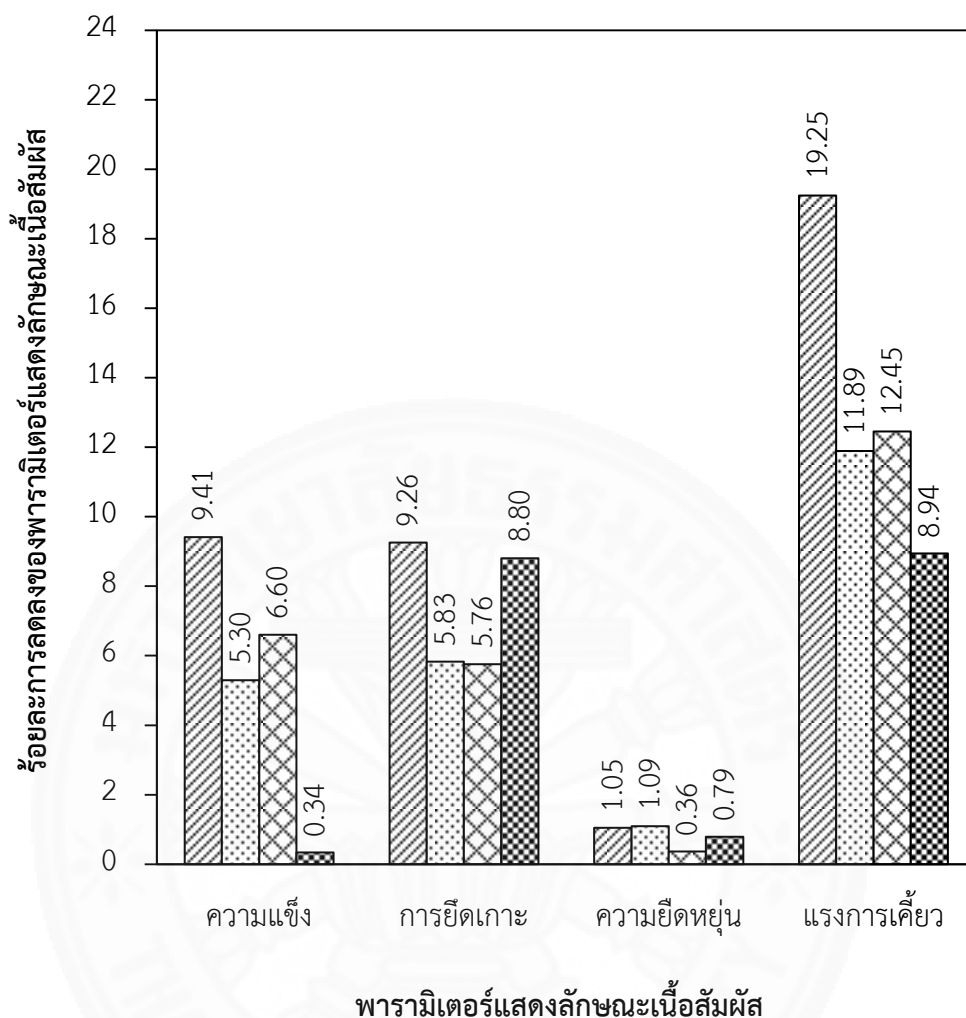
ชนิดของเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	ความแข็ง (นิวตัน)	การยึดเกาะ (ร้อยละ)	ความยืดหยุ่น (ร้อยละ) <sup>ns</sup>	แรงการเคี้ยว (นิวตัน)
มันไก่	16.67 $\pm$ 0.99 <sup>a</sup>	67.00 $\pm$ 0.61 <sup>ab</sup>	87.93 $\pm$ 0.81	9.69 $\pm$ 0.73 <sup>a</sup>
น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง	19.69 $\pm$ 1.30 <sup>b</sup>	69.25 $\pm$ 1.48 <sup>c</sup>	87.68 $\pm$ 1.88	11.95 $\pm$ 0.84 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI	19.96 $\pm$ 1.63 <sup>bc</sup>	68.75 $\pm$ 1.37 <sup>bc</sup>	87.05 $\pm$ 1.38	11.92 $\pm$ 1.26 <sup>b</sup>
อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC และ MTG	21.67 $\pm$ 0.33 <sup>c</sup>	66.63 $\pm$ 0.45 <sup>a</sup>	88.13 $\pm$ 2.05	12.84 $\pm$ 1.15 <sup>b</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

<sup>ns</sup> ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

เมื่ออิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วผ่านการให้ความร้อนระหว่างการฆ่าเชื้อ ระดับสเตอริไลซ์จะส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.28 โดยจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์แสดงลักษณะเนื้อสัมผัสแต่ละด้านเมื่อวัดด้วยวิธี TPA มีการลดลงในระดับที่ แตกต่างกันไป ความยืดหยุ่นจะลดลงน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.36-1.09) ขณะที่แรงการเคี้ยวจะลดลงมากที่สุด (ร้อยละ 8.94-19.25) ในภาพรวมจะพบว่า อิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่สูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัสระหว่างการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มากที่สุดเทียบกับอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าว ทดแทนมันไก่ทั้ง 3 สูตร ขณะที่อิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SC และ MTG มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสน้อยกว่าสูตรอื่น โดยเฉพาะความแข็งและแรงการเคี้ยว ส่วนค่าการ ยืดเกาะแม้จะลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SPI แต่การลดลงยังต่ำกว่าสูตรควบคุม

ทั้งนี้จะพบว่า แม้ความแข็งของอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อแล้วทั้ง 3 สูตร ที่ใช้ ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่จะลดลงจนเหลือความแข็งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 19.69-21.67 นิวตัน แต่ยังคงสูงกว่าความแข็งของอิมัลชันไก่อยหลังทำให้สุกแล้วในสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.40 นิวตัน เช่นเดียวกับแรงการเคี้ยวของอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อแล้วทั้ง 3 สูตร ซึ่งแม้ลดลงจนมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 11.92-12.84 นิวตัน แต่ยังคงใกล้เคียงกับแรงการเคี้ยวของอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วในสูตร ควบคุมที่ใช้มันไก่ที่มีเฉลี่ยค่าเท่ากับ 12.00 นิวตัน ผลการวิจัยส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า การทดแทนมันไก่ด้วย ไขมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ช่วยชดเชยการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสที่เกิดขึ้นจากผลของการฆ่าเชื้อ ระดับสเตอริไลซ์ได้



รูปที่ 4.28 ความแตกต่างของลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันโกโก้ที่ใช้เฟสไขมันแตกต่างกันหลังฆ่าเชื้อเทียบกับหลังทำให้สุก

- กำหนดให้
- ▨ หมายถึง อิมัลชันโกโก้ที่ใช้มันโกโก้
  - ▤ หมายถึง อิมัลชันโกโก้ที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง
  - ▣ หมายถึง อิมัลชันโกโก้ที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI
  - ▧ หมายถึง อิมัลชันโกโก้ที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนไปของอิมัลชันโกโก้หลังจากผ่านการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ มีความเป็นไปได้สูงว่าจะขึ้นกับระดับความเสียหายของเมทริกซ์โปรตีนของอิมัลชันเนื้อสัตว์จากความร้อนระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อที่แตกต่างกันไปในอิมัลชันโกโก้แต่ละสูตร ซึ่งเป็น

ผลสืบเนื่องโดยตรงจากชนิดของไขมันที่แทรกอยู่ในเมทริกซ์โปรตีนที่แตกต่างกัน กลไกในการรักษาความคงตัวของไขมันที่แตกต่างกัน และความแข็งแรงของเมทริกซ์โปรตีนเองที่แตกต่างกัน

ในภาพรวมจึงอาจกล่าวได้ว่า อิมัลชันไคโยในสูตรที่โครงสร้างเมทริกซ์โปรตีนมีความแข็งแรงมากกว่าจะได้รับผลกระทบจากการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์น้อยกว่า และเมื่อเมทริกซ์โปรตีนเสียหายน้อยกว่าจึงส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่แสดงออกผ่านทางพารามิเตอร์ต่างๆ ในระหว่างการวัดด้วยวิธี TPA มีการลดลงที่น้อยกว่าตามไปด้วย โดยเฉพาะความแข็งแรงและการเคี้ยวที่น่าจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงของโครงสร้างอิมัลชันไคโย

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสที่ต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ไขมันไก่ซึ่งพบในอิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้ไขมันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร จึงคาดว่าน่าจะมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำให้เกิดอิมัลชันซ้ำ (ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสสร้างขึ้นจากโปรตีนที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์ ได้แก่ โปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือเคซีน) และการกระจายของหยดน้ำมันที่ตีขึ้น ที่ไปส่งผลให้เมทริกซ์โปรตีนแข็งแรงขึ้นเมื่อเทียบกับอิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ไขมันไก่ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเนื่องไปถึงลักษณะเนื้อสัมผัสที่วัดได้ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

นอกจากนี้ คุณลักษณะเฉพาะตัวของโครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่หยดของอิมัลชันน้ำมันมีการฝังตัวแทรกอยู่ในเมทริกซ์โปรตีน (กลไกการกักทางกายภาพ) (Barbut, 1999; Herrero et al., 2012) อาจส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงที่มากขึ้นของเมทริกซ์โปรตีนด้วยเช่นกัน ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสหลังฆ่าเชื้อของอิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้ไขมันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร

สำหรับกิจกรรมที่เกิดขึ้นโดยเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเมื่อมีซัปสเตอร์ที่เหมาะสม (เคซีนในอิมัลชันน้ำมัน) น่าจะมีผลอย่างมากต่อการทำให้โครงสร้างอิมัลชันเนื้อสัตว์มีความแข็งแรงและทนต่อความร้อนระหว่างการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้อิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้ไขมันน้ำมันรำข้าวผสม SC และ MTG มีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสในภาพรวมต่ำกว่าสูตรควบคุมและสูตรอื่นที่ใช้น้ำมันรำข้าว

