การพัฒนาและปรับปรุงคุณคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ด้วยสารไฮโดรคอลลอยด์

Development and quality improvement of allergen-free artificial egg products from chickpeas with hydrocolloid

พนิดา อ่อนน้อม

PANIDA AONNOM

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการความปลอดภัยอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2568

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development and quality improvement of allergen-free artificial egg products from chickpeas with hydrocolloid

PANIDA AONNOM

AND INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN FOOD SAFETY MANAGEMENT

SCHOOL OF FOOD INDUSTRY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2025

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF FOOD INDUSTRY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	การพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ด้วยสารไฮโดรคอลลอยด์
นักศึกษา	นางสาวพนิดา อ่อนน้อม
รหัสนักศึกษา	65086015
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	การจัดการความปลอดภัยอาหาร
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ	ผศ.ดร.วิภาวดี สงัดกิจ

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ โดยการใช้อควาฟาบา ผงถั่วลูกไก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบหลักร่วมกับสารไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน เพื่อลดการใช้ไข่ในผู้บริโภคกลุ่มที่แพ้โปรตีนจากไข่ โดยออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิด และแบบใช้ร่วมกันต่อคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง ความยืดหยุ่น ความยึดติด พลังงานการเคี้ยว และค่าการคืนตัว และได้คัดเลือกสูตรที่เหมาะสมสำหรับการใช้ร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าสูตรที่เหมาะสมมีส่วนผสมของถั่วลูกไก่ 13.81 % อควาฟาบา 2.86 % แป้งมันสำปะหลัง 4.60 % แป้งข้าวเจ้า 0.09 %และน้ำกรอง 50 %

สำหรับการพัฒนาไข่เทียมทรงเครื่องร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ พบว่า การใช้กัวร์กัม และคาราจีแนนช่วยเพิ่มความแข็ง และพลังงานการเคี้ยว ขณะที่แซนแทนกัมมีแนวโน้มลดความแข็ง และพลังงานการเคี้ยว แต่สามารถเพิ่มความยืดหยุ่น และการคืนตัวได้ในปริมาณที่เหมาะสม จากนั้นได้มีการคัดเลือกสูตรที่ใช้ กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม ในอัตราส่วน 5% และ 1% ตามลำดับ โดยพิจารณาจากลักษณะทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วย ฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อให้ได้สูตรที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดต่อการพัฒนาไข่เทียมทรงเครื่อง แล้วนำไปผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยระบบรีทอร์ท เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา พบว่าผลิตภัณฑ์สามารถคงรูป สี และโครงสร้างได้ดี มีคุณภาพ และยังมีองค์ประกอบทางโภชนาการ เช่น โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการอาหารทางเลือกจากพืช

คำสำคัญ: ไข่เทียม ถั่วลูกไก่ อะควาฟาบา ไฮโดรคอลลอยด์ รีทอร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Independent Study Development and quality improvement of allergen-free artificial egg products from chickpeas with hydrocolloid

Student Miss. Panida Aonnom

Student ID. 65086015

Degree Master of Science

Program Food Safety Management

Year 2025

Independent study advisor Asst. Prof. Dr. Wipawadee Sangadkit

ABSTRACT

This study aimed to develop and improve the quality of allergen-free artificial egg products using chickpea as the main protein source. Key ingredients included aquafaba, chickpea powder, tapioca starch, and rice flour combined with hydrocolloids: guar gum, xanthan gum, and carrageenan to provide an alternative for consumers with egg protein allergies. The experiment was designed to evaluate the individual and combined effects of each hydrocolloid on the textural properties of the product, including hardness, springiness, cohesiveness, chewiness, and elasticity. The optimal formulation was identified using the Response Optimizer function, consisting of 13.81% chickpea powder, 2.86% aquafaba, 4.60% tapioca starch, 0.09% rice flour, and 50% filtered water.

In developing the quality of allergen-free artificial egg products with hydrocolloids, it was found that guar gum and carrageenan helped improve hardness and chewiness while xanthan gum tended to reduce both parameters. However, xanthan gum was able to enhance springiness and elasticity when applied at appropriate levels. The final selected formula, using 5% guar gum and 1% xanthan gum, was chosen based on optimal texture characteristics determined through the response optimizer analysis. This formulation was then subjected to thermal sterilization using a retort system. The product maintained desirable structure, color, and integrity, exhibited satisfactory quality, and provided nutritional value such as protein and carbohydrates levels appropriate for consumers seeking plant-based alternatives.

Keywords: artificial egg, chickpea, aquafaba, hydrocolloid, retort

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจากหลายภาคส่วน ผู้วิจัยขอน้อมกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี สงัดกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความรู้ และข้อเสนอแนะแก่ผู้วิจัยทั้งในด้านเนื้อหาและกระบวนการวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์อย่างละเอียดรอบคอบ จนสามารถดำเนินงานวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์ได้ตามเป้าหมาย

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาจรีย์ อิงคะสุภัทร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ วัฒนชัยเสรีกุล อาจารย์ประจำคณะอุตสาหกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาให้คำแนะนำที่มีคุณค่า ช่วยให้ผลงานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ นักศึกษาคณะอุตสาหกรรมอาหารทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญในการเรียนและการทำงานวิจัยครั้งนี้ ด้วยความรัก ความเข้าใจ และการสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการฝ่าฟันอุปสรรคต่าง ๆ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จได้ในที่สุด

หากมีประโยชน์อันใดเกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ย่อมเป็นผลจากความเมตตา ความช่วยเหลือ และความปรารถนาดีจากทุกท่านที่กล่าวนามไว้เบื้องต้น ข้าพเจ้าขอน้อมสำนึกในพระคุณและขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ด้วยความเคารพอย่างสูง

พนิดา อ่อนน้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VIII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	3
2.1 สารก่อภูมิแพ้ในอาหาร	3
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของอาหารก่อภูมิแพ้	3
2.2 อาหาร และโปรตีนทางเลือกจากพืช	3
2.3 ถั่วลูกไก่	4
2.3.1 ประโยชน์ของถั่วลูกไก่	4
2.4 อควาฟาบา	4
2.5 ไฮโดรคอลลอยด์	5
2.5.1 การใช้ประโยชน์ของไฮโดรคอลลอยด์	5
2.5.2 ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์	5
2.5.2.1 กัวร์กัม	5
2.5.2.2 แซนแทนกัม	6
2.5.2.3 คาราจีแนน	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
2.6 การฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ท	7
2.6.1 การฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	7
2.6.2 บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์	9
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3 อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการ	17
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์	17
3.2 วิธีการทดลอง	17
3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาการผลิตไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้	17
3.2.1.1 การเตรียมอควาฟาบา	17
3.2.1.2 การเตรียมผงถั่วลูกไก่	18
3.2.1.3 การเตรียมไข่ทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้	18
3.2.2 ขั้นตอนการปรับปรุงไข่เทียมด้วยไฮโดรคอลลอยด์	21
3.2.3 ขั้นตอนการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์หลังผ่านการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	24
3.2.3.1 การเตรียมไข่เทียมทรงเครื่องในรีทอร์ทเพาซ์	24
3.2.3.2 ขั้นตอนการฆ่าเชื้อ	25
3.2.4 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของไข่เทียมทรงเครื่อง	25
3.2.4.1 การตรวจสอบค่าสี	25
3.2.4.2 การตรวจสอบลักษณะทางเนื้อสัมผัส	25
3.2.4.3 การตรวจสอบปริมาณน้ำอิสระ	26
3.2.5 การตรวจสอบทางโภชนาการ	26
3.2.6 การประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี Hedonic Scale	26
3.2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
4.1 ผลการตรวจสอบคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่อง	28
4.1.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง	28
4.1.2 ผลการตรวจสอบค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่อง	58
4.1.3 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไข่เทียมทรงเครื่องผ่านฟังก์ชัน Response Optimizer	60
4.1.3.1 ผลการเปรียบเทียบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่ทรงเครื่องและไข่เทียมทรงเครื่อง	60
4.1.3.2 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำอิสระ และความชื้น	61
4.2 ผลการปรับปรุงคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์	63
4.2.1 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียว	64
4.2.2 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์สองชนิด	65
4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์สามชนิด	68
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของเนื้อสัมผัสไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์	71
4.2.5 ผลการตรวจสอบค่าสีของการปรับปรุงคุณภาพไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์	85
4.2.6 ผลการทำนายไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์ผ่านฟังก์ชั่น Response Optimizer	88
4.3 ผลการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์หลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้ยรีทอร์ท	91
4.3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
4.3.2 ผลการตรวจสอบค่าสีของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	92
4.3.3 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคลลอยด์ก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	93
4.3.4 ผลการตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	98
5.1 สรุปผลการทดลอง	98
5.2 ข้อเสนอแนะ	99
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก.	105
ภาคผนวก ข.	109
ภาคผนวก ค.	130
ภาคผนวก ง.	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
4.1	แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าความแข็งในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	38
4.2	แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าการคืนตัวในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	43
4.3	แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	47
4.4	แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	52
4.5	แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	57
4.6	แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าความแข็งในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	72
4.7	แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าการคืนตัวในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	75
4.8	แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	78
4.9	แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	80
4.10	แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งในรูปแบบ 2 มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3 มิติ (ขวา)	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ส่วนประกอบสำหรับไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่	19
3.2	จำนวนสูตรทั้งหมดของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยวิธี BBD	20
3.3	จำนวนสูตรทั้งหมดของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ด้วยวิธี FFD	22
4.1	ผลการตรวจสอบค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้ผลการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง	30
4.2	ผลการตรวจสอบค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้	58
4.3	สัดส่วนของไข่เทียมทรงเครื่องสูตรคัดเลือกจากฟังก์ชั่น Response Optimizer	60
4.4	ผลการเปรียบเทียบระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องจากการทำนายและไข่เทียมทรงเครื่องจากการทดลอง	61
4.5	ผลการเปรียบเทียบระหว่างไข่ทรงเครื่อง และไข่เทียมทรงเครื่องต่อปริมาณน้ำอิสระ และความชื้น	62
4.6	ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องชนิดเดียว	64
4.7	ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB)	65
4.8	ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมกัวร์กัม และคาราจีแนน (AC)	66
4.9	ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมแซนแทนกัมและคาราจีแนน (BC)	67
4.10	ผลการตรวสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมกัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกัน	69
4.11	ผลการตรวจสอบค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่องที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสคล้ายกับไข่ทรงเครื่อง	86
4.12	สัดส่วนของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์สูตรคัดเลือกจากฟังก์ชั่น Response Optimizer	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.13	ผลการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์สูตรคัดเลือก	89
4.14	ผลการเปรียบเทียบลักษณะทางเนื้อสัมผัสระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	92
4.15	ผลการเปรียบเทียบค่าสีระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	93
4.16	ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ	94
4.17	ผลการเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท	96
ข.1	ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในระหว่างขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์	109
ข.2	ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์	120
ค.1	ค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าความแข็ง	130
ค.2	ค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าการคืนตัว	131
ค.3	ค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร	132
ค.4	ค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว	133
ค.5	ค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง	134
ง.1	ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าความแข็ง	135
ง.2	ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าการคืนตัว	136
ง.3	ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ง.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว	138
ง.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ความต้องการของผู้บริโภคในเรื่องอาหารจากพืชเพื่อทดแทนเนื้อสัตว์ ไข่ และผลิตภัณฑ์นมโดยเลียนแบบโครงสร้าง และคุณสมบัติอื่นๆ เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานในอาหารเป็นจำนวนมาก แนวโน้มนี้เกิดจากหลายสาเหตุเช่น ความชอบด้านอาหารของผู้บริโภคที่แตกต่างกันเช่น การกินมังสวิรัติ อีกทั้งด้านความยั่งยืนทางอาหารที่มีการรณรงค์เรื่อง การลดการบริโภคเนื้อสัตว์เพื่อลดมลพิษจากฟาร์มปศุสัตว์ และเหตุผลในเรื่องของสารก่อภูมิแพ้ในอาหารที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน อาหารที่พบว่าคนไทยมีอาการแพ้สูงคือ นมวัว ไข่ แป้งสาลี และอาหารทะเล (ดารณี, 2560) ไข่ไก่จัดเป็นอาหารยอดนิยมของผู้บริโภคเนื่องจากทานง่าย และราคาถูก อุดมไปด้วยคุณประโยชน์มากมายอีกทั้งมีปริมาณโปรตีนที่สูง แต่อย่างไรก็ตามโปรตีนที่มีอยู่ในไข่ไก่นั้นเป็นโปรตีนที่ทำให้เกิดอาการแพ้ในกลุ่มผู้บริโภคบางกลุ่มซึ่งอาจมีอันตรายถึงชีวิตหากรับประทาน ด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้แพ้ไข่ไก่มีทางเลือกในการรับประทานอาหารที่น้อยลง (Taylor, 1985) จึงมีการศึกษาเพื่อพัฒนาโปรตีนทางเลือกจากพืชเพื่อใช้ทดแทนเนื้อสัตว์เป็นการแก้ปัญหาเรื่องความหลากหลายทางด้านอาหารสำหรับผู้แพ้อาหาร และแก้ปัญหาความมั่นคงที่พบเห็นในปัจจุบัน เช่น เนื้อมังสวิรัติ นมจากพืช และไข่เทียมจากพืช เป็นต้น