สำหรับอิมัลชันไคโยสูตรที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง ขนาดของหยดน้ำมันที่เล็กกว่าและการกระจายของหยดน้ำมันที่ดีกว่าเมื่อเทียบเม็ดไขมันจากมันไก่ มีผลให้เมทริกซ์โปรตีนแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเทียบกับอิมัลชันไคโยสูตรควบคุมที่ไขมันไก่

#### 4.4.2 การประเมินโครงสร้างระดับจุลภาค

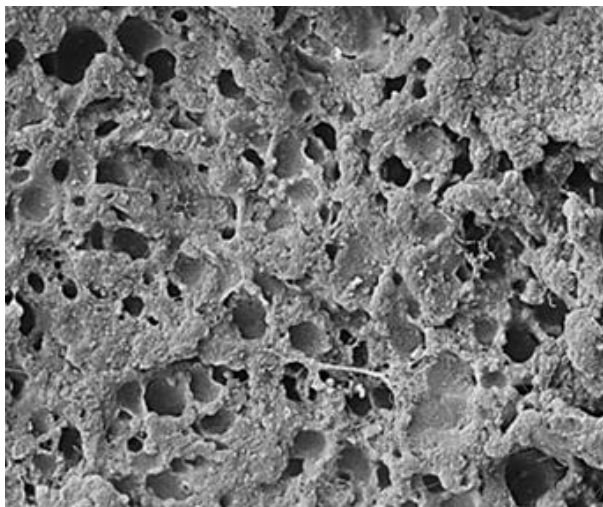
##### 4.4.2.1 อิมัลชันไคโยหลังทำให้สุก

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอิมัลชันไคโยที่ทำให้สุกแล้วสำหรับสูตรควบคุมที่ไขมันไก่ และสูตรที่ทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวต่างกัน 3 รูปแบบ ที่ประเมินด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.29-4.32

เมื่อพิจารณาโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วในสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ (รูปที่ 4.29) จะเห็นว่า มีลักษณะเป็นฟองน้ำซึ่งเป็นลักษณะทางสัณฐานวิทยาตามปกติของระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกด้วยความร้อนมาแล้ว (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b; Delgado-Pando และคณะ, 2011) เมื่อเทียบกับอิมัลชันไก่อยสูตรอื่นๆ ที่ใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่พบว่า โครงสร้างของอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ มีจำนวนรูพรุนหรือจำนวนช่องว่างในโครงสร้างน้อยที่สุด แต่รูมีขนาดใหญ่ที่สุด

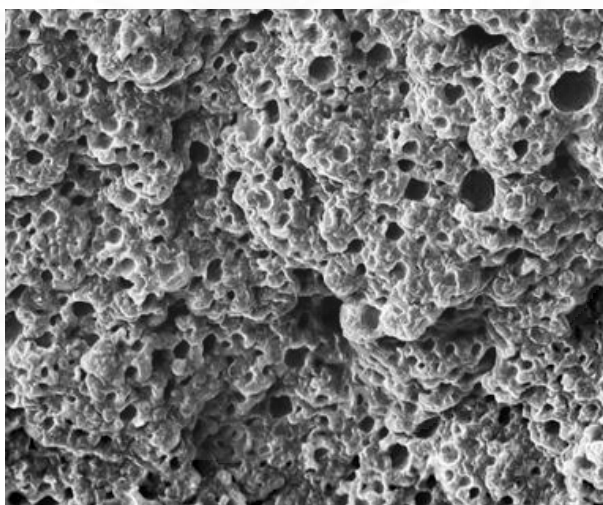
ในทางกลับกัน อิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งทดแทนมันไก่ (รูปที่ 4.30) มีโครงสร้างระดับจุลภาคที่แสดงลักษณะเป็นฟองน้ำมากที่สุดเมื่อเทียบกับอิมัลชันไก่อยสูตรอื่น โดยจะพบรูพรุนจำนวนมากที่กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงตลอดทั้งโครงสร้าง และรูมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่

สำหรับโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง 2 สูตร พบว่า มีลักษณะเป็นฟองน้ำน้อยกว่าสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง และมีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โดยเมื่อใช้อิมัลชันน้ำมันที่ผสม SPI (รูปที่ 4.31) พบว่า มีจำนวนรูพรุนที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างของอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และรูมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นทั้งหมด ขณะที่ในอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวเช่นกันแต่ผสม SC กับ MTG (รูปที่ 4.32) จะเห็นได้ว่า โครงสร้างระดับจุลภาคมีลักษณะแน่นกว่า มีลักษณะเป็นฟองน้ำน้อยกว่า และมีจำนวนรูพรุนน้อยกว่า เมื่อเทียบกับโครงสร้างของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวผสม SPI



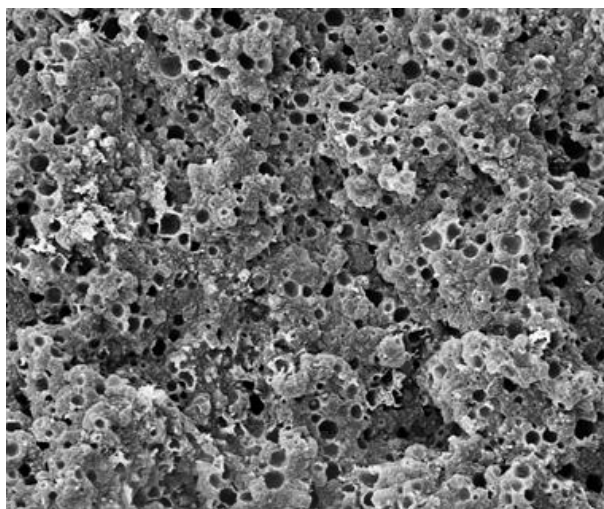
10 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.29 ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้มันไก่เป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



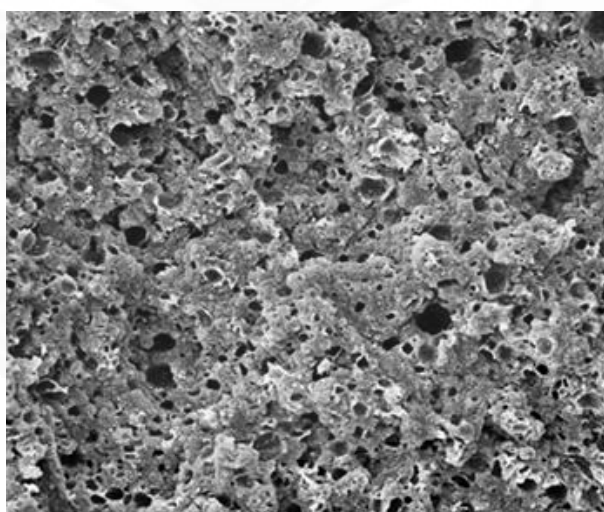
10 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.30 ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแะเยือกแข็งเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



10 ไมโครเมตร

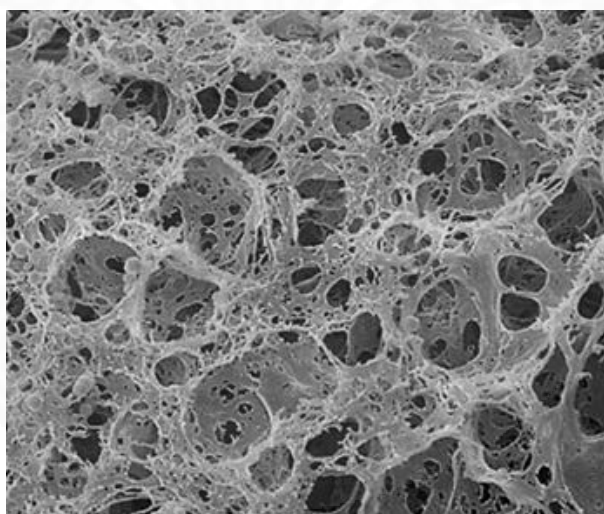
**รูปที่ 4.31** ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้อิ้มัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



10 ไมโครเมตร

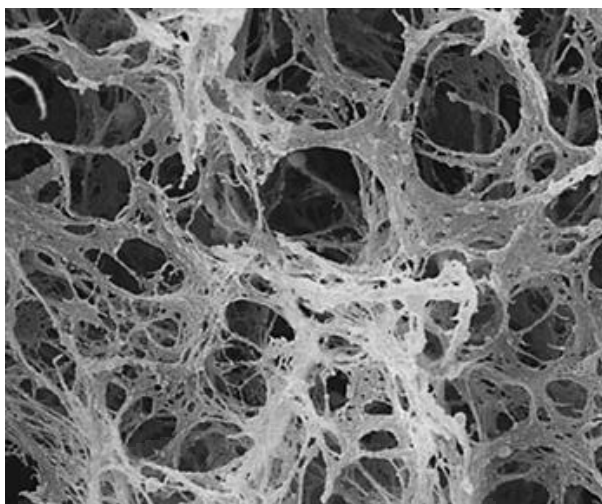
**รูปที่ 4.32** ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้อิ้มัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับเอนไซม์ทรานส์-กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เมื่อพิจารณาภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วสำหรับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวที่ต่างกัน 3 รูปแบบ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายเพิ่มสูงขึ้นเป็น 5,000 เท่า ดังรูปที่ 4.33-4.36 จะเห็นว่า สามารถมองเห็นเมทริกซ์โปรตีนหรือโครงร่างตาข่ายของโปรตีนเนื้อสัตว์ในระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกแล้วด้วยความร้อนได้ โดยจะพบว่า อิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ (รูปที่ 4.33) มีโครงสร้างลักษณะละเอียด มีโครงร่างตาข่ายคล้ายเส้นใย (fiber-like) และคล้ายแผ่นแบน (sheet-like) ผสมกัน ขณะที่อิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแซ่เยือกแข็ง (รูปที่ 4.34) มีโครงสร้างที่หยาบกว่า และส่วนใหญ่เป็นโครงร่างตาข่ายคล้ายเส้นใยที่เป็นเส้นหนา ในทางกลับกันอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI (รูปที่ 4.35) มีโครงร่างตาข่ายคล้ายแผ่นแบนที่มีความหนามากกว่าสูตรอื่น สำหรับอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG (รูปที่ 4.36) จะสังเกตได้ว่า มีโครงสร้างที่แตกต่างจากอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วสูตรอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยโครงสร้างมีลักษณะละเอียดมากที่สุดประกอบด้วยโครงร่างตาข่ายคล้ายเส้นใยที่เป็นเส้นบางกระจายทั่วไป



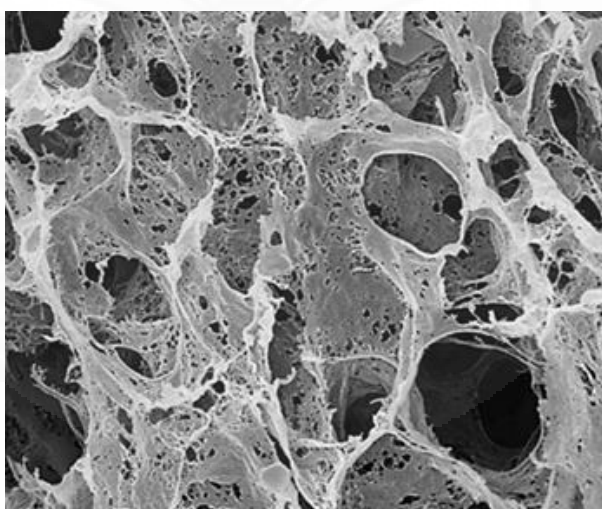
5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.33** ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันไก่เป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



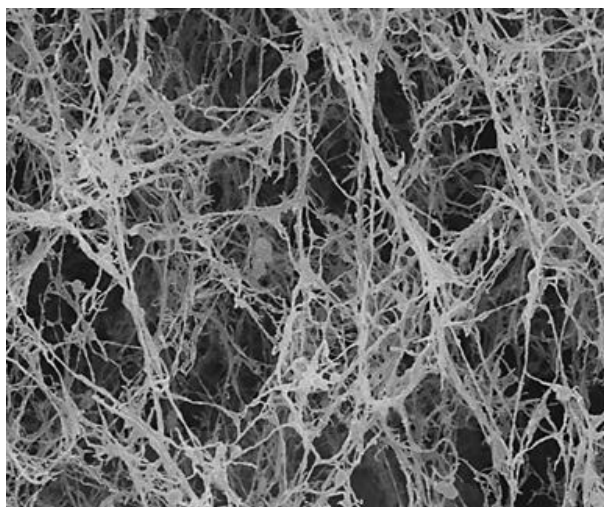
5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.34** ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.35** ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้อิ้มัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.36** ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับเอนไซม์ทรานส์-กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยหลังทำให้สุกในสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า เป็นลักษณะที่เฉพาะตัวของอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ทำให้สุกด้วยความร้อน เรียกว่า โครงสร้างคล้ายรวงผึ้ง ลักษณะปรากฏเป็นฟองน้ำ ดังที่รายงานไว้โดย Carballo และคณะ (1996) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังกล่าวเป็นผลจากการรวมกลุ่มกันของเมทริกซ์โปรตีนที่สูญเสียความต่อเนื่องและแสดงให้เห็นเป็นโครงสร้างที่แน่นขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ (Jimenez-Colmenero และคณะ, 2010b) รูปพรุนในโครงสร้างนี้อาจเกิดจากการขยายตัวของส่วนประกอบในอิมัลชันเนื้อสัตว์เอง ได้แก่ ไขมัน น้ำ และอากาศ ที่ได้รับความร้อนระหว่างทำให้สุก (Delgado-Pando และคณะ, 2011) ซึ่งเมื่อใช้กำลังขยาย 5,000 เท่าจะทำให้มองเห็นลักษณะปรากฏที่เป็นฟองน้ำชัดเจนยิ่งขึ้น

โครงสร้างที่มีลักษณะปรากฏที่เป็นฟองน้ำอย่างชัดเจนมากของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้รำข้าวแช่เยือกแข็งเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมอาจเป็นผลจากการกระจายตัวที่ดีของหยดน้ำมันขนาดเล็กจำนวนมากในอิมัลชันเนื้อสัตว์เมื่อเทียบกับเม็ดไขมันขนาดใหญ่ที่มีจำนวนน้อยกว่าในอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมดังที่กล่าวถึงไปแล้วในการศึกษาข้อ 4.2 ซึ่งที่กำลังขยาย 5,000 เท่าจะยิ่งสังเกตเห็นชัดว่า โครงสร้างมีลักษณะแน่นน้อยกว่าแต่มีความแข็งแรงของโครงร่างตาข่ายมากกว่า (เมทริกซ์โปรตีนของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้รำข้าวแช่เยือกแข็งมีลักษณะเป็นเส้นใยที่มีความหนาแน่นกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่)

ขณะที่โครงสร้างระดับจุลภาคที่มีลักษณะแน่นกว่าและมีลักษณะปรากฏเป็นฟองน้ำน้อยกว่าที่พบในอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร สังเกตได้จากภาพทั้งที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า อาจเป็นผลจากอันตรกิริยาที่จำกัดระหว่างน้ำมันรำข้าว (ที่อยู่ในรูปของอิมัลชันน้ำมัน) กับเมทริกซ์โปรตีน

ปรากฏการณ์นี้เริ่มต้นขึ้นในระหว่างขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันน้ำมันรำข้าว ซึ่งโมเลกุลของโปรตีนที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์ ในกรณีนี้หมายถึง โปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือเคซีน ได้แพร่เข้าไปยังรอยต่อระหว่างเฟสของหยดน้ำมันและน้ำ จุดจับที่ผิวของหยดน้ำมัน เกิดเป็นฟิล์มที่ปกคลุมต่อเนื่องกันซึ่งมีความทนทานต่อแรงกระทำจากภายนอก (ฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟส) และทำให้หยดน้ำมันเกิดความคงตัวได้ (Das และ Kinsella, 1990) กระบวนการเกิดฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและเคซีนนี้ จะส่งผลต่อเนื่องในการจำกัดบทบาทของหยดน้ำมันรำข้าวที่จะเข้าไปมีส่วนร่วมในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไขมันกับโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ ซึ่งเกิดขึ้นในระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ตามปกติที่ไม่ได้ใช้อิมัลชันน้ำมันเป็นเฟสไขมัน ดังนั้นหยดน้ำมันจึงมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และทำให้หยดน้ำมันขนาดเล็กนี้ฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์โปรตีนของระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ โดยเกิดขึ้นระหว่างการผลิตอิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SPI หรืออิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสม SC กับ MTG เข้าไปในแบทเทอร์ไคยอในขั้นตอนการสับผสม ปรากฏการณ์ที่เหมือนกันนี้มีการรายงานไว้ในงานวิจัยของ Herrero และคณะ (2012) ซึ่งใช้อิมัลชันน้ำมันมะกอกที่มีส่วนผสมของโปรตีนที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์ทดแทนมันหมูแข็งในการผลิตไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์หมู

ทั้งนี้ปรากฏการณ์นี้ชี้ให้เห็นว่า กลไกการกักทางกายภาพซึ่งนำเสนอโดย Barbut (1999) และอธิบายไว้ว่า เม็ดไขมันจะฝังตัวโดยตรงในเจลของเมทริกซ์โปรตีน จะเป็นกลไกสำคัญในการทำให้หยดของอิมัลชันน้ำมันรำข้าวในระบบอิมัลชันไคยอมีความคงตัว ทั้งในอิมัลชันไคยอที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI และที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG

ในทางกลับกัน สำหรับอิมัลชันไคยอสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่และสูตรที่ใช้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งทดแทนมันไก่ อาจมีอันตรกิริยาระหว่างไขมันกับโปรตีนมากกว่าสูตรที่ใช้ อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 สูตร เพราะมีการสร้างฟิล์มโปรตีนระหว่างเฟสห่อหุ้มเม็ดไขมันหรือหยดน้ำมันโดยเป็นฟิล์มที่สร้างจากโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในเนื้อไก่

โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI ที่มีลักษณะแน่นกว่า เมื่อเทียบกับอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG น่าจะเกิดจากผลของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสที่ทำให้โครงสร้างของอิมัลชันเนื้อสัตว์มีความแข็งแรงมากขึ้น ด้วยการสร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาของ Delgado-Pando และคณะ (2010) และ Jimenez-Colmenero และคณะ (2010b) ได้แสดงให้เห็นเช่นเดียวกันว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างระดับจุลภาคของ

ใส่กรอกอิมัลชันที่ใช้เนื้อหมูและมีอิมัลชันน้ำมันพืชผสมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันนั้น จะมีความพรุนมากขึ้นกว่าสูตรปกติที่ใช้มันหมูแข็ง เนื่องจากขนาดของหยดน้ำมันในอิมัลชันเนื้อสัตว์ที่ เล็กกลง ทำให้เฟสไขมันมีพื้นที่ผิวมากขึ้น เมทริกซ์โปรตีนหนาแน่นและแข็งแรงขึ้น จนส่งผลให้ใส่กรอก มีเนื้อสัมผัสที่แน่นขึ้นด้วย

โครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยที่ทำให้สุกแล้วในแต่ละสูตร มีความสอดคล้องกับลักษณะเนื้อสัมผัสที่ประเมินด้วยวิธี TPA ในด้านความแข็งและแรงการเคี้ยว จาก การศึกษาในข้อ 4.4.1.1 โดยอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวทดแทนมันไก่จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง มากขึ้นเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนกับ เอนไซม์ MTG มีโครงสร้างที่แข็งแรงมากที่สุด ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ลักษณะปรากฏของเมทริกซ์โปรตีน ที่มองเห็นได้ด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีความแน่นมากกว่ารวมทั้งมี ความหนาของโครงสร้างทั้งแบบเส้นใยและแบบแผ่นแบนที่มากกว่าจะทำให้อิมัลชันไก่อยมีเนื้อสัมผัส ที่แข็งและต้องการแรงการเคี้ยวสูงขึ้น โดยเฉพาะเมทริกซ์โปรตีนที่เป็นเส้นใยที่สานกันอย่างหนาแน่น โดยผลการวิจัยส่วนนี้สอดคล้องกับงานวิจัย Carballo และคณะ (1996) และ Jimenez-Colmenero และคณะ (2010b) ที่รายงานไว้ว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์มีความสัมพันธ์ กับสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์นั้น