โปรตีนทางเลือกจากพืช คือโปรตีน ที่ไม่ได้มาจากการทำปศุสัตว์ เช่น นม ไข่ เนื้อสัตว์ โปรตีนทดแทนจะผลิตมาจากหลากหลายวัตถุดิบ เช่น พืช สาหร่าย เชื้อรา หรือ โปรตีนสังเคราะห์ในห้องวิจัย โปรตีนส่วนใหญ่ที่ใช้จะมาจากพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ปัจจุบันกระบวนการแปรรูปพืชตระกูลถั่วที่หลากหลายเพื่อใช้ในการทดแทนอาหารที่ทำจากเนื้อสัตว์ เช่น การใช้ถั่วในการทำไข่เทียม การใช้น้ำต้มถั่วลูกไก่ (Aquafaba) ทดแทนไข่ขาวในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ เช่น มายองเนส มังสวิรัติ หรือจะทดแทนในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ถั่วลูกไก่ที่อุดมไปด้วยวิตามิน และประโยชน์ที่หลากหลาย อีกทั้ง ยังมีโปรตีนสูง อีกทั้งอควาฟาบา (Aquafaba) หรือของเหลือที่ได้จากกระบวนการผลิตถั่วลูกไก่มีคุณสมบัติทางด้านลักษณะทางกายภาพ เช่น การเกิดฟอง การเกิดอิมัลซิไฟเออร์ การเกิดเจล การดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำมัน และการอุ้มน้ำ ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตอาหารเพื่อทดแทนผลิตภัณฑ์จากสัตว์ มาเป็นส่วนประกอบในการผลิตไข่เทียมทรงเครื่อง ในปัจจุบันมีการใช้ อะควาฟาบา ในการทำหน้าที่เป็นไข่ ใช้ทดแทนไขมัน อิมัลซิไฟเออร์ และสารก่อเจล โดยมีการนำ อะควาฟาบา มาใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ลูกกวาด ของหวาน และมายองเนส แต่เนื่องจากการใช้อะควาฟาบา เป็นส่วนประกอบเพื่อทดแทนไข่มีข้อจำกัดในเรื่องคุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งมีความหยาบ และเปราะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ และปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้ ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์จากไข่ไก่ และศึกษาผลการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไรส์ต่อคุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่

1.2.2 เพื่อศึกษาปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้ ด้วยสารไฮโดรคอลลอยด์

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องหลังการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ท

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการผลิตไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้ ที่ผลิตจากน้ำต้มถั่วลูกไก่ สายพันธุ์ kabuli ประเทศอินเดีย ทำการทดลองศึกษาวิธีการผลิต และการปรับปรุงคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้ด้วยสารไฮโดรคอลลอยด์ 3 ชนิด คือ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่ปริมาณ 3 ระดับคือ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ และศึกษาผลของคุณภาพของการฆ่าเชื้อไข่เทียมด้วยกระบวนการรีทอร์ท

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้สูตรการผลิตไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ที่เหมาะสม

1.4.2 ได้ชนิด และปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสม สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้

1.4.3 ได้ทราบถึงคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 สารก่อภูมิแพ้ในอาหาร

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของอาหารก่อภูมิแพ้

ภูมิแพ้อาหารคืออาการที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดปกติของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ผู้มีอาการแพ้อาหารมีเพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์จากประชากรทั้งหมด สารที่ทำให้เกิดอาการแพ้อาหารมักจะ เป็นโปรตีนที่พบในธรรมชาติที่มีอยู่ในอาหาร เช่น นมวัว ไข่ ถั่วลิสง งา หรืออาหารทะเล เป็นต้น โดยนมวัว และไข่เป็นอาหารที่พบว่าทำให้เกิดอาการแพ้ที่พบได้บ่อยมาก สาเหตุสำคัญเกิด จากการสร้างภูมิคุ้มกัน (antibody) ที่มีต่อโปรตีนที่ เข้าไปในร่างกาย ดังนั้นความแตกต่างของการ บริโภคอาหารในแต่ละประเทศเป็นผลให้การแพ้ อาหารแตกต่างกันไป เช่น ถั่วเหลือง เป็นสาเหตุ ที่ทำให้เกิดการแพ้อาหารที่พบมากในประเทศ ญี่ปุ่น ปลาคอด (codfish) เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด การแพ้อาหารที่พบมากในหมู่ประเทศกลุ่ม สแกนดิเนเวียน เป็นต้น อาการแพ้อาหารมีอันตรายต่อผู้บริโภคที่มีการแพ้ ซึ่งเป็นอันตรายมากถึงขั้นเสียชีวิตในผู้ที่มีอาการรุนแรง (Taylor, 1985) และในประเทศไทยอาหารที่พบว่ามีการแพ้มากที่สุดคือ นมวัว ไข่ แป้งสาลี และอาหารทะเล (ดารณี, 2560)

กลไกการเกิดอาการแพ้อาหารเกิดจาก โปรตีนที่เป็นสารก่อภูมิแพ้ (Allergen) ที่ถูกย่อยที่ลำไส้เล็กแล้ว จากนั้นสาร Allergen จะไปจับกับ ICE Receptor ทำให้มีการหลั่งสารต่างๆ ทางเม็ดเลือดขาวออกมาจึงเกิดอาการแพ้ ความรุนแรงของการแพ้อาหารสรุปได้ดังนี้

2.1.1.1 อาการแพ้ถั่วลิสงจะหายใจไม่ออก และช็อก อาจตายได้

2.1.1.2 อาการแพ้นมวัว พบในเด็กทารก มีลักษณะเป็นผื่นขึ้นตามตัว เป็นลมพิษ ตัวแดง และท้องเสียเรื้อรัง

2.1.1.3 การแพ้แบบ Multiple Food Allergy จะมีอาการตัวบวม และมีการรั่วของโปรตีนทางปัสสาวะและลำไส้อุจจาระเป็นเลือดและช็อก

2.1.1.4 การแพ้อาหารทะเล จะมีอาการตาบวม ปากบวม และหายใจไม่ออก

2.2 อาหาร และโปรตีนทางเลือกจากพืช

โปรตีนทางเลือกคือโปรตีน ที่ไม่ได้มาจากการทำปศุสัตว์ เช่น นม ไข่ เนื้อสัตว์ โปรตีนทดแทนจะผลิตมาจากหลากหลายวัตถุดิบ เช่น พืช สาหร่าย เชื้อรา หรือ โปรตีนสังเคราะห์ในห้องวิจัย โปรตีนทางเลือกที่เราพบเห็นได้บ่อยเช่น เต้าหู้ที่ทำจากถั่วเหลือง ที่นิยมรับประทานในเทศกาลกินเจ แต่ในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีเพื่อพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรตีนจากพืชให้มีความหลากหลายเพิ่มขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภค เทคโนโลยีที่เพิ่มความหลากหลายให้กับอาหารเช่น การทำเนื้อจากโปรตีนพืช โปรตีนส่วนใหญ่ที่ใช้จะมาจากพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วลูกไก่ มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมกระบวนการผลิตมาใช้ เช่น กระบวนการหมักที่เกิดจากการนำยีสต์และโปรตีนที่สังเคราะห์ได้จากรากของพืชตระกูลถั่ว เพื่อทำให้เกิดฮีม (Heme) ที่มีลักษณะคล้ายกล้ามเนื้อของสัตว์ หรือกระบวนการหมักจากถั่วเหลือง ยีสต์และสารสกัดจากเมล็ดดอกทานตะวัน เพื่อผลิตเนื้อที่มีความใกล้เคียงอาหารทะเล (สอวช., 2021)

2.3 ถั่วลูกไก่

ถั่วชิกพี หรือ ถั่วลูกไก่ คือ พืชวงศ์ถั่ว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า (Cicer Arietinum) ถั่วชิกพีชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันดีในแถบเมดิเตอร์เรเนียน เนื่องจากในแถบตะวันออกกลางและอินเดียนิยมนำถั่วชนิดนี้มาประกอบอาหารรับประทาน มีการปลูกถั่วชิคพีไว้สำหรับรับประทานกันมานาน 7,500 ปีมาแล้ว คนไทยรู้จักถั่วชนิดนี้ในชื่อ “ถั่วลูกไก่” ถั่วมีรูปร่างคล้ายหยดน้ำขนาดใหญ่หรือรูปร่างคล้ายลูกไก่ตัวเล็กๆ จึงเรียกชื่อถั่วลูกไก่ มีจะงอยแหลมบริเวณด้านบนของเมล็ด