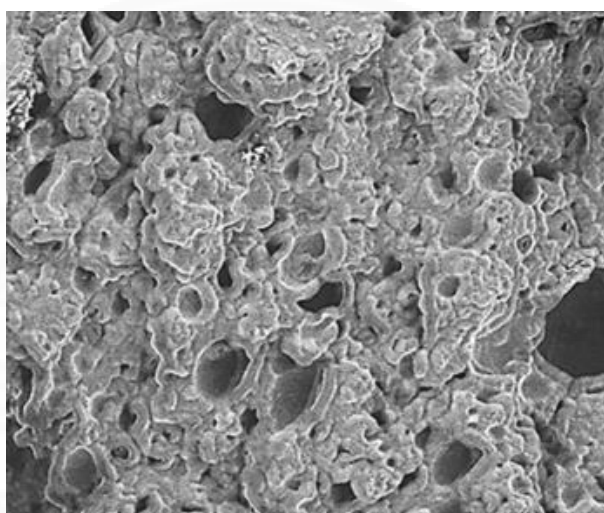
#### 4.4.2.2 อิมัลชันไก่อยหลังฆ่าเชื้อ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้ว สำหรับสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ และสูตรที่ทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวต่างกัน 3 รูปแบบ ซึ่งประเมิน ด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.37- 4.40

ภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ (รูป ที่ 4.37) ชี้ให้เห็นว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างอิมัลชันไก่อยได้รับผลกระทบจากการ ฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์อย่างชัดเจน รูพรุนในโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้น โครงสร้างสูญเสียความแน่น และมีลักษณะผิดรูปไปจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด แต่ยังพอที่จะสังเกตเห็นลักษณะเป็นฟองน้ำอยู่บ้าง สำหรับอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง (รูปที่ 4.38) พบว่า โครงสร้างระดับจุลภาค สูญเสียลักษณะคล้ายฟองน้ำไปอย่างมาก รูพรุนจำนวนมากที่กระจายอยู่ทั่วไปและเคยสังเกตเห็นได้ ชัดเจนในโครงสร้างอิมัลชันหลังทำให้สุกก่อนจะฆ่าเชื่อนั้นแทบมองไม่เห็นอีก และโครงสร้างมีลักษณะ อัดแน่นมากกว่าเดิม

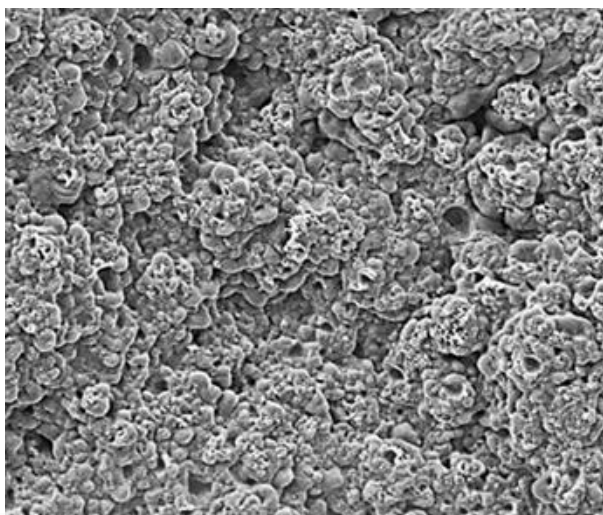
แม้ว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อแล้วในสูตร ควบคุมที่ใช้มันไก่และในสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ชัด เมื่อ เทียบกับโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันหลังทำให้สุก แต่สำหรับอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมัน

น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ทั้ง 2 สูตร กลับพบการเปลี่ยนแปลงที่เป็นผลสืบเนื่องจากการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์น้อยกว่ามากโดยพบว่า อิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI (รูปที่ 4.39) มีการสูญเสียลักษณะโครงสร้างคล้ายฟองน้ำไปบางส่วน และขนาดของรูในโครงสร้างใหญ่กว่าเดิมเล็กน้อย สำหรับอิมัลชันไคยอสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG (รูปที่ 4.40) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างระดับจุลภาคน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับอิมัลชันไคยอสูตรอื่น โดยโครงสร้างในภาพรวมแทบไม่แตกต่างจากเดิม คงมีเพียงขนาดของรูในโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



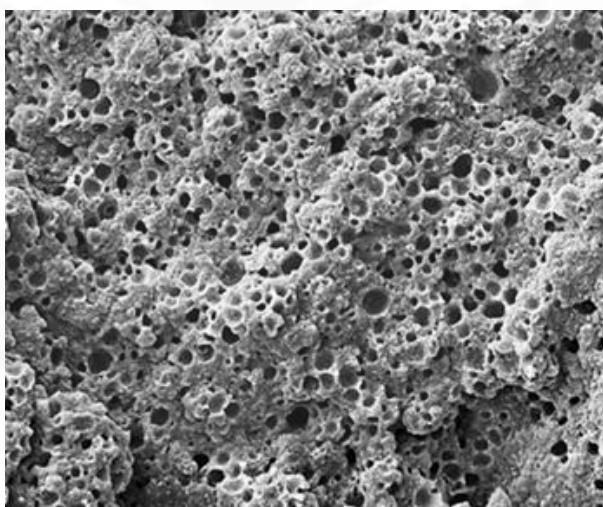
10 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.37** ภาพอิมัลชันไคยอที่ใช้มันไก่เป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



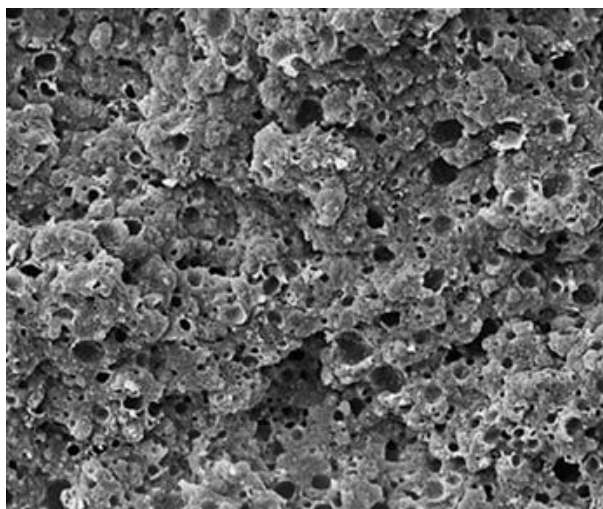
10 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.38** ภาพอิมัลชันไคโยยที่ใช้ไขมันรำข้าวแะเยือกแข็งเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



10 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.39** ภาพอิมัลชันไคโยยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



10 ไมโครเมตร

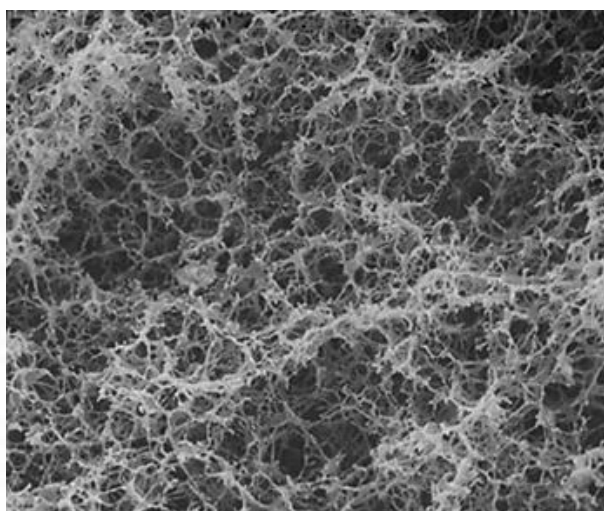
**รูปที่ 4.40** ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับเอนไซม์ทรานส์-กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 1,000 เท่า

เมื่อพิจารณาภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ กำลังขยาย 5,000 เท่า ของโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อแล้ว สำหรับสูตรควบคุม ที่ใช้มันไก่และสูตรที่ทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 4.41-4.44 จะ พบว่า โครงร่างตาข่ายของอิมัลชันไก่อยทุกสูตรจะเปลี่ยนแปลงไปอยู่บ้างจากผลของการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์ แต่โครงร่างตาข่ายนี้ยังคงมีอยู่ ไม่ได้สูญเสียอย่างสิ้นเชิงทั้งหมดแม้จะได้รับความร้อนสูงเป็นระยะเวลาานานก็ตาม ดังนั้นสมบัติของระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์ เช่น ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความแข็งแรงของโครงสร้างเจล จึงยังคงอยู่ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิจัยในหัวข้อ 4.2

ในอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุมที่ใช้มันไก่ (รูปที่ 4.41) จะเห็นได้ว่า มีการสูญเสียโครงร่างตาข่ายที่คล้ายแผ่นแบนไปจนหมด และโครงร่างตาข่ายที่คล้ายเส้นใยได้ถูกทำลายลง ไปค่อนข้างมาก สำหรับโครงสร้างของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง (รูปที่ 4.42) พบว่า โครงร่างตาข่ายคล้ายแผ่นแบนได้ถูกทำลายไปจนหมดเช่นเดียวกับอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุม ขณะที่โครงร่างตาข่ายคล้ายเส้นใยยังคงอยู่เช่นเดิม และแม้จะมีความหนาของเส้นใยที่น้อยลงกว่าเดิม แต่ก็ยังหนากว่าเมื่อเทียบกับโครงร่างตาข่ายที่เหลืออยู่ในอิมัลชันไก่อยสูตรควบคุม

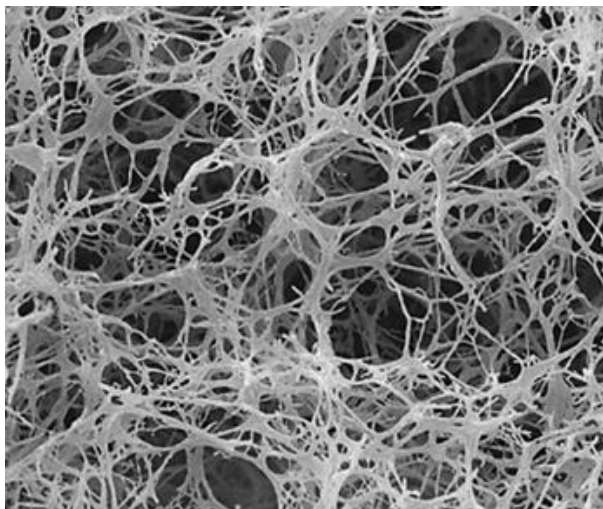
สำหรับโครงสร้างของอิมัลชันไก่อยสูตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SPI (รูปที่ 4.43) จะสังเกตได้อย่างเด่นชัดว่า ได้รับความเสียหายจากการฆ่าเชื้อ โดยโครงร่างตาข่ายที่ คล้ายแผ่นแบนเกิดการฉีกขาดออกจนกลายเป็นโครงร่างตาข่ายที่คล้ายเส้นใยไปแทน แต่อย่างไรก็ดี

โครงสร้างในภาพรวมก็ยังคงมีความแน่นกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างของอิมัลชันไคยอสุตรที่ใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง ส่วนในอิมัลชันไคยอสุตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG (รูปที่ 4.44) โครงร่างตาข่ายคล้ายเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้างแต่ยังคงมีลักษณะที่เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องตลอดโครงสร้าง แม้เส้นใยจะมีความหนาน้อยกว่าเดิม นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า โครงสร้างเมทริกซ์โปรตีนในอิมัลชันไคยอสุตรที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสม SC กับ MTG มีลักษณะอัดแน่นที่สุด เมื่อเทียบกับโครงสร้างอิมัลชันไคยอที่สเตอริไลซ์แล้วสูตรอื่น



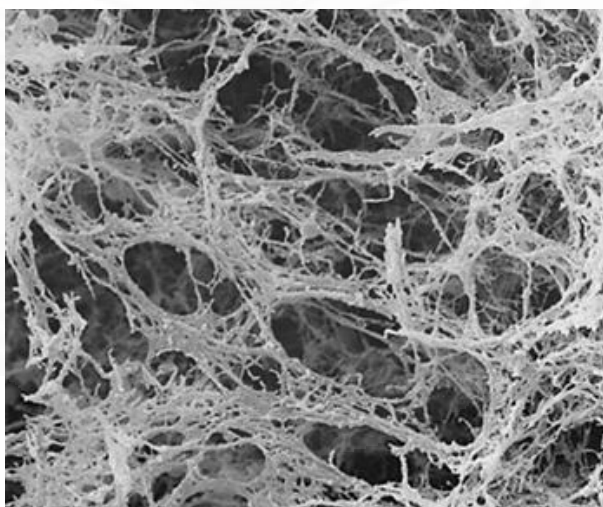
5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.41** ภาพอิมัลชันไคยอที่ใช้ไขมันไก่เป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



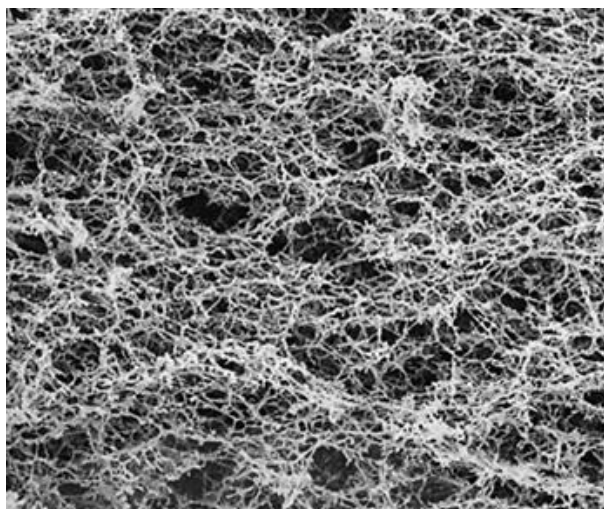
5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.42** ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.43** ภาพอิ้มัลชันไคยอที่ใช้อิ้มัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



5 ไมโครเมตร

**รูปที่ 4.44** ภาพอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวที่ผสมโปรตีนเคซีนกับเอนไซม์ทรานส์-กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันหลังฆ่าเชื้อจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 5,000 เท่า

โครงสร้างระดับจุลภาคที่เปลี่ยนไปของอิมัลชันไก่อยหลังจากผ่านการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ สามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัส และผลการวิจัยมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาในข้อ 4.4.1.2 โดยระดับความเสียหายจากความร้อนของโครงสร้างอิมัลชันไก่อยแต่ละสูตรเป็นผลจากชนิดของไขมันที่แทรกอยู่ในเมทริกซ์ กลไกในการรักษาความคงตัวของไขมัน และความแข็งแรงของเมทริกซ์โปรตีน

งานวิจัยของ Carballo และคณะ (1996) และ Jimenez-Colmenero และคณะ (2010b) กล่าวว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอิมัลชันเนื้อสัตว์จะสัมพันธ์กับสมบัติด้านเนื้อสัมผัส ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของอิมัลชันไก่อยที่ฆ่าเชื้อแล้วจึงสัมพันธ์และมีทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างระดับจุลภาค

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

##### 5.1.1 ศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อของระบบอิมัลชันไก่อย

กรรมวิธีการผลิตที่กำหนดสำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ของอิมัลชันไก่อยในรีโอร์ทเพาซ์ที่อุณหภูมิฆ่าเชื้อ 122 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทั้งกระบวนการ 50 นาที ช่วงเวลาก่อนอุณหภูมิฆ่าเชื้อ 13 นาที ช่วงเวลาฆ่าเชื้อ 14 นาที ช่วงเวลาทำให้เย็น 23 นาที โดยให้ค่า  $F_0$  อยู่ในช่วง 12-15 นาที การใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรืออิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส เป็นเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อยทดแทนมันโกไม่ส่งผลให้ต้องปรับกรรมวิธีที่กำหนดสำหรับการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ โดยยังให้ค่า  $F_0$  ไม่ต่ำกว่า 12 นาที นอกจากนั้นคุณภาพทางจุลินทรีย์ยังเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดในกฎหมาย

##### 5.1.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของระบบอิมัลชันไก่อย

การใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัด หรือการใช้เคซีนร่วมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ส่งผลให้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวมีความคงตัวในระดับสูง นอกจากนั้นอิมัลชันไก่อยมีความคงตัวสูงขึ้นเมื่อทดแทนมันโกด้วยไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

อิมัลชันไก่อยมีการสูญเสียน้ำหนักหลังทำให้สุกต่ำลงเมื่อทดแทนมันโกด้วยไขมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ สำหรับการสูญเสียน้ำหนักหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทดแทนมันโกด้วยไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อทดแทนด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส อย่างไรก็ตาม การสูญเสียน้ำหนักจากการทำให้สุกและฆ่าเชื้อรวมกันเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อทดแทนมันโกด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 ชนิด และปริมาณความชื้นยังคงสูงกว่าอิมัลชันไก่อยที่ใช้มันโกอยู่แม้จะมีการเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อทดแทนไขมันที่ลดลงก็ตาม ทั้งนี้การใช้ไขมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ เป็นเฟสไขมันส่งผลให้อิมัลชันไก่อยสูญเสียไขมันระหว่างทำให้สุกในระดับต่ำมาก โดยหลังการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์การสูญเสียไขมันจะสูงขึ้นแต่ยังอยู่ในระดับต่ำและการใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้อิมัลชันไก่อยการสูญเสียไขมันต่ำกว่าการใช้ไขมันรำข้าวแช่เยือกแข็ง

การทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งส่งผลให้อิมัลชันไก่อย่ทั้งที่ทำให้สุกแล้วและฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์แล้วมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น ขณะที่การทดแทนด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสไม่ส่งผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำทั้งในอิมัลชันไก่อย่ทั้งที่ทำให้สุกแล้วและฆ่าเชื้อแล้วแม้มีการเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อทดแทนไขมันที่ลดลง นอกจากนี้ น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งและอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสช่วยรักษาความสามารถในการอุ้มน้ำของอิมัลชันไก่อย่ที่ลดลงจากการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ได้มากกว่าเฟสไขมันรูปแบบอื่น

อิมัลชันไก่อย่หลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์มีความแข็งแรงของโครงสร้างเจลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ โดยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสช่วยให้อิมัลชันไก่อย่รักษาความแข็งแรงของโครงสร้างหลังการฆ่าเชื้อได้สูงที่สุด

การใช้น้ำมันรำข้าว 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ส่งผลให้อิมัลชันไก่อย่หลังทำให้สุกและหลังฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ทั้งที่ผิวภายนอกและเนื้อภายในมีค่าความสว่างสูงขึ้น ดัชนีความเป็นสีขาวสูงขึ้น และค่าความเป็นสีเหลืองต่ำลง โดยน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งส่งผลให้อิมัลชันไก่อย่มีสีเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด การทดแทนมันไก่ด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสยังช่วยให้อิมัลชันไก่อย่หลังทำให้สุกมีความสม่ำเสมอของสีระหว่างภายในและภายนอกมากขึ้น ส่วนหลังจากฆ่าเชื้อแล้วการใช้น้ำมันรำข้าวทดแทนมันไก่ไม่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของสี การฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ส่งผลให้อิมัลชันไก่อย่มีสีภายนอกและภายในที่คล้ำขึ้น เฟสไขมันที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีภายนอกแต่มีผลต่อสีภายใน โดยการใช้น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของสีภายในที่เกิดจากการฆ่าเชื้อได้

### 5.1.3 ศึกษาสมบัติทางวิทยากระแสของระบบอิมัลชันไก่อย่

อิมัลชันไก่อย่ที่ยังไม่ได้ทำให้สุกทั้งที่ใช้มันไก่เป็นเฟสไขมันและที่ใช้น้ำมันรำข้าวแบบแช่เยือกแข็งและแบบอิมัลชันน้ำมัน แสดงสมบัติเป็นวัสดุประเภทเจลที่ไม่แข็งแรง มีพฤติกรรมหยุ่นหนืด มีความคล้ายของแข็งมากกว่าของเหลว โดยการทดแทนมันไก่ด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้อิมัลชันไก่อย่ที่ยังไม่ได้ทำให้สุกมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น มีความคงตัวสูงขึ้น ขณะที่การทดแทนด้วยน้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งหรืออิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดไม่ส่งผลต่อความคงตัวก่อนทำให้สุกของอิมัลชันไก่อย่