2.3.1 ประโยชน์ของถั่วลูกไก่

ถั่วชิกพี อุดมไปด้วยสารอาหารโปรตีน วิตามิน แร่ธาตุ และมีกรดอะมิโนที่จำเป็นทั้งหมด 9 ชนิด จึงให้ประโยชน์ต่อสุขภาพหลายประการ ได้แก่ มีใยอาหารสูง ช่วยควบคุมน้ำหนัก ลดน้ำหนัก และช่วยให้รู้สึกอิ่มนานขึ้น ใยอาหาร ช่วยป้องกันอาการท้องผูก และช่วยลดไขมันในร่างกาย โพแทสเซียม ไฟเบอร์ วิตามินซี และ วิตามินบี 6 ช่วยป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด และช่วยลดคอเลสเตอรอล ช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด โปรตีนช่วยสร้างมวลกล้ามเนื้อ แคลเซียม ช่วยให้กระดูกแข็งแรง วิตามินซี ช่วยป้องกันโรคต่างๆ เช่น มะเร็ง และบำรุงผิว โฟเลตทำงานได้ดีในระหว่างตั้งครรภ์ ซีลีเนียม ช่วยให้ตับทำงานได้อย่างปกติ ช่วยล้างพิษ ป้องกันการเจริญเติบโตของเนื้องอก วิตามินเอและสังกะสี สามารถป้องกันผมร่วง ผมบาง รังแคได้ และช่วยให้ผมงอกใหม่ มีกรดโฟลิค โพแทสเซียม และสารฟลาโวนอยด์ ที่ช่วยต่อต้านการเกิดโรคหัวใจ โดยเฉพาะฟลาโวนอยด์ที่มีอยู่ในถั่วนี้จัดเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูงมาก เพราะว่าสารนี้จะไปยับยั้งไม่ให้อนุมูลอิสระไปทำปฏิกิริยากับไขมันเพื่อไปทำลายผนังของหลอดเลือด ซึ่งอาจจะทำให้หัวใจหรือเนื้อเยื่อ (Lesion) ในหลอดเลือดเกิดแผล การรับประทานถั่วลูกไก่ หรือ ถั่วชิคพียังช่วยลดปริมาณ Low-Density Lipoprotein (LDL) และช่วยเพิ่มปริมาณไขมันดี (HDL)

2.4 อะควาฟาบา

อะควาฟาบา (Aquafaba) หรือของเหลือที่ได้จากกระบวนการผลิตถั่วลูกไก่มีคุณสมบัติทางด้านลักษณะทางกายภาพ เช่น การเกิดฟอง การเกิดอิมัลซิไฟเออร์ การเกิดเจล การดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำมัน และการอุ้มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตอาหารเพื่อทดแทนผลิตภัณฑ์จากสัตว์ มาเป็นส่วนประกอบในการผลิตไข่เทียม ทรงเครื่อง ในปัจจุบันมีการใช้ อะควาฟาบา ในการทำหน้าที่เป็นไข่ ใช้ทดแทนไขมัน อิมัลซิไฟเออร์ และสารก่อเจล โดยมีการนำ อะควาฟาบา มาใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ลูกกวาด ของหวาน และมายองเนส (Serventi, 2020)

2.5 ไฮโดรคอลลอยด์

ไฮโดรคอลลอยด์ หมายถึง พอลิแซ็กคาไรด์ และโปรตีนต่างๆ ปัจจุบันนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารใช้ความเข้มข้นน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับใช้เป็นสารให้ความหนืดหรือทำให้เกิดเจล เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสและใช้เป็นสารให้ความคงตัวแก่ผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บ เมื่อเทคโนโลยีการผลิตอาหารมีความหลากหลายมากขึ้น จึงจำเป็นต้องทราบว่าไฮโดรคอลลอยด์ชนิดใดมีคุณสมบัติอย่างไร เพื่อใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ หรือปรับปรุงให้คุณภาพของอาหารมีความคงตัวตลอดอายุการเก็บ (รุ่งนภา, 2547; Phillips และ Williams, 2000)

2.5.1 การใช้ประโยชน์ของไฮโดรคอลลอยด์

โดยการเลือกไฮโดรคอลลอยด์เพื่อทำให้เกิดความข้นหนืดในตัวอย่างจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่อไปนี้ เกรดความหนืด ปริมาณของกัมที่ต้องการเพื่อให้ได้ความหนืดเหมาะสมหรือได้ค่าความแข็งแรงของเจลที่ต้องการ ต้นทุน ความเป็นด่างของระบบ อุณหภูมิระหว่างการแปรรูปและเวลาที่อยู่ ณ แต่ละอุณหภูมิ อันตรกิริยา (interaction) กับส่วนประกอบอาหารอื่นๆ เนื้อสัมผัสที่ต้องการและความง่ายต่อการกระจายตัวกับเครื่องมือที่มีอยู่ (รุ่งนภา, 2547)

2.5.2 ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์

2.5.2.1 กัวร์กัม

โครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัมเป็นพอลิเมอร์สายยาวของกาแลคโตแมนแนนมีน้ำหนักโมเลกุล 220,000 – 250,000 ดาลตัน ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนสที่ต่อกันด้วยพันธะ β-(1-4) และมีแขนงของน้ำตาลกาแลคโตสหนึ่งโมเลกุลต่อทุกๆ 2 โมเลกุลของน้ำตาลแมนโนส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-(1-6) ดังภาพที่ 11 ทำให้อัตราส่วนของน้ำตาลแมนโนสต่อกาแล็กโตสเป็น 2 : 1 ทำให้กัวร์กัมสามารถไฮเดรตน้ำให้ความหนืดสูง และจะให้ความหนืดสูงสุดหลังจากไฮเดรตน้ำนาน 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิสูง (ต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส) ขึ้นจะสามารถละลายได้มากขึ้นและมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Fox, 1999)

กัวร์กัมจะใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว และช่วยอุ้มน้ำ ความหนืดของสารละลายกัวร์กัมจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ พีเอช เวลา ความเข้มข้น การกวน และขนาดของอนุภาค เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความหนืดของสารละลายกัวร์กัมจะเพิ่มขึ้นด้วย (นิธิยา, 2549)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 แซนแทนกัม

แซนแทนกัม ได้จากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ในกลุ่ม Xanthomonas ชนิดที่ใช้ผลิตในระดับอุตสาหกรรม คือ Xanthomonas compestris เป็นเฮเตอโรพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีน้ำตาลกลูโคส แมนโนส และกรดกลูคูโรนิก ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่อะซิติลร้อยละ 4.7 และกรดไพรูวิกประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำตาลกลูโคสต่อกับแมนโนสด้วยพันธะ β-1,4 และน้ำตาลแมนโนสที่เป็นสายแขนงต่อกับสายหลักด้วยพันธะ 1,2 และ 1,3 ส่วนกรดกลูคูโรนิกต่อกันด้วยพันธะ β-1,2 แสดงดังภาพที่ 12 สารละลายแซนแทนกัมให้ความหนืดสูงแม้ที่ความเข้มข้นต่ำ มีความคงตัวสูงต่อความร้อน ความหนืดของสารละลายแซนแทนกัมจะคงที่ ถึงแม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงในช่วง 0-100 องศาเซลเซียส และแสดงลักษณะการเป็นซูโดพลาสติกสูง คือความหนืดมีค่าลดลงมากเมื่อให้แรงเฉือนเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดตามระยะเวลา (Thixotropic) สมบัติการเป็นซูโดพลาสติกนี้เกิดจากโครงสร้างเฉพาะตัวของแซนแทนกัม เมื่ออยู่ในสารละลายแซนแทนกัมจะสร้างโครงสร้างร่างแหระหว่างโมเลกุลของแซนแทนมีโครงข่ายคล้ายเจล Weak net (Semi rigid conformation) เมื่อมีแรงมากระทำ เช่น เมื่อได้รับแรงเฉือนจากการกวน จะเปลี่ยนโครงสร้างจากไปเป็น Rod like conformation โดยแรงเฉือนจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่แบบชั่วคราวและผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ สมบัตินี้เป็นประโยชน์มากเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การกวน การขึ้นรูป การนวด การเท การเกิดโฟมและอิมัลชัน โดยช่วยลดแรงที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิตให้น้อยลง แซนแทนกัมไม่มีสมบัติเป็น Gelling agent แต่สามารถเกิด weak gel ได้ (Urlacher and Noble, 1999)

2.5.2.3 คาร์ราจีแนน

คาร์ราจีแนนเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ซึ่งชนิดที่ใช้ผลิตเป็นเกรดทางการค้า ได้แก่ Euchema cottonii และ E. spinosum มีโครงสร้างหลักเป็น Galactose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glycosidic linkage และเป็น Sulphated polysaccharides ซึ่งคาร์ราจีแนนยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีกหลายชนิดตามจำนวนและตำแหน่งของกลุ่ม Ester sulphate และจำนวน 3, 6 Anhydro-D-galactose (3, 6-AG) ได้แก่ Kappa, Iota และ Lambda ซึ่งคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิดนี้ประกอบด้วยโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำๆ กันหลายหน่วย Unit-B แสดง 1, 3-Linked galactoside ในขณะที่ Unit A แสดง 1, 4-Linked galactoside โดย Kappa แซนแทนกัม ประกอบด้วย 1, 3-Linked galactoside มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1, 4-Linked 3, 6-Anhydro-D-galactose (3, 6 AG) โดยมีสารตั้งต้นเป็น Nu-แซนแทนกัม ถ้ามีปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

anhydride จากการปิดวงเป็น 3, 6-anhydride มากถึง 28-35 เปอร์เซ็นต์ จะมีผลทำให้ไวต่อ โพแทสเซียมและมีความสามารถในการเกิดเจลถึงแม้จะมีการดัดแปรให้มี 3, 6-AG สูงที่สุด แต่อาจจะมีความแตกต่างกันที่จำนวนของซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 ใน 1, 3-Linked galactoside และกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 หรือ 6 ใน 1, 4-Linked galactoside จะทำให้คาร์ราจีแนนชนิด Kappa มีสมบัติแตกต่างกันไป Iota แซนแทนกัม ประกอบด้วย 1, 3-Linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1, 4-Linked 3, 6-AG มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 มีสารตั้งต้นเป็น Nu-แซนแทนกัม ความแตกต่างระหว่าง anhydride ในคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota คือจำนวนกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ใน 1, 4-Linked galactoside ของ Iota จะมีมากกว่า Kappa ประมาณ 25-50 เปอร์เซ็นต์ความไวต่อโพแทสเซียมลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้ได้เจลที่อ่อนนุ่ม แต่ถ้ามีซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 มากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ จะไวต่อแคลเซียม ส่วน Lambda แซนแทนกัม ประกอบด้วย 1, 3-Linked galactose ซึ่งมีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และ 1, 4-Linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 6 ซึ่งคาร์ราจีแนนชนิดนี้จะไม่เกิดการปิดวงเป็น 3, 6-AG จึงมีผลทำให้ไม่มีสมบัติในการเกิดเจล