อิมัลชันไก่อย่ที่ใช้มันไก่และที่ใช้น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ แสดงพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากขึ้นระหว่างการให้ความร้อนเพื่อทำให้สุกและระหว่างการทำให้เย็นหลังจากทำให้สุกแล้ว การทดแทนมันไก่ด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดหรือผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจล แต่อิมัลชันไก่อย่จะเริ่มเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำลง

เมื่อใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งเป็นเฟสไขมัน ขณะที่อุณหภูมิจุดเกิดเจลของอิมัลชันไก่อยที่ไขมันไก่หรือน้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ยังคงมีค่าตามปกติสำหรับอิมัลชันเนื้อสัตว์ทั่วไป มอดูลัสสะสมที่แสดงความคล้ายของแข็งของอิมัลชันไก่อยที่ใช้น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ เป็นเฟสไขมันหลังทำให้สุกและทำให้เย็นแล้วสูงกว่าอิมัลชันไก่อยที่ไขมันไก่ การทดแทนมันไก่ด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสทำให้เมทริกซ์โปรตีนในอิมัลชันไก่อยมีความแน่นและความแข็งแรงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันรำข้าวอีก 2 รูปแบบ ซึ่งจะมีส่วนสำคัญต่อความทนทานต่อความร้อนในระหว่างการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ได้

#### 5.1.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของระบบอิมัลชันไก่อย

การทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวทั้งแบบแช่เยือกแข็งและอิมัลชันน้ำมันส่งผลให้อิมัลชันไก่อยทั้งที่ทำให้สุกแล้วและที่ฆ่าเชื้อในระดับสเตอริไลซ์แล้ว มีความแข็งและแรงการเคี้ยวสูงกว่าอิมัลชันไก่อยที่ไขมันไก่เป็นเฟสไขมัน กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์จะมีผลกระทบเชิงลบต่อลักษณะเนื้อสัมผัสด้านต่างๆ ของอิมัลชันไก่อยที่ใช้เฟสไขมันในระดับแตกต่างกัน โดยอิมัลชันไก่อยที่ใช้อิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นเฟสไขมันมีร้อยละการลดลงของความแข็งและแรงการเคี้ยวต่ำที่สุด

การทดแทนมันไก่ด้วยน้ำมันรำข้าวรูปแบบแตกต่างกันส่งผลกระทบต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของอิมัลชันไก่อยทั้งที่ทำให้สุกแล้วและที่ฆ่าเชื้อในระดับสเตอริไลซ์แล้ว การฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์ส่งผลให้เมทริกซ์โปรตีนในโครงสร้างอิมัลชันไก่อยมีลักษณะผิดรูปไปจากเดิมรวมทั้งทำลายเมทริกซ์โปรตีน โดยมีระดับที่แตกต่างกันขึ้นกับเฟสไขมันในอิมัลชันไก่อย การทดแทนมันไก่ในอิมัลชันไก่อยด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสส่งผลให้เกิดเมทริกซ์โปรตีนในโครงสร้างอิมัลชันไก่อยมากขึ้น ซึ่งจะมีความเสียหายหลังจากการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์ต่ำกว่าเฟสไขมันรูปแบบอื่น

#### 5.1.5 บทสรุปในภาพรวม

การทดแทนมันไก่ในอิมัลชันไก่อยด้วยน้ำมันรำข้าว 3 รูปแบบ มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นสูตรในการผลิตไก่อยแบบปรุงสุก สำหรับการทดแทนมันไก่ด้วยอิมัลชันน้ำมันรำข้าวผสมเคซีนและเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าจะเหมาะสมในการผลิตไก่อยแบบฆ่าเชื้อด้วยความร้อนระดับสเตอริไลซ์มากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันรำข้าวอีก 2 รูปแบบ เนื่องจากโครงสร้างระดับจุลภาคสามารถทนความร้อนระหว่างการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์ได้มากกว่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการทดสอบด้านประสาทสัมผัสกับผู้บริโภคเพิ่มเพื่อยืนยันผลการวิจัยและประเมินการยอมรับของผู้บริโภคต่อไก่ยอในรีทอร์ทแพคเกจใช้น้ำมันรำข้าวทั้ง 3 รูปแบบ ทดแทนมันไก่ รวมทั้งการทดสอบในประเด็นอื่นประกอบ เช่น ในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และการคำนวณเกี่ยวกับต้นทุนการผลิต



## รายการอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุข. 2556. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 355) อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา.
- กระทรวงสาธารณสุข. 2556. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 364) มาตรฐานอาหารด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2549. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (เลขที่ 1332) ไก่เยอ. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน.
- กรรวิ พิสันเทียะ และประภาศรี เทพรักษา. 2561. การใช้สารทดแทนฟอสเฟตต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ไก่เยอพร้อมรับประทานที่บรรจุในรีทอร์ทแพคเกจ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 26: 121-135.
- ชนิษฐ์ณิชา ศักดิ์สมบูรณ์ และประภาศรี เทพรักษา. 2558. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไก่เยอโดยใช้น้ำมันรำข้าวแช่เยือกแข็งทดแทนมันไก่. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 23: 797-804.
- ทิพาพร อยู่วิทยา. 2556. การใช้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้ออาหาร. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นัยนา บุญทวีวัฒน์ และเรวดี จงสุวัฒน์. 2545. น้ำมันรำข้าว: ทางเลือกเพื่อสุขภาพของคนไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอ. เอส. พรีนติ้งเฮาส์.
- เยาวลักษณ์ สุรพันธ์พิศิษฐ์. 2536. เทคโนโลยีเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เค.ยู.เพรส.
- วรรณชยา ศรศักดิ์ชัยสิงห์, ประภาศรี เทพรักษา และสุธีรา วัฒนกุล. 2556. ผลของอิมัลชันน้ำมันถั่วเหลืองต่อคุณภาพของไส้กรอกปลาทูน่าท้องแถบ (*Katsuwonus pelamis*). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 21: 317-328.
- สาริตา มหศักดิ์สุนทร, สุชาดา มุกดา, จิรวัดน์ กันต์เกรียงวงศ์ และวรรณสุนทรสุข. 2549. การยืดอายุการเก็บหมุยอโดยใช้รีทอร์ทแพคเกจ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 37(5): 309-312.
- Alvarez, D., and Barbut, S. 2013. Effect of inulin,  $\beta$ -glucan and their mixtures on emulsion stability, color and textural parameters of cooked meat batters. Meat Science 94: 320-327.
- Alvarez, D., Xiong, Y. L., Castillo, M., Payne, F. A., and Garrido, M. D. 2012. Textural and viscoelastic properties of pork frankfurters containing canola-olive oils, rice bran, and walnut. Meat Science 92: 8-15.

- AOAC. 2012. Official Methods of Analysis of AOAC International. 19th ed. Rockville: AOAC International.
- APHA. 2001. Compendium of Methods for The Microbiological Examination of Foods. 4th ed. Washington DC: American Public Health Association.
- Ayadi, M., Makni, I., and Attia, H. 2009. Thermal diffusivities and influence of cooking time on textural, microbiological and sensory characteristics of turkey meat prepared-products. *Food and Bioproducts Processing* 87: 327-333.
- Barbut, S. 1999. Advances in determining meat emulsion stability. In Xiong, Y. L., Ho, C., and Shahidi, F. (eds.), *Quality Attributes of Muscle Foods*, pp.353-364. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Barbut, S. 2015. *The Science of Poultry and Meat Processing*. Ontario: University of Guelph. 764 p.
- Barnes, H. A. 2000. *A Handbook of Elementary Rheology*. Dyfed, Wales: University of Wales Aberystwyth. 210 p.
- Bishop, D. J., Olson, D. G., and Knipe, C. L. 1993. Pre-emulsified corn oil, pork fat, or added moisture affect quality of reduced fat bologna quality. *Journal of Food Science* 58: 484-487.
- Bloukas, I., and Honikel, K. O. 1992. The influence of additives on the oxidation of pork back fat and its effect on water and fat binding in finely comminuted batters. *Meat Science* 32: 31-43.
- Bourne, M. C. 2002. *Food texture and viscosity: concept and measurement*. 2nd ed. New York: Academic Press.
- Cáceres, E., García, M. L., and Selgas, M. D. 2008. Effect of pre-emulsified fish oil - as source of PUFA n-3 - on microstructure and sensory properties of mortadella, a Spanish bologna-type sausage. *Meat Science* 80: 183-193.
- Carballo, J., Barreto, G., and Colmenero, F.J. 1995. Starch and egg-white influence on properties of bologna sausage as related to fat-content. *Journal of Food Science* 60: 673-677.

- Carballo, J., Fernandez, P., Barreto, G., Solas, M. T., and Jiménez-Colmenero, F. 1996a. Characteristics of high- and low-fat bologna sausages as affected by final internal cooking temperature and chilling storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 72: 40-48.
- Carballo, J., Fernández, P., Barreto, G., Solas, M. T., and Jiménez-Colmenero, F. 1996b. Morphology and texture of bologna sausage containing different levels of fat, starch and egg white. *Journal of Food Science* 61: 652-655.
- Carmona, P., Ruiz-Capillas, C., Jimenez-Colmenero, F., Pintado, T., and Herrero, A. M. 2011. Infrared study of structural characteristics of frankfurter formulated with olive oil-in-water emulsion stabilized with casein as pork backfat replacer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 12998-13003.
- Cavestany, M., Jiménez-Colmenero, F., Solas, M. T., and Carballo, J. 1994. Incorporation of sardine surimi in bologna sausage containing different fat levels. *Meat Science* 38: 27-37.
- Chatton, U., and Apichartsrangkoon, A. 2009. Dynamic viscoelastic characterization of ostrich-meat yor (Thai sausage) following pressure, temperature and holding time regimes. *Meat Science* 81: 426-432.
- Cheetangdee, N. 2017. Characteristics of sausages as influenced by partial replacement of pork back-fat using pre-emulsified soybean oil stabilized by fish proteins isolate. *Agriculture and Natural Resources* 51: 310-318.
- Choi, Y. S., Jeong, J. Y., Choi, J. H., Han, D. J., Kim, H. Y., Lee, M. A., Shim, S. Y., Paik, H. D., Kim, C. J. 2007. Quality characteristics of meat batters containing dietary fiber extracted from rice bran. *Journal of Korean Society for Food Science and Animal Resources* 27: 228-234.
- Choi, Y. S., Choi, J. H., Han, D. J., Kim, H. Y., Lee, M. A., Kim, H. W., Lee, J. W., Chung, H. J., and Kim, C. J. 2009. Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber. *Meat Science* 82: 266-271.