2.6 การฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ท

2.6.1 การฆ่าเชื้อด้วยเครื่องรีทอร์ท

การฆ่าเชื้อด้วยเครื่องรีทอร์ท คือกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนในระบบไอน้ำภายใต้แรงดัน เป็นการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไรซ์ เป็นการให้ความร้อนแบบถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่จุดกึ่งกลางอาหาร เรียกว่า (cold spot) ในอาหารแต่ละประเภทจะมีจุดร้อนช้าที่แตกต่างกันตามประเภทของอาหารและการถ่ายโอนความร้อนของอาหาร (ปัณจ์ยศ, 2554) การฆ่าเชื้อด้วยการรีทอร์ทนิยมใช้ในการฆ่าเชื้ออาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิท โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อฆ่าเชื้อ *Clostridium botulinum* ที่เป็นเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค ที่สามารถเจริญได้ในสภาวะไร้อากาศ และสร้างสารพิษ botulinum toxin ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

มาตรฐานอาหารในภาชนะที่ปิดสนิท ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 355 พ.ศ.2556 กำหนดอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท หมายถึง อาหารที่ผ่านกรรมวิธีที่ใช้ทำลาย หรือ ยับยั้งการขยายพันธุ์ของจุลินทรีย์ด้วยความร้อนภายหลังหรือก่อนการบรรจุหรือปิดผนึก ซึ่งเก็บรักษาไว้ในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทที่เป็นโลหะหรือวัตถุอื่นที่คงรูปที่สามารถป้องกันมิให้อากาศภายนอกเข้าไปในภาชนะบรรจุได้ และสามารถเก็บรักษาไว้ได้ในอุณหภูมิปกติ หรือ อาหารในภาชนะบรรจุชนิดลามิเนต (laminate) ฉาบ เคลือบ อัดหรือติดด้วยโลหะหรือสิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นใด ซึ่งสามารถป้องกันมิให้ความชื้นหรืออากาศผ่านซึมเข้าภายในภาชนะบรรจุได้ในภาวะปกติ และสามารถเก็บรักษาไว้ได้ในอุณหภูมิปกติ โดยอาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิท ต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐาน ดังนี้

2.6.1.1 ไม่มีสี กลิ่น รส ที่ผิดไปจากปกติของอาหารนั้น

2.6.1.2 จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค โดยในอาหารสำเร็จรูปพร้อมบริโภค ไม่พบแซลโมเนลลา ใน 25 กรัม และไม่พบสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส 0.1 ใน 1 กรัม (cfu/g)

2.6.1.3 ไม่มีสารพิษจากจุลินทรีย์ในปริมาณที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

2.6.1.4 สารปนเปื้อนในอาหารในภาชนะบรรจุที่ไม่เป็นโลหะ

2.6.1.4.1 ตะกั่ว ไม่เกิน 1 มก./กก. เว้นแต่อาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อนตามธรรมชาติในปริมาณสูงให้มีได้ตามที่ได้รับเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

2.6.1.4.2 สารหนู ไม่เกิน 2 มก./กก

2.6.1.4.3 ปรอท ไม่เกิน 0.5 มก./กก สำหรับอาหารทะเลและไม่เกิน 0.02 มก./กก สำหรับอาหารอื่น

2.6.1.5 อาหารที่ผ่านกรรมวิธีให้ความร้อนภายหลังการบรรจุแล้วต้องไม่มีวัตถุกันเสีย

2.6.1.6 อาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (pH > 4.6) และค่า a_w > 0.85 ต้องไม่มีจุลินทรีย์ที่เจริญได้ในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิปกติ

2.6.1.7 อาหารที่มีความเป็นกรดด่าง < 4.6 ตรวจพบจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้คือ ไม่เกิน 1000 ต่ออาหาร 1 กรัม ตรวจพบยีสต์และราไม่เกิน 100 ต่ออาหาร 1 กรัม และไม่พบแบคทีเรียชนิดโคลิฟอร์ม หรือชนิดโคลิฟอร์มน้อยกว่า 3 ต่ออาหาร 1 กรัมโดยวิธี MPN

2.6.1.8 ผู้ผลิตอาหารชนิดที่มีความเป็นกรดต่ำ (pH > 4.6) และค่า a_w > 0.85 ต้องดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

2.6.1.8.1 ฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด (scheduled process) โดยให้ค่า F_0 (sterilizing value) ไม่ต่ำกว่า 3 นาที ซึ่งเพียงพอในการทำลายสปอร์ของเชื้อคลอสทริเดียม โบทูลินั่ม ทั้งนี้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดจะต้องมีการศึกษาทดสอบการกระจายความร้อนหรืออุณหภูมิภายในเครื่องฆ่าเชื้อและอัตราการแทรกผ่านความร้อนที่สภาวะเดียวกับผลิตภัณฑ์จริง ซึ่งศึกษาโดยผู้กำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อ (process authority)

2.6.1.8.1 เติมกรดเพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของอาหาร ไม่เกิน 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาช์

รีทอร์ทเพาช์ (Retort pouch) เป็นบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนตัวที่มีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถทนต่อความร้อนและความดันสูงได้ดี จึงเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท ซึ่งเป็นการใช้ความร้อนภายใต้ความดันสูง ดังนั้น ลักษณะของถุงรีทอร์ทเพาช์ทั่วไปจะประกอบด้วยวัสดุหลายชั้น (ตั้งแต่ 3–5 ชั้น) ยกตัวอย่างเช่น Polyester (PET) ที่ให้ความแข็งแรง และทนต่อรอยขีดข่วน Aluminium foil ที่ช่วยป้องกันแสงและออกซิเจนโดย และ Modified polyolefin, Modified polyamide (Nylon 6) หรือ Cast polypropylene: ที่ช่วยในการปิดผนึก และเพิ่มความยืดหยุ่น โดยแต่ละชั้นมีการเคลือบติดกันด้วยกาวชนิดพิเศษที่มีความเหนียวสูงและสามารถทนต่อแรงดันในหม้อฆ่าเชื้อได้ดี คือ กาวประเภท Polyester isocyanate อย่าง Toluene diisocyanate

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดวงกมล และปารเมศ (2564) ทำการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมสำหรับเด็กที่มีอาการแพ้นมวัวในช่วงอายุไม่เกิน 10 ปี โดยทำการเก็บข้อมูลผ่านผู้ปกครองที่ดูแลอาหารให้เด็กอายุไม่เกิน 10 ปี ใช้วิธีการเก็บข้อมูลแบบผสม โดยมีการสัมภาษณ์ และการทำแบบสอบถาม กับผู้ปกครองที่เจาะจงจำนวน 12 ท่าน จากการสัมภาษณ์ทำให้ผู้ทดลองจึงเลือกเก็บข้อมูลชนิดของอาหารที่เจาะจงเป็นเวเฟอร์ธัญพืช จากนั้นจึงทำแบบสอบถามเกี่ยวกับเวเฟอร์กับผู้ปกครองของเด็กที่มีอายุต่ำกว่า 10 ปี ที่อาศัยอยู่ในประเทศไทย จำนวน 400 ชุด ได้ผลการศึกษาว่า ลักษณะขนมเวเฟอร์ธัญพืชที่เป็นที่ต้องการสามารถแบ่งได้เป็น 11 ประเภท อันได้แก่ ลักษณะสำคัญของขนม ส่วนประกอบที่ห้ามใช้ในการผลิต สารอาหารเสริม รูปทรงของขนม สีของขนม รสชาติของขนม คุณลักษณะอื่น ๆ ของขนม ชนิดวัสดุของบรรจุภัณฑ์ ลักษณะบรรจุภัณฑ์ รูปลักษณ์บรรจุภัณฑ์ และข้อมูลบรรจุภัณฑ์

พริมา และคณะ (2566) การศึกษาผลของกระบวนการทางอาหารต่อความเป็นสารก่อภูมิแพ้ในกุ้งแชบ๊วย โดยเทคนิคทางโปรตีโอมิกส์ได้มีการวิเคราะห์ความเป็นสารก่อภูมิแพ้ของโปรตีนในกุ้งแชบ๊วย ทั้งในกุ้งแชบ๊วยสดและกุ้งแชบ๊วยที่ผ่านกระบวนการการปรุงด้วยแรงดันไอน้ำ และผ่านคลื่นอุลตร้าโซนิค โดยการใช้เทคนิคโพลีอะคริลาไมด์เจลอิเล็กโทรฟอรีซิสแบบมีเอสดีเอส (SDS-PAGE) โพลีอะคริลาไมด์เจลอิเล็กโทรฟอรีซิสแบบสองมิติ (2D-PAGE) และการทำ immunoblot โดยการใช้ซีรั่มจากผู้ป่วยที่มีประวัติภูมิแพ้กุ้งจำนวน 12 คน และบ่งชี้โปรตีนด้วยเทคนิค tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) ผลจากการทดลองพบแถบโปรตีนที่ก่อให้เกิดอาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกุ้งแชบ๊วยที่ผ่านกระบวนการการปรุงด้วยแรงดันไอน้ำ และผ่านคลื่นอุลตร้าโซนิค โดยการใช้เทคนิคโพลีอะคริลาไมด์เจลอิเล็กโทรฟอรีซิสแบบมีเอสดีเอส (SDS-PAGE) โพลีอะคริลาไมด์เจลอิเล็กโทรฟอรีซิสแบบสองมิติ (2D-PAGE) และการทำ immunoblot โดยการใช้ซีรั่มจากผู้ป่วยที่มีประวัติภูมิแพ้กุ้งจำนวน 12 คน และบ่งชี้โปรตีนด้วยเทคนิค tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) ผลจากการทดลองพบแถบโปรตีนที่ก่อให้เกิดอาการแพ้ทั้งหมด 8 แถบ และกระบวนการปรุงด้วยแรงดันไอน้ำ และผ่านคลื่นอุลตร้าโซนิคส่งผลให้เกิดโปรตีนที่เป็นสารก่อภูมิแพ้ชนิดใหม่คือ โปรตีน MHC, enolase และ GAPDH

พัชรพร และวันวิสาข์ (2561) ทำการศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีต่อสมบัติทางรีโอโลยีและทางเนื้อสัมผัสของเนื้อมังสวิรัติที่เตรียมจากถั่วเหลือง โดยทำการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเนื้อมังสวิรัติด้วยเครื่องเอ็กทรูซ์ชั่น และศึกษาปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ 5 ชนิด คือ กัวร์กัม (G), แซนแทนกัม (C) แซนแทนกัม (X), แป้งไฮดรอกซี่โพรพิวสตาร์ท (HPS) และแป้งมันสำปะหลังชนิดดัดแปรชนิดครอสลิงค์ (CLS) ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ที่ใช้แทนกลูเตนในสูตรเนื้อมังสวิรัติจากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเนื้อมังสวิรัติ คือ ความเร็ว 50 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในกระบวนการ 30 นาทีและการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ทดแทนกลูเตนในเนื้อมังสวิรัติในอัตราส่วน 1 - 3 เปอร์เซ็นต์ของ G, C, HPS และ CLS ทำให้มีค่าความหนืด และค่าซูโดพลาสติกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเนื้อมังสวิรัติสูตรควบคุม ในเนื้อมังสวิรัติ พบว่าเมื่อสัดส่วนของไฮโดรคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ค่า Hardness, Springiness, Cohesiveness และ Gumminess ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ กัวร์กัม, คาร์ราจีแนน, แป้งไฮดรอกซีโพรพิสสตาร์ช และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดครอสลิงค์มากขึ้นทำให้ค่าคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสและความหนืดของเนื้อสัมผัสเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะเนื้อสัมผัส ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($P \leq 0.0$ 1) พบว่าอัตราส่วนของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมสำหรับ ทดแทนกลูเตน 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเนื้อมังสวิรัติในเนื้อมังสวิรัติมี 2 สูตร คือ เนื้อมังสวิรัติที่ประกอบด้วย 6 เปอร์เซ็นต์ คาร์ราจีแนน และ 1 เปอร์เซ็นต์ แซนแทนกัม และเนื้อมังสวิรัติที่ประกอบด้วย 6 เปอร์เซ็นต์ กัวร์กัม และ 1 เปอร์เซ็นต์ แซนแทนกัม

ซาฟียะห์ (2565) ทำการศึกษามะรุมโปรตีนพืชทางเลือกสำหรับผู้สูงอายุ.โดยทำการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาให้กับผู้สูงอายุที่มีปัญหาในการรับประทานเนื้อสัตว์จึงส่งผลถึงปริมาณโปรตีนที่ควรได้รับในแต่ละวันมีความไม่เพียงพอ แต่จากการศึกษาโปรตีนจากพืชพบว่ามะรุมเป็นพืชที่มีโปรตีนสูงกว่านมสดถึง 2 เท่า และยังมีกรดอะมิโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จำเป็นต่อร่างกายหลายชนิด ในต่างประเทศหลายประเทศได้มีการนำมะรุมมาผลิตโปรตีนทางเลือกให้กับผู้สูงอายุ และผู้ที่ต้องการโปรตีนในปริมาณที่เพียงพอ

ณฐิฆา (2565) ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากพืชเนื่องจากในปัจจุบันมีผู้บริโภคจำนวนมากที่มีอาการแพ้โปรตีนจากนมวัวจึงได้มีการศึกษานมทางเลือกที่ผลิตจากพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการ และมีโปรตีนสูง เช่น ถั่ว งา ข้าวโอ๊ต เป็นต้น อีกทั้งยังศึกษากระบวนการผลิตนมทางเลือกเพื่อให้ได้ลักษณะทางกายภาพของนมจากพืชที่ใกล้เคียงนมวัวที่สุดแต่ทั้งนี้เนื่องจากพืชมี รส กลิ่น ที่เฉพาะตัวในปัจจุบันนมจากพืชจึงยังไม่สามารถทดแทนนมวัวได้ในเรื่องของเนื้อสัมผัส กลิ่นรส และรสชาติ

หทัยชนก (2565) ทำการศึกษาไข่เทียมจากพืช.ที่ในปัจจุบันมีการผลิตโปรตีนจากพืชเพื่อทดแทนโปรตีนจากสัตว์ ด้วยหลายเหตุผล ทั้งเรื่องสุขภาพ การแพ้อาหาร หรือในเรื่องของความยั่งยืนในอาหาร เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าในปัจจุบันมีการศึกษาการทำไข่เทียมจากพืชที่เพิ่มมากขึ้น และมีการศึกษาคุณสมบัติของพืชบางชนิดที่สามารถนำมาใช้แทนไข่ เช่น การเกิดเจล การเกิดโฟม และการเกิดอิมัลชัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตอาหาร และขนมที่มีส่วนประกอบของไข่

ปาลิตา และกุลธิดา (2563) ทำการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์กะปิจากพืชให้เหมาะสมกับกลุ่มผู้สูงอายุ โดยศึกษาจากลุ่มผู้สูงอายุ (อายุ 60 ปีขึ้นไป) จำนวน 100 คน พบว่าหลายคนมีโรคความดันสูง และมีผู้แพ้อาหารทะเล ซึ่งกะปิที่ผลิตจากเคยมีปริมาณโซเดียมสูง และเป็นอาหารทะเล จึงได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์กะปิจากพืชเพื่อแก้ปัญหา จากการศึกษาการผลิตกะปิจากพืชพบว่า ถั่วเหลืองหมักที่มีปริมาณโปรตีนสูงแล้วนั้นหลังจากผ่านกระบวนการหมักแล้วยังให้คุณลักษณะที่คล้ายคลึงกับกะปิจากเคย ทั้งกลิ่นรส และการนำไปใช้ โดยปริมาณถั่วเหลืองหมักที่ใช้ในกระบวนการหมักกะปิที่ผู้บริโภคยอมรับ คือ 12 เปอร์เซ็นต์ ในการหมักกะปิที่มีการใช้เชื้อ *Aspergillus* sp. หรือ *Bacillus* sp ส่งผลให้กะปิมีรสชาติที่ดีกว่า และมีความเค็มน้อยกว่ากะปิที่หมักด้วยวิธีดั้งเดิม ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักไม่ส่งผลใดๆต่อปริมาณโซเดียมในกะปิ แต่มีผลในเรื่องของสี เนื่องจากมีค่า Browning index ที่เพิ่มมากขึ้น และมีกลิ่นเพิ่มขึ้น

Kasemsuwan และคณะ (2022) ทำการศึกษาผลของการแทนที่ฟลาวร์ข้าวสาลีด้วยฟลาวร์พืชทนแล้งต่อพฤติกรรมการเกิดเพสต์สมบัติของขนมปัง และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของขนมปังในระหว่างการเก็บรักษา โดยการใช้ถั่ว 3 ชนิดในการทดแทนแป้งสาลีได้แก่ ลูกเดือย ข้าวฟ่างมิลเล็ต และถั่วลูกไก่ โดยมีการศึกษาระดับการแทนที่ฟลาวร์ข้าวสาลีด้วยฟลาวร์พืชทนแล้ง 3 ระดับ คือ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนมปังที่เติมฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาวร์พืชทนแล้งกลับมีค่าการคืนรูปและการเกาะติดใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมในระหว่างการเก็บรักษา สำหรับการติดตามการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช พบว่าขนมปังที่เติมฟลาวร์พืชทนแล้งมีปริมาณสตาร์ชที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมโดยปริมาณสตาร์ชที่ละลายน้ำได้มีค่าลดลงเมื่อระดับการแทนที่ของฟลาวร์พืชทนแล้งเพิ่มขึ้น

Panaporn.และ Sanida (2021) ทำการศึกษาวีแกนชิคพีพุดดิ้ง มีการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถั่วชิกพีและน้ำสำหรับการผลิตพุดดิ้งนมถั่วลูกไก่ ศึกษาความแตกต่างของสารให้ความคงตัวที่มีผลต่อคุณภาพของพุดดิ้งนมถั่วลูกไก่ และศึกษาผลของความแตกต่างสารให้ความคงตัวที่มีผลต่อคุณภาพของพุดดิ้งถั่วลูกไก่ พบส่วนผสมในอัตราส่วนถั่วลูกไก่ต่อน้ำที่อัตราส่วน 1:6 และพบว่าโปรตีนในพุดดิ้งถั่วลูกไก่มีมากกว่าปริมาณโปรตีนในพุดดิ้ง และจากการศึกษาชนิดและปริมาณสารให้ความคงตัวพบว่าชนิดและปริมาณของสารให้ความคงตัวไม่มีผลต่อโปรตีนของผลิตภัณฑ์

Raikos และคณะ (2020) ทำการศึกษาการนำ อะควาฟาบา จากถั่วชิกพีกระป๋องมาใช้ทดแทนไข่ในการผลิตมายองเนสมังสวิรัติ เพื่อพัฒนาคุณภาพของมายองเนสมังสวิรัติ และอายุการเก็บรักษาของมายองเนสมังสวิรัติ โดยทำการศึกษาโดยการนำ อะควาฟาบา มาทดแทนไข่ในส่วนผสมของมายองเนส ในอัตราส่วน อะควาฟาบา(A) กับน้ำมัน (O) เพื่อหาสูตรที่เหมาะสม คือ อะควาฟาบา 15 – 25 เปอร์เซ็นต์ และน้ำมัน 80 – 70 เปอร์เซ็นต์ อควาฟาบา มีความสามารถในการสร้างอิมัลชันที่เสถียรโดยมีค่าเฉลี่ยของการกระจายตัวต่ำกว่า 4 μm จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่าง A/O ในช่วง 21 วันที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C ไม่มีผลกระทบต่อค่าความคงตัวทางกายภาพ (Turbiscan Stability Index (TSI)) อัตราส่วนที่มีค่าการกระจายตัวต่ำสุดคือ อัตราส่วน A/O 15/80 เปอร์เซ็นต์ และจากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความแน่น แรงยึดเกาะ และค่าความยึดเกาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่ออัตราส่วน A/O เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความสม่ำเสมอ ค่าความคงตัวออกซิเดชันของน้ำมันยังคงไม่ได้รับผลกระทบในระหว่างการเก็บรักษา อะควาฟาบา สามารถใช้ทดแทนไข่ในสูตรมายองเนสที่มีน้ำมันในระดับมาตรฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Tufaro และ Cappa (2023) ทำการศึกษาคุณสมบัติของน้ำต้มถั่วลูกไก่ หรือ อะควาฟาบา (AF) เพื่อประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนม โดยใช้เปรียบเทียบกันกับไข่ขาว ในการผลิตเมอร์แรงค์ในการทดลองมีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ กัวร์กัม (GG; 1 เปอร์เซ็นต์ ของ AF) และกรดแลคติค (LA; ลงไปถึง pH 4) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเกิดฟอง และความคงตัวของ AF การเติม GG ช่วยเพิ่มความคงตัวของโฟม และความแข็ง และในขณะที่ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกรดเพิ่มขึ้นสองเท่าจากการเติม LA ทำให้เกิดความคงตัวของการเกิดฟอง ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังทำการศึกษา คุณสมบัติทางเทคโนโลยีของเมอแรงค์โดยใช้สารทำฟองและน้ำตาลซูโครส (อัตราส่วน 1:1.64 w/w) ที่แตกต่างกัน การมีไฮโดรคอลลอยด์ทำให้มีความหนาแน่นของแป้งวิปปิ้งสูงสุด และการสูญเสียการอบต่ำที่สุด ในทางกลับกัน การทำให้เป็นกรดช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของ AF ในแง่ของความสูงของเมอแรงค์ การศึกษานี้พิสูจน์ให้เห็นว่า AF ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ เหลือทิ้ง มีคุณสมบัติทางเทคโนโลยีที่น่าสนใจ และมีปรับปรุงด้วยการเติมไฮโดรคอลลอยด์ GG และ LA เพื่อนำไปใช้ในอาหารจากพืชได้