- Choi, Y. S., Choi, J. H., Han, D. J., Kim, H. Y., Lee, M. A., Kim, H. W., Lee, J. W., Chung, H. J., and Kim, C. J. 2010. Optimization of replacing pork back fat with grape seed oil and rice bran fiber for reduced-fat meat emulsion systems. *Meat Science* 84: 212-218.
- Clark, A. H., and Ross-Murphy, S. B. 1987. Structural and mechanical properties of biopolymer gels. *Advances in Polymer Science* 83: 57-192.
- Cofrades, S., Lopez-Lopez, I., Solas, M. T., Bravo, L., and Jimenez-Colmenero, F. 2008. Influence of different types and proportions of added edible seaweeds on characteristics of low-salt gel/emulsion meat systems. *Meat Science* 79: 767-776.
- Crehan, C. M., Jughes, E., Troy, D. J., and Buckley, D. J. 2000. Effects of fat level and maltodextrin on the functional properties of frankfurter formulated with 5, 12 and 30% fat. *Meat Science* 55: 463-469.
- Das, K. P., and Kinsella, J. E. 1990. Stability of food emulsions: physicochemical role of protein and nonprotein emulsifiers. p. 81-201. In J. E. Kinsella (ed) *Advances in food and nutrition research*. London: Academic Press.
- Delgado-Pando, G., Cofrades, S., Ruiz-Capillas, C., and Solas, M. T. 2011. Low-fat frankfurters formulated with a healthier lipid combination as functional ingredient: microstructure, lipid oxidation, nitrite content, microbiological changes and biogenic amine formation. *Meat Science* 89: 65-71.
- Delgado-Pando, G., Cofrades, S., Ruiz-Capillas, C., Solas, M. T., and Jimenez-Colmenero, F. 2010. Characteristics of oil (healthier lipid combination)-in-water emulsions prepared with various protein systems: an approach for the development of functional meat products. *European Journal of Lipid Science and Technology* 112: 791-801.
- Dickinson, E., and Casanova, H. 1999. A thermoreversible emulsion gel based on sodium caseinate. *Food Hydrocolloids* 13: 285-289.
- Farahnaky, A., Askari, H., Majzoobi, M., and Mesbahi, G. 2010. The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of psyllium gels. *Journal of Food Engineering* 100: 294-301.

- Featherstone, S. 2015. *A Complete Course in Canning and Related Processes*. 14th ed. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Ferlisberto, M. H. F., Galvao, M. T. E. L., Picone, C. S. F., Cunha, R. L., and Pollonio, M. A. R. 2015. Effect of prebiotic ingredients on the rheological properties and microstructure of reduced-sodium and low-fat meat emulsions. *LWT-Food Science and Technology* 60: 148-155.
- Fernandez-Martin, F., Lopez-Lopez, I., Cofrades, F., and Jimenez-Colmenero, F. 2009. Influence of adding Sea Spaghetti seaweed and replacing the animal fat with oil or konjac gel on pork meat batter gelation: potential protein/ alginate association. *Meat Science* 83: 209-217.
- Flores, M., Giner, E., Fiszman, S. M., Salvador, A., and Flores, J. 2007. Effect of a new emulsifier containing sodium stearoyl-2-lactylate and carrageenan on the functionality of meat emulsion systems. *Meat Science* 76: 9-18.
- Gencelep, H., Saricaoglu, F. T., Anil, M., Agar, B., and Turhan, S. 2015. The effect of starch modification and concentration on steady-state and dynamic rheology of meat emulsions. *Food Hydrocolloids* 48: 135-148.
- Gordon, A., and Barbut, S. 1992. Mechanisms of meat batter stabilization: a review. *Critical Review in Food Science and Nutrition* 32: 299-332.
- Gunnasekaran, S., and Ak, M. M. 2000. Dynamic oscillatory shear testing of foods – selected applications. *Trends in Food Science and Technology* 11: 115-127.
- Heinz, G., and Hautzinger, P. 2007. *Meat Processing Technology for Small- to Medium-Scale Producers*. Bangkok: FAO Regional Office for Asia and The Pacific. 470 p.
- Hermansson, A. M. 1985. Water and fat holding. In Mitchell, J. R., and Ledward, D. A. (eds.), *Functional Properties of Food Macromolecules*, pp.273–314. London: Elsevier Applied Science Publishers.
- Herrero, A. M., Carmona, P., Pintado, T., Jimenez-Colmenero, F., and Ruiz-Capillas, C. 2011a. Infrared spectroscopic analysis of structural features and interactions in olive oil-in-water emulsions stabilized with soy protein. *Food Research International* 44: 360-366.

- Herrero, A. M., Carmona, P., Pintado, T., Jimenez-Colmenero, F., and Ruiz-Capillas, C. 2011b. Olive oil-in-water emulsions stabilized with caseinate: elucidation of protein-lipid interactions by infrared spectroscopy. *Food Hydrocolloids* 25: 12-18.
- Herrero, A. M., Carmona, P., Pintado, T., Jimenez-Colmenero, F., and Ruiz-Capillas, C. 2012. Lipid and protein structure analysis of frankfurters formulated with olive oil-in-water emulsion as animal fat replacer. *Food Chemistry* 135: 133-139.
- Hong, G., Lee, S., and Min, S. 2004. Effects of replacement pork backfat with soybean oil on the quality characteristics of spreadable liver sausage. *Food Science and Biotechnology* 13: 51-56.
- Horita, C. N., Messias, V. C., Morgano, M. A., Hayakawa, F. M., and Pollonio, M. A. R. 2014. Textural, microstructural and sensory properties of reduced sodium frankfurter sausages containing mechanically deboned poultry meat and blends of chloride salts. *Food Research International* 66: 29-35.
- Hsu, S. Y., and Yu, S. H. 2002. Comparisons on 11 plant oil fat substitutes for low-fat Kung-wans. *Journal of Food Engineering* 51: 215-220.
- Hu, H., Pereira, J., Xing, L., Hu, Y., Qiao, C. L., Zhou, G., and Zhang, W. 2016. Effects of regenerated cellulose emulsion on the quality of emulsified sausage. *LWT-Food Science and Technology* 70: 315-321.
- Hughes, E., Mullen, A. M., and Troy, D. J. 1998. Effects of fat level, tapioca starch and whey protein in frankfurters formulated with 5% and 12% fat. *Meat Science* 48: 169-180.
- Jimenez-Colmenero, F. 1996. Technologies for developing low-fat meat products. *Trends in Food Science and Technology* 7: 41-48.
- Jiménez-Colmenero, F. 2007. Healthier lipid formulation approaches in meat-based functional foods: technological options for replacement of meat fats by non-meat fats. *Trends in Food Science and Technology* 18: 567-578.
- Jiménez-Colmenero, F., Carballo, J., and Cofrades, S. 2001. Healthier meat and meat products: their role as functional foods. *Meat Science* 59: 5-13.

- Jiménez-Colmenero, F., Cofrades, S., Lopez-Lopez, I., Ruiz-Capillas, C., Pintado, T., and Solas, M. T. 2010a. Technological and sensory characteristics of reduced/low-fat, low-salt frankfurters as affected by the addition of konjac and seaweed. *Meat Science* 84: 356-363.
- Jiménez-Colmenero, F., Herrero, A. M., Pintado, T., Solas, M. T., and Ruiz-Capillas, C. 2010b. Influence of emulsified olive oil stabilizing system used for pork backfat replacement in frankfurters. *Food Research International* 43: 2068-2076.
- Jones, K. W., and Mandigo, R. W. 1982. Effect of chopping temperature on the microstructure of meat emulsions. *Journal of Food Science* 47: 1930-1935.
- Kang, Z. L., Zhu, D., Li, B., Ma, H., and Song, Z. 2017. Effect of pre-emulsified sesame oil on physical-chemical and rheological properties of pork batters. *Food Science and Technology (Campinas)* 37: 620-626.
- Kerry, J. P., Kerry, J. F., and Ledward, D. 2002. *Meat Processing: Improving Quality*. Boca Raton, FL: CRC Press. 480 p.
- Kuraishi, C., Sakamoto, J., Yamazani, K., Susa, Y., Kuhara, C., and Soeda, T. 1997. Production of restructured meat using microbial transglutaminase without salt or cooking. *Journal of Food Science* 62: 488-490,515.
- Kurth, L., and Rogers, P. J. 1984. Transglutaminase catalyzed cross-linking of myosin to soy protein, casein and gluten. *Journal of Food Science* 49: 573-576,589.
- Lee, H. A., Choi, S. J., and Moon, T. W. 2006. Characteristics of sodium caseinate- and soy protein isolate-stabilized emulsion-gels formed by microbial transglutaminase. *Journal of Food Science* 71: C352-C357.
- López-López, I., Cofrades, S., and Jiménez-Colmenero, F. 2009. Low-fat frankfurters enriched with n-3 PUFA and edible seaweed: effects of olive oil and chilled storage on physicochemical, sensory and microbial characteristics. *Meat Science* 83: 148-154.
- Lorenzo, G., Checmarev, G., Zaritzky, N., and Califano, A. 2011. Linear viscoelastic assessment of cold gel-like emulsions stabilized with bovine gelatin. *LWT-Food Science and Technology* 44: 457-464.