Ozcan, และคณะ (2023) ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ คุณภาพ และรีโอโลยีของมายองเนสที่มีอะคาวาฟาบาเป็นส่วนประกอบแทนไข่โดยทำการศึกษาการใช้อะคาวาฟาบาในอัตราส่วนต่างๆ (25 เปอร์เซ็นต์, 50 เปอร์เซ็นต์, 75 เปอร์เซ็นต์, 100 เปอร์เซ็นต์) แทนไข่แดงต่อคุณสมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง และการไหลของมายองเนส พารามิเตอร์การวิเคราะห์ แรงเฉือนแบบออสซิลเลตอรี่ และมีการประเมินเพื่อหาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของตัวอย่างมายองเนส พบว่าขนาดหยดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และความคงตัวของอิมัลชันลดลง หลังจากอัตราส่วนการแทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นของมายองเนสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มการทดแทนอะคาวาฟาบา ตามเส้นโค้งของ Lissajous การแทนที่ไข่แดงด้วย อะคาวาฟาบา นำไปสู่ค่าความเครียดลดลง อะคาวาฟาบา ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง และทำให้พลังงานที่กระจาย และกักเก็บ แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของตัวอย่างคือความเครียด และแรงเฉือนให้น้อยลงในบริเวณที่ไม่เชิงเส้น พารามิเตอร์พื้นผิวลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของอคาวาฟาบา สังเกตความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับค่า L*, a*, b* และ ΔE

He และคณะ (2021) ทำการศึกษาการใช้ อะคาวาฟาบา เป็นสารเติมแต่งเชิงรีโอโลยีจากพืชชนิดใหม่สำหรับการใช้งานด้านอาหาร โดยบทความนี้นำเสนอภาพรวมของส่วนประกอบของอะคาวาฟาบา คุณสมบัติการทำงาน โอกาส และความท้าทายที่เกี่ยวข้องกับการใช้อะคาวาฟาบาในสูตรอาหาร การค้นพบและข้อสรุปที่สำคัญ: อะคาวาฟาบา ประกอบด้วยน้ำ (92–95 เปอร์เซ็นต์) และวัตถุแห้ง (5–8 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งรวมถึงคาร์โบไฮเดรต (เช่น น้ำตาล เส้นใยที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ) โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (0.95–1.5 เปอร์เซ็นต์ w/v; ≤ 24 kDa), ซาโปนิน และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา Maillard บางชนิด การวิจัยเมื่อเร็วๆ นี้เปิดเผยผลเชิงบวกของอคาวาฟาบาต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของอาหาร รวมถึงลูกกวาด ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่ปราศจากไข่/กลูเตน และมายองเนส มีความสนใจเพิ่มขึ้นในการผลิตอคาวาฟาบาเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีความพยายามมากขึ้นในการทำความเข้าใจเงื่อนไขที่ส่งผลต่อการทำงานของอคาวาฟาบา และเพื่อพัฒนาแนวทางเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิต อคาวาฟาบาในเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stasiak และคณะ (2023) ทำการศึกษาศักยภาพของ อะควาฟาบา ในฐานะสารเติมแต่งโครงสร้างในเทคโนโลยีอาหารจากพืช อะควาฟาบา ปัจจุบัน อะควาฟาบา เป็นที่นิยมอย่างมากในการทดแทนไขในอาหารมังสวิรัติ องค์ประกอบทางเคมีของอะควาฟาบาขึ้นอยู่กับชนิดของพืชตระกูลถั่ว และพารามิเตอร์ในระหว่างการผลิต เช่น เวลาในการปรุงหรือสัดส่วนของน้ำต่อเมล็ด อะควาฟาบา เริ่มถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้นในเทคโนโลยีอาหารเช่นกัน เนื่องจากคุณสมบัติการจัดรูปทรงพื้นผิวที่เป็นนวัตกรรมใหม่ คุณสมบัติ การเกิดฟอง อิมัลซิไฟเออร์ การเกิดเจล และความข้นของอควาฟาบาสามารถใช้ในสูตรอาหารจากพืชจนถึงขณะนี้มีการใช้อควาฟาบา ในการผลิตเมอแรงค์ เค้ก คุกกี้ ขนมปัง แครกเกอร์ และผลิตภัณฑ์ทดแทนนมมังสวิรัติ วัตถุดิบนี้ใช้สำหรับการผลิตอาหารแคลอรีต่ำและสำหรับผู้ที่รับประทานอาหารที่ไม่มีไข่ บางทีศักยภาพของผลิตภัณฑ์นี้อาจมีมากกว่า การใช้ของเสียจากพืชตระกูลถั่วจะเป็นคำตอบจากผู้ผลิตอาหารถึงความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งการปกป้องสิ่งแวดล้อมหรือเทรนด์ฉลากสะอาดมีความสำคัญ อย่างยิ่ง ในการใช้อควาฟาบาในเทคโนโลยีอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องสร้างมาตรฐานกระบวนการผลิตและดำเนินการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับศักยภาพของการใช้พืชตระกูลถั่วอื่นๆ

Alsalman และคณะ (2020) ทำการศึกษาการประเมิน และการเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติเชิงหน้าที่และโภชนาการของอะควาฟาบา และนำมาใช้ทดแทนไขในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ในการศึกษานี้ได้รวมการออกแบบการทดลองส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาใช้ในการต้มถั่วลูกไก่ อัตราส่วนถั่วชิกพีต่อน้ำปรุงอาหาร 1 : 2, 1 : 4 และ 2 : 3 และเวลาในการปรุง 15, 30, 45 และ 60 จากการทดลองพบว่าทั้ง อัตราส่วนระหว่างถั่วลูกไก่กับน้ำและเวลาในการปรุงอาหารมีผลอย่างมากต่อการตอบสนอง คุณสมบัติของอิมัลชันสูงสุดที่ 2 : 3 และเวลาในการปรุง 60 นาที ความสามารถในการเกิดฟองสูงสุดที่อัตราส่วน 2 : 3 และเวลาในการปรุง 30 นาที ในขณะที่โฟมมีความเสถียรมากที่สุดที่อัตราส่วน 1 : 2 และเวลาในการปรุง 45 นาที ความสามารถในการกักเก็บน้ำถึงระดับสูงสุดเมื่อปรุงเป็นเวลา 15 นาที และได้รับความสามารถในการกักเก็บน้ำมันได้สูงสุดหลังจากการปรุงอาหาร 60 นาที แบบจำลองพหุนามได้รับการพัฒนาสำหรับการตอบสนองทั้ง 11 แบบ ได้ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้ อัตราส่วน 1.5 : 3.5 และเวลาทำอาหาร 60 นาที

Ward และ Andon (2002) ศึกษาเกี่ยวกับกัมที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบและผลิตภัณฑ์จากธัญพืช ซึ่งช่วยในเรื่องของ Film former, Adhesive และ Gelling agent พบว่า แซนแทนกัมมีความคงตัวที่อุณหภูมิสูงเป็นข้อดีใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ทำให้เกิดเจลที่มีความยืดหยุ่นดีขึ้นและเพิ่มความคงตัวในกระบวนการ Freeze-thaw โดยผลิตภัณฑ์ขนมอบเติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.1-0.15 จะมีการยึดติดกับน้ำที่ดี

ณัฐธิดา และคณะ (2554) ได้ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์และความชื้นของส่วนผสมต่อคุณภาพของอาหารเช้าชนิดแผ่นจากแป้งข้าวกล้องงอก พบว่า ปริมาณความชื้นและปริมาณแซนแทนกัมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ ค่าน้ำอิสระในอาหาร (Water activity, a_w) การดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าการละลายแนวโน้มลดลง โดยปริมาณความชื้นของส่วนผสมก่อนอบที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้ค่าความแข็งและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ลดลง และปริมาณแซนแทนกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น

พัชรพร ศรีชัยนาท (2561) ได้ทำการศึกษาการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ทดแทนกลูเตนในการผลิตเนื้อมังสวิรัติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเนื้อมังสวิรัติด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น ไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้มี 3 ชนิด คือ กัวร์กัม (G) แซนแทนกัม (X) แซนแทนกัม (C) แป้งไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช (HPS) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดครอสลิงค์ (CLS) ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) และทำการวัดค่าลักษณะทางเนื้อสัมผัสคือค่าความแน่นเนื้อ (Hardness) ค่าความเหนียว (Gumminess) และค่าการเคี้ยว (springiness) พบว่าเมื่อมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ G, C, HPS และ CLS ที่ความเข้มข้น 1-3 เปอร์เซ็นต์ แทนกลูเตนส่งผลให้เนื้อมังสวิรัติมีความหนืด และความเป็นซูโดพลาสติกเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนไฮโดรคอลลอยด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เนื้อมังสวิรัติมีค่าลักษณะทางเนื้อสัมผัสลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมสำหรับทดแทนกลูเตนในเนื้อมังสวิรัติมี 2 สูตร คือ สูตรที่มีการใช้ 6 เปอร์เซ็นต์ของแซนแทนกัม ร่วมกับ 1 เปอร์เซ็นต์ของแซนแทนกัม และสูตรที่มีการใช้ 6 เปอร์เซ็นต์ของ กัวร์กัม ร่วมกับ 1 เปอร์เซ็นต์ของแซนแทนกัม

ธีรารัตน์ และวิชมณี (2562) ทำการศึกษาการผลิตสาหร่ายพวงองุ่นพร้อมบริโภคในรีทอร์ตเพาช์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาสาหร่ายพวงองุ่นในพื้นที่ โดยทำการศึกษาสภาวะในการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องรีทอร์ท ทำการหาค่า F_0 เพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะ และมีการศึกษาอายุการเก็บรักษาของสาหร่ายพวงองุ่นพร้อมบริโภคเป็นเวลา 3 เดือน จากการทดลองพบว่า ความร้อนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อส่งผลกับสีของสาหร่ายพวกองุ่น และอายุการเก็บรักษาพบว่าเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องรีทอร์ทแล้วสาหร่ายพวงองุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านเชื้อจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไผ่แดง และคณะ (2566) ทำการศึกษาผลของกระบวนการฆ่าเชื้อด้วย ความร้อนต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อตุ๋นในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์ ทำการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อที่ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยค่า F_0 ที่ระยะเวลา 9, 12 และ 15 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีลักษณะทางเนื้อสัมผัส ได้แก่ ค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น ความเหนียว และความทนต่อการเคี้ยว มีค่าลดลงเมื่อค่า F_0 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสี L* a* และ b* มีค่าลดลงเมื่อ F_0 เพิ่มขึ้น จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ฆ่าเชื้อด้วย F_0 เท่ากับ 12 มีคะแนนความชอบสูงที่สุด

อรัชพร และ สุธีรา (2566) ทำการศึกษาการผลิตภัณฑ์โจ๊กไข่ขาวผสมข้าวพร้อมบริโภคบรรจุในถุงรีทอร์ทเพาซ์ โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อที่ 2 สภาวะคือ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 18 นาที และ ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส 31 นาที จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสส่งผลให้มีค่าความสว่าง (L) ของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลืองและค่าความเป็นสีแดงลดลง จากการฆ่าเชื้อทั้ง 2 สภาวะ พบว่าไม่มีปริมาณจุลินทรีย์เหลือรอด และมีค่า F_0 มากกว่า 4 เมื่อนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 18 นาที ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการ

3.1 วัสดุ อุปกรณ์

3.1.1 สำหรับวัตถุดิบหลักในการขึ้นรูปไข่เทียมทรงเครื่อง ได้แก่ แป้งมัน (ยี่ห้อ ปลาไทย) แป้วข้าวเจ้า (ยี่ห้อ ตราช้างสามเศียร) ซอสปรุงรส (ยี่ห้อ seasons) และผงปรุงรส (ยี่ห้อ bencha)

3.1.2 สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปไข่ทรงเครื่องมีดังนี้

3.1.2.1 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro System, TA.XT Plus, USA)

3.1.2.2 เครื่องทำแห้งแบบถาด Tray Dryer (Patch, OV 663, TH)

3.1.2.3 เครื่องรีทอร์ท

3.1.2.4 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Aqualab, 4TEXC, USA)

3.1.2.5 เครื่องบดละเอียด Pin Mill (Retsch, ZM1000, Ger)

3.1.2.5 เครื่องปั่นผสมอาหาร

3.1.2.6 แม่พิมพ์ซิลิโคนรูปไข่ขนาด 8.9 x 6 เซนติเมตร

3.1.2.7 รีทอร์ทเพาซ์ขนาด 12 x 14.5 เซ็นติเมตร

3.1.2.8 ถุงอลูมิเนียมฟอยด์

3.1.2.6 อุปกรณ์เครื่องแก้ว และเครื่องครัว

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนการศึกษาการผลิตไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้

3.2.1.1 การเตรียม อควาฟาบา

ดัดแปลงวิธีจาก Deborah และ Cappa (2023)

1) เตรียมถั่วลูกไก่โดยการล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำสะอาดให้ท่วม เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

2) เทน้ำที่แช่ถั่วลูกไก่ออก และล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง และตั้งให้สะเด็ดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ต้มถั่วลูกไก่กับน้ำกรองอัตราส่วนถั่วลูกไก่ ต่อ น้ำ เท่ากับ 1 : 1.5 (กรัม : กรัม)

4) ต้มถั่วด้วยไฟกลางเป็นเวลา 90 นาที

5) หลังต้มเสร็จทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นกรองเอาน้ำต้มที่ได้ใส่ภาชนะปิดสนิท เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.2.1.2 การเตรียมผงถั่วลูกไก่

นำถั่วลูกไก่ที่ผ่านการต้มและแยกน้ำแล้วจากข้อ 3.2.1.1 ทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบถาดด้วยเครื่อง Tray Dryer ยี่ห้อ Patch รุ่น OV 663, ประเทศไทย ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำถั่วลูกไก่ที่ผ่านการทำแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Pin Mill (ยี่ห้อ Retsch รุ่น ZM1000, ประเทศเยอรมนี) ที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อวินาที แล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 50 เมช บรรจุลงในถุงอลูมิเนียมฟอยด์

3.2.1.3 การเตรียมผลิตภัณฑ์ ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้

เตรียมส่วนประกอบสำหรับผลิตไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยผสมให้เข้ากันเพื่อนำไปใส่แม่พิมพ์ซิลิโคนรูปไข่ขนาด 8.9 x 6 เซนติเมตร จากนั้นนำไปนึ่งที่อุณหภูมิน้ำเดือดเป็นเวลา 25 นาที ปิดไฟ และทิ้งไว้ให้เย็น เพื่อรอให้ไข่เทียมเซ็ทตัวก่อนนำออกจากแม่พิมพ์ซิลิโคน เก็บในภาชนะปิดสนิท และแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบสำหรับไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมแพ้จากถั่วลูกไก่

วัตถุดิบต่อลูก	ปริมาณ (%)
น้ำกรอง	35.46
ผงถั่วลูกไก่	21.28
อคาวาฟาบา	21.28
แป้งมันสำปะหลัง	10.64
แป้งข้าวเจ้า	10.64
พริกไทย	0.35
ผงปรุงรสฟ้าไทยรสเห็ดหอม	0.18
เกลือ	0.18
รวมทั้งหมด	**100**

เมื่อผสมส่วนประกอบทั้งหมดตามตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสูตรพื้นฐานสำหรับไข่เทียมทรงเครื่อง โดยส่วนประกอบของสูตรนี้เกิดขึ้นจากการทดลองด้วยตนเอง เพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Box-Behnken design (BBD) ได้จำนวนรัน หรือสูตรทั้งหมด 43 สูตร ดังตารางที่ 3.2 โดยปัจจัยหลักที่ต้องการศึกษาทั้งหมดมี 5 ปัจจัย พร้อมกำหนดช่วงทดลอง ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ (A) 10 - 30% อควาฟาบา (B) 0 – 30%, แป้งมันสำปะหลัง (C) 0 – 15% แป้งข้าวเจ้า (D) 0 – 15% และน้ำกรอง (E) 40 – 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 จำนวนสูตรทั้งหมดของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยวิธี BBD

สูตร (Run)	ผงถั่วลูกไก่ (%)	อควาฟาบา (%)	แป้งมันสำปะหลัง (%)	แป้งข้าวเจ้า (%)	น้ำกรอง (%)
1	30.77	15.38	7.69	0.00	46.15
2	33.33	0.00	8.33	8.33	50.00
3	17.02	25.58	6.38	12.77	38.30
4	10.81	16.22	16.22	8.11	48.65
5	26.67	0.00	10.00	10.00	53.33
6	26.67	13.33	6.67	13.33	40.00
7	17.39	26.09	6.52	6.25	43.48
8	27.59	0.00	0.00	10.35	62.07
9	20.51	15.38	7.69	15.38	41.03
10	21.05	15.79	7.89	7.89	47.37
11	14.29	0.00	10.71	10.71	64.29
12	11.11	16.67	8.33	8.33	55.56
13	21.05	15.79	7.89	7.89	47.37
14	17.02	25.53	12.77	6.38	38.30
15	21.05	15.79	0.00	15.79	47.37
16	27.27	13.63	6.82	6.82	45.46
17	10.81	16.22	8.11	16.22	48.65
18	12.90	19.35	9.68	0.00	58.07
19	21.05	15.79	15.79	0.00	47.37
20	22.86	0.00	8.57	17.14	51.43
21	19.05	28.57	7.14	7.14	38.10
22	18.18	13.64	13.64	13.64	40.91
23	21.62	16.22	0.00	8.11	54.05
24	26.67	13.33	13.33	6.67	40.00
25	19.51	29.27	7.32	0.00	43.90
26	30.00	15.00	7.50	7.50	40.00
27	24.24	18.18	9.09	0.00	48.49
28	22.99	0.00	11.43	8.57	51.43
29	25.00	25.00	6.25	6.25	37.50
30	20.51	15.39	15.39	7.69	41.03

*** หมายเหตุ -** จำนวนสูตรทั้งหมดเกิดจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวางแผนการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken design (BBD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 จำนวนสูตรทั้งหมดของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยวิธี BBD (ต่อ)

สูตร (Run)	ผงถั่วลูกไก่ (%)	อควาฟาบา (%)	แป้งมันสำปะหลัง (%)	แป้งข้าวเจ้า (%)	น้ำกรอง (%)
31	30.77	15.39	0.00	7.69	46.15
32	12.50	18.75	9.38	9.38	50.00
33	21.62	16.22	8.11	0.00	54.05
34	23.53	0.00	8.82	8.82	58.82
35	21.05	15.79	7.89	7.89	47.37
36	11.43	17.14	0.00	8.57	51.43
37	19.1	29.27	0.00	7.32	43.90
38	27.59	0.00	10.35	0.00	62.07
39	24.24	18.18	0.00	9.09	48.48
40	10.00	30.00	7.50	7.50	45.00
41	18.60	13.95	13.95	6.98	46.51
42	25.00	18.75	0.00	0.00	56.25
43	18.60	13.95	6.98	13.95	46.51

*** หมายเหตุ -** จำนวนสูตรทั้งหมดเกิดจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวางแผนการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken design (BBD)

เมื่อนำไข่เทียมทรงเครื่องไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพในหัวข้อ 3.2.4 เรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Design Expert 13 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม และใกล้เคียงกับไข่ไทรงเครื่องมากที่สุด ก่อนนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ปริมาณน้ำอิสระ และปริมาณความชื้น เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่โปรแกรม Design Expert ได้คำนวณไว้ จากนั้นนำไข่เทียมทรงเครื่องไปปรับปรุงคุณภาพด้วยไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ กัวกัมร์ แซนแทนกัม และคาราจีแนน ในหัวข้อถัดไป (3.2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมด้วยไฮโดรคอลลอยด์

จากการศึกษาไข่เทียมทรงเครื่องในหัวข้อ 3.2.1 เพื่อคัดเลือกสูตรที่ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องที่สุดจากการปรับปรุงสูตรด้วยโปรแกรม Design-Expert และเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพไข่เทียมทรงเครื่องให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากยิ่งขึ้น จึงนำมาศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์ที่สามารถทนอุณหภูมิสูงสำหรับการรีทอร์ทได้ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน (Alavi และคณะ, 2018) โดยแบ่งเป็นตัวอย่าง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ประเภทเดียวจำนวนรัน หรือสูตรทั้งหมด 9 สูตร และกลุ่มที่ใช้โปรเกรม Design Expert 13 เพื่อวางแผนการทดลองด้วยวิธี Full Factorial Design (FFD) ได้จำนวนรัน หรือสูตรทั้งหมด 54 สูตร ซึ่งแบ่งออกเป็นกัวร์กัมผสมแซนแทนกัมจำนวน 9 สูตร กัวร์กัมผสมคาราจีแนนจำนวน 9 สูตร แซนแทนกัมผสมคาราจีแนนจำนวน 9 สูตร และผสมไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสามชนิดจำนวน 27 สูตร (ไม่รวมกับไข่ไทรงเครื่อง) โดยกำหนดปริมาณไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 – 5 % ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แล้วจึงทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี ลักษณะเนื้อสัมผัส ปริมาณน้ำอิสระ และคุณค่าทางโภชนาการ (3.2.4-3.2.5) เพื่อหาสูตรที่ใกล้เคียงไข่ทรงเครื่องมากที่สุดอีกครั้ง ก่อนนำไปประเมินทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ 3.3 จำนวนสูตรทั้งหมดของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์

สูตร (Run)	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)
การศึกษาไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียว			
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1
4	3	0	0
5	0	3	0
6	0	0	3
7	5	0	0
8	0	5	0
9	0	0	5
การศึกษาการใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม			
10	5	1	0
11	1	3	0
12	3	1	0
13	5	5	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 จำนวนสูตรทั้งหมดของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์

สูตร (Run)	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)
การศึกษาการใช้กัวร์กัม ร่วมกับ แซนแทนกัม (ต่อ)			
14	3	3	0
15	3	5	0
16	1	1	0
17	1	5	0
18	5	3	0
14	3	3	0
การศึกษาการใช้แซนแทนกัมร่วมกับคาราจีแนน			
19	3	0	5
20	3	0	1
21	5	0	3
22	3	0	3
23	1	0	1
24	5	0	1
25	5	0	5
26	1	0	3
27	1	0	5
28	0	1	3
29	0	1	1
30	0	3	3
31	0	5	3
32	0	3	5
33	0	5	1
34	0	5	5
35	0	3	1
36	0	1	5
การศึกษาการใช้ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกัน			
37	1	3	3
38	3	1	3
39	5	1	5
40	3	5	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 จำนวนสูตรทั้งหมดของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์