- Marchetti, L., Andres, S. C., and Califano, A. N. 2013. Textural and thermal properties of low-lipid meat emulsions formulated with fish oil and different binders. *LWT-Food Science and Technology* 51: 514-523.
- Martin, D., Ruiz, J., Kivikari, R., and Puolanne, E. 2008. Partial replacement of pork fat by conjugated linoleic acid and/or olive oil in liver pates: effect on physicochemical characteristics and oxidative stability. *Meat Science* 80: 496-504.
- Matsuishi, M., Igeta, M., Takeda, S., and Okitani, A. 2004. Sensory factors contributing to the identification of the animal species of meat. *Journal of Food Science* 69: S218-S220.
- Mezger, T. G. 2006. *The Rheology Handbook*. 2nd ed. Hannover, Germany: Vincentz Network. 298 p.
- Mleko, S., and Foegeding, E. 2000. PH induced aggregation and weak gel formation of whey protein polymers. *Journal of Food Science* 65: 139-143.
- Morin, L. A., Temelli, F., and McMullen, L. 2004. Interactions between meat proteins and barley (*Hordeum* spp.)  $\beta$ -glucan within a reduced-fat breakfast sausage system. *Meat Science* 68: 419-430.
- Morris, V. J., and Groves, K. 2013. *Food Microstructures: Microscopy, measurement and modeling*. Oxford: Woodhead Publishing. 472 p.
- Muguruma, M., Tsuruoka, K., Katayama, K., Erwanto, Y., Kawahara, S., Yamauchi, K., et al. 2003. Soybean and milk proteins modified by transglutaminase improves chicken sausage texture even at reduced levels of phosphate. *Meat Science* 63: 191-197.
- Oezvural, E. B., and Vural, H. 2008. Utilization of interesterified oil blends in the production of frankfurters. *Meat Science* 78: 211-216.
- Picone, C. S. F., and Cunha, R. L. 2011. Influence of pH on formation and properties of gellan gels. *Carbohydrate Polymers* 84: 662-668.
- Picout, D. R., and Ross-Murphy, S. B. 2003. Rheology of biopolymer solution and gels. *The Scientific World Journal* 3: 105-121.

- Pietrasik, Z., and Duda, Z. 2000. Effect of fat content and soy protein/carrageenan mix on the quality characteristics of comminuted, scalded sausages. *Meat Science* 56: 181-188.
- Resurreccion, A. 2004. Sensory aspects of consumer choices for meat and meat products. *Meat Science* 66: 11-20.
- Sams, A. R. 2001. *Poultry Meat Processing*. Boca Raton, FL: CRC Press. 345 p.
- Saricoban, C., and Yilmaz, M. T. 2010. Modelling the effects of processing factors on the changes in colour parameters of cooked meatballs using response surface methodology. *World Applied Sciences Journal* 9: 14-22.
- Savadkoochi, S., Shamsi, K., Hoogenkamp, H., Javadi, A., and Farahnaky, A. 2013. Mechanical and gelling properties of comminuted sausages containing chicken MDM. *Journal of Food Engineering* 117: 255-262.
- Savadkoochi, S., and Farahnaky, A. 2012. Dynamic rheological and thermal study of the heat-induced of tomato seed proteins. *Journal of Food Engineering* 113: 479-485.
- Savitzky, A., and Golay, M. J. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 36: 1627-1639.
- Schuh, V., Allard, K., Herrmann, K., Gibis, M., Kohlus, R., and Weiss, J. 2013. Impact of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) on functional characteristics of emulsified sausages. *Meat Science* 93: 240-247.
- Shao, J. H., Zou, Y. F., Xu, X. L., Wu, J. Q., and Zhou, G. H. 2011. Evaluation of structural changes in raw and heated meat batters prepared with different lipids using Raman spectroscopy. *Food Research International* 44: 2955-2961.
- Smyth, A. B., and O'Neill, E. 1997. Heat-induced gelation properties of surimi from mechanically separated chicken. *Journal of Food Science* 62: 326-330.
- Steffe, J. F. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2nd ed. East Lansing: Freeman Press. 428 p.
- Toldra, F. 2010. *Handbook of Meat Processing*. Ames, IA: Wiley-Blackwell. 584 p.
- US FDA. 2001. *Bacteriological Analytical Manual*. Washington DC: United States Food and Drug Administration.

- US FDA. 2017. Code of Federal Regulations (Title 21 Chapter I Subchapter B Part 113): Thermally Processed Low-acid Foods Packaged in Hermetically Sealed Containers. Washington DC: U.S. Government Publishing Office.
- US FSIS. 2005. Food Safety Regulatory Essentials (FSRE) Course: Principles of Thermal Processing. Washington DC: Department of Agriculture.
- US FSIS. 2017. Code of Federal Regulations (Title 9 Chapter III Subchapter A Part 318 Subpart G): Canning and Canned Products. Washington DC: U.S. Government Publishing Office.
- Vural, H., and Javidipour, I. 2002. Replacement of beef fat in frankfurters by interesterified palm, cottonseed and olive oils. *European Food Research and Technology* 214: 465-468.
- Wattanachan, S., Benjakul, S., and Ledward, D. A. 2005. Effect of heat treatment on changes in texture, structure and properties of Thai indigenous chicken muscle. *Food Chemistry* 93: 337-348.
- Wrolstad, R. E., and Smith, D. E. 2017. Color analysis. In Nielsen, S. S. (ed.), *Food Analysis*, 5th ed., pp.545-555. Cham: Springer International Publishing.
- Yoo, S. S., Kook, S. H., Park, S. Y., Shim, J. H., and Chin, K. B. 2007. Physicochemical characteristics, textural properties and volatile compounds in comminuted sausages as affected by various fat levels and fat replacers. *International Journal of Food Science and Technology* 42: 1114-1122.
- Youssef, M. K., and Barbut, S. 2009. Effects of protein level and fat/oil type on emulsion stability, texture, microstructure and color of meat batters. *Meat Science* 82: 228-233.
- Youssef, M. K., and Barbut, S. 2010. Physicochemical effects of the lipid phase and protein level on meat emulsion stability, texture, and microstructure. *Journal of Food Science* 75: S108-S114.
- Youssef, M. K., and Barbut, S. 2011. Effects of two types of soy protein isolates, native and preheated whey protein isolates on emulsified meat batters prepared at different protein levels. *Meat Science* 87: 54-60.

Youssef, M. K., Barbut, S., and Smith, A. 2011. Effects of pre-emulsifying fat/oil on meat batter stability, texture and microstructure. *International Journal of Food Science and Technology* 46: 1216-1224.

Zayas, J. F. 2012. *Functionality of Proteins in Food*. New York: Springer Science and Business Media. 373 p.

Zhuang, X., Han, M., Kang, Z., Wang, K., Bai, Y., Xu, X., and Zhou, G. 2016. Effects of the sugarcane dietary fiber and pre-emulsified sesame oil on low-fat meat batter physico-chemical property, texture, and microstructure. *Meat Science* 113: 107-115.





ภาคผนวก

## ภาคผนวก

### การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

#### 1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2012)

##### อุปกรณ์

1. ถ้วยอลูมิเนียมมีฝาปิดสำหรับหาความชื้น
2. ตู้อบลมร้อน
3. โถดูดความชื้น
4. เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

##### วิธีการวิเคราะห์

1. อบถ้วยหาความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
2. นำถ้วยออกจากตู้อบ พักไว้ในโถดูดความชื้นจนอุณหภูมิเย็นลง แล้วชั่งน้ำหนัก
3. ชั่งตัวอย่างใส่ในถ้วยที่ทราบน้ำหนักแล้วประมาณ 5 กรัม
4. อบตัวอย่างในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
5. นำตัวอย่างออกจากตู้อบ พักไว้ในโถดูดความชื้นจนอุณหภูมิเย็นลง แล้วชั่งน้ำหนัก
6. อบตัวอย่างซ้ำจนน้ำหนักคงที่
7. คำนวณปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)

$$\text{ปริมาณความชื้น} = (\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ลดลง} / \text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}) \times 100$$

## 2 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2012)

### อุปกรณ์

1. ถ้วยใส่ตัวอย่างสำหรับสกัดไขมัน (thimble)
2. ขวดสกัดไขมัน
3. ชุดสกัดไขมัน (Soxhlet apparatus)
4. ตู้อบลมร้อน
5. โถดูดความชื้น
6. เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

### สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์

### วิธีการวิเคราะห์

1. อบขวดสกัดไขมันในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
2. นำถ้วยออกจากตู้อบ พักไว้ในโถดูดความชื้นจนอุณหภูมิเย็นลง แล้วชั่งน้ำหนัก
3. ชั่งตัวอย่างใส่ในถ้วยประมาณ 2 กรัม
4. ใส่ตัวอย่างในขวดสกัดแล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์จนท่วมตัวอย่าง
5. ประกอบขวดสกัดเข้ากับชุดสกัดไขมันแล้วเปิดให้เครื่องทำงาน
6. ระเหยอีเทอร์ออกโดยให้ความร้อนบนเตา
7. อบไขมันที่สกัดได้ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
8. นำขวดออกจากตู้อบ พักไว้ในโถดูดความชื้นจนอุณหภูมิเย็นลง แล้วชั่งน้ำหนัก
7. คำนวณปริมาณไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)

$$\text{ปริมาณไขมัน} = (\text{น้ำหนักไขมันที่สกัดได้} / \text{น้ำหนักตัวอย่าง}) \times 100$$

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายณัฐ เทพหัตถ์
วันเดือนปีเกิด	19 พฤษภาคม พ.ศ. 2523
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีทางอาหาร) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีทางอาหาร)

## ผลงานทางวิชาการ

- Thephuttee, N., and Theprugsa, P. 2020. Stability and microstructure of emulsion system in sterilized Kai-yor (Thai chicken sausage). Chiang Mai University Journal of Natural Science 19: 781-800.
- Apisittiwong, T., Boonsiriwit, A., Thephuttee, N., and Thancharoenkul, T. 2019. Development of halal Chinese fish sausage using different types of lipid. Chiang Mai University Journal of Natural Science 18. <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2019.0001>