สูตร (Run)	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)
การศึกษาการใช้ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกัน (ต่อ)			
41	3	1	1
42	3	5	3
43	1	3	5
44	1	3	1
45	5	5	5
46	1	1	5
47	1	1	3
48	5	5	3
49	1	5	5
50	3	3	5
51	1	5	1
52	5	3	1
53	1	5	3
54	3	1	5
55	5	3	3
56	5	5	1
57	3	3	3
58	3	3	1
59	1	1	1
60	5	1	3
61	3	5	5
62	5	1	1
63	5	3	5

เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และคุณค่าทางโภชนาการเรียบร้อย จะถูกนำไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Design Expert 13 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม และใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุด ก่อนนำไข่ทรงเครื่องสูตรดังกล่าวไปศึกษาคุณภาพหลังผ่านการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ทในหัวข้อถัดไป (3.2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ขั้นตอนการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์หลังผ่านการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ท

3.2.3.1 การเตรียมไข่เทียมทรงเครื่องในรีทอร์ทเพาซ์

1) นำตัวอย่างใส่ในรีทอร์ทเพาซ์ขนาด กว้าง 12 เซ็นติเมตร ยาว 14.5 เซ็นติเมตร ถุงละ 1 ลูก จากนั้นไล่อากาศออกจากถุงแล้วปิดปากด้วยเครื่องซีลความร้อน

2) สำหรับตัวอย่างที่จะทำการวัดค่า F_0 เจาะรูไว้ที่ระดับ จุดกึ่งกลางของบรรจุภัณฑ์

3) เสียบสายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple Type T) ปลายสายวัดอุณหภูมิด้านในถุงเจาะทะลุผลิตภัณฑ์ไปยังตำแหน่งกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์แล้วทำการไล่อากาศและปิดผนึก

3.2.3.2 ขั้นตอนการฆ่าเชื้อ

1) นำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเตรียมและเสียบสายวัดอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ววาง ณ ตำแหน่งกลางหม้อฆ่าเชื้อ และวางตัวอย่างผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในตำแหน่งชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่าง ของหม้อฆ่าเชื้อ จากนั้นนำสายวัดอุณหภูมิต่อกับเครื่องบันทึก

2) ทำการฆ่าเชื้อที่ 115 องศาเซียลเซียส เป็นเวลา 38 นาที โดยทำการบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที บันทึกอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และหม้อฆ่าเชื้อตั้งแต่การให้ความร้อน (Heating)

3) การคงอุณหภูมิ (Holding) ตามเวลาที่กำหนดและเมื่อครบเวลาผลิตภัณฑ์จะถูกลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วด้วยการสเปรย์น้ำ (Cooling)

4) ควบคุมแรงดันภายในรีทอร์ทเพื่อป้องกันการปริหรือแตกของถุงรีทอร์ทเพาซ์ โดยเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ถูกลดลงไปถึงอุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 40 องศาเซลเซียสจึงนำออกจากหม้อฆ่าเชื้อ

5) ดึงข้อมูลออกจากโปรแกรมบันทึกการฆ่าเชื้อ เพื่อคำนวณเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้

เมื่อตัวอย่างทั้งหมดผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ท โดยมีขั้นตอนที่แสดงในหัวข้อ 3.2.3.1 และ 3.2.3.2 ตามลำดับ จะถูกนำไปตรวจสอบดังต่อไปนี้

- ลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี เนื้อสัมผัส และปริมาณน้ำอิสระ (หัวข้อ 3.2.4)
- การตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการด้วยวิธี AOAC 2012 (หัวข้อ 3.2.5)
- การประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีประเมินความชอบ (หัวข้อ 3.2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของไข่เทียมทรงเครื่อง

3.2.4.1 การตรวจสอบค่าสี

การวิเคราะห์ค่าสีดัดแปลงจากวิธีของ Pedreschi และคณะ (2560) วัดค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) จากนั้น นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความเข้มของสี (c) และค่าเฉดสี (h)

3.2.4.2 การตรวจสอบลักษณะทางเนื้อสัมผัส

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ดัดแปลงจากวิธีของ ดารารัตน์ (2553) โดยใช้ตัวอย่างไข่เทียมทรงเครื่องทั้งหมด 6 ลูกต่อตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA-XT2 ใช้หัววัดทรงกระบอกสูง (Cylinder Probe) แบบ P/5 ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) โดยตั้งค่าสภาวะการกด Pre-Test Speed 1 mm/sec, Test Speed 5 mm/sec และ Post-Test Speed 5 mm/sec มีค่า Strain เท่ากับ 75 % ใช้เวลารอก่อนการกดครั้งที่ 2 ทั้งหมด 5 วินาที รายงานผลเป็นความแข็ง (Hardness) ความสามารถในการยึดเกาะกันภายในชิ้นอาหาร (Cohesiveness) การคืนตัวของอาหาร (Springiness) พลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) และพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง (Chewiness)

3.2.4.3 การตรวจสอบปริมาณน้ำอิสระ

การวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำอิสระของไข่ทรงเครื่อง เริ่มโดยการบดด้วยเครื่องปั่น เพื่อนำไปชั่งตัวอย่างจำนวนละ 5 กรัม ลงในถ้วยสำหรับเครื่องวิเคราะห์ และนำเข้าเครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ รุ่น Aqualab 4TEV จากนั้นรายงานค่าตามจริง

3.2.5 การตรวจสอบทางโภชนาการ

การเตรียมตัวอย่าง และการตรวจสอบทางโภชนาการของไข่เทียมทรงเครื่อง อ้างอิงวิธีการจาก AOAC (2012) ที่แสดงรายละเอียดของขั้นตอนในภาคผนวก ก. ได้แก่วิธีการตรวจสอบปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เถ้า และเส้นใย

3.2.6 การประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี Hedonic Scale

การประเมินทางประสาทสัมผัสใช้วิธีการประเมินความชอบแบบ 9 - Point hedonic scale กำหนดหัวข้อในการประเมินในเรื่อง ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ประเมินแบบกึ่งฝึกฝน (Semi-trained panelist) จากนักศึกษา คณะอุตสาหกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จำนวน 30 คน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

สำหรับขั้นตอนการหาสูตรที่เหมาะสม และใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่อง (หัวข้อ 3.2.1) ใช้การวางแผนการทดลองโดยแบบ Box-Behnken design (BBD) และใช้การวางแผนการทดลองแบบ Full Factorial Design (FFD) ในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์ (หัวข้อ 3.2.2)

สำหรับการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ และทางโภชนาการ (หัวข้อ 3.2.3 และ 3.2.4 ตามลำดับ) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CCD) ใช้ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีกา Duncan's New multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics Version 21

สำหรับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี Hedonic Scale วางแผนการทดลองแบบบล็อคสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการ Duncan's New multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป IBMSPSS Statistics Version

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่

การศึกษาเพื่อพัฒนาการผลิตไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ หรือชื่อย่อไข่เทียทรงเครื่อง ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken design (BBD) และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) โดยปัจจัยหลักที่ต้องการศึกษาทั้งหมด 5 ปัจจัย พร้อมกำหนดช่วงทดลอง ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ (A) 10 - 30%, อควาฟาบา (B) 0 – 30%, แป้งมันสำปะหลัง (C) 0 – 15% แป้งข้าวเจ้า (D) 0 – 15% และน้ำกรอง (E) 40 – 50% ที่ทดลองปรับสูตรพื้นฐานมาจากการทดลองด้วยตนเอง โดยดัดแปลงวิธีการขึ้นรูปไข่เทียมทรงเครื่องด้วยอควาฟาบาแทนไข่แดง และแทนไข่ขาว (Deborah and Carola, 2023; Ipek et al., 2023) ร่วมกับการใช้ผงถั่วลูกไก่ที่ผ่านการต้ม และนำไปอบแห้งก่อนใช้งาน เพื่อคาดหวังการเสริมโปรตีนทดแทนไร้สารก่อภูมิแพ้ อีกทั้งคาดหวังว่าการใช้ผงถั่วลูกไก่ต้มอบแห้ง ร่วมกับอควาบา จะช่วยเสริมคุณสมบัติทางกายภาพในหลายด้าน เช่น ความแข็ง ความเหนียว และความยืดหยุ่น ซึ่งจำเป็นต่อการขึ้นรูปไข่เทียมทรงเครื่อง (Day, 2018; Ziarno et al., 2022) และส่วนของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และน้ำกรอง คาดหวังให้มีบทบาทในการช่วยเสริมการเกิดเจล ความข้นหนืด และช่วยคงรูปให้ผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปไข่ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้นำสูตรไข่เทียมทรงเครื่องจาก BBD มาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เพื่อเปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่องในหัวข้อต่อไป

4.1.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง

ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Analysis) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ประเมินคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์โปรตีนที่ต้องการอาศัยความแน่น ความยืดหยุ่น และคงรูปได้ดี เพื่อเลียนแบบลักษณะของผลิตภัณฑ์จากสัตว์อย่างไข่ทรงเครื่อง (Szczesniak, 2002) การตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสใช้ตัวแปรหลักทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) การคืนตัวของอาหาร (Springiness) ความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Cohesiveness) พลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) และพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง (Chewiness) ซึ่งมีบทบาทโดยตรงต่อความรู้สึกขณะเคี้ยว และการยอมรับของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้บริโภค (Bourne, 2002) โดยได้ทดลองพัฒนาสูตรไข่เทียมทรงเครื่องทั้งหมด 43 สูตร ด้วยการออกแบบการทดลอง BBD เปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่อง (Control, C) รวม 44 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง

สูตร	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
C	248.64±11.55	0.99±0.01	0.56±0.02	140.34±4.70	141.52±2.38
1	636.98±24.70	0.99±0.01	0.74±0.04	500.59±46.14	141.52±60.31
2	1193.16±10.35	0.98±0.01	0.63±0.02	742.55±32.40	141.52±390.51
3	901.97±1.76	0.99±0.01	0.75±0.03	681.93±25.88	141.52±18.91
4	1205.33±94.44	0.96±0.01	0.66±0.03	805.53±102.22	141.52±95.83
5	1266.01±31.67	1.00±0.00	0.68±0.05	886.65±53.72	141.52±52.39
6	1298.65±81.23	1.00±0.00	0.72±0.02	921.12±48.63	141.52±75.32
7	592.50±14.56	0.99±0.01	0.69±0.01	417.03±21.56	141.52±40.42
8	1062.24±60.62	1.09±0.19	0.69±0.01	716.39±49.17	141.52±110.01
9	1227.77±37.10	0.99±0.01	0.71±0.03	888.67±35.11	141.52±71.98
10	612.11±13.66	0.99±0.01	0.68±0.02	428.96±13.30	423.97±12.49
11	1019.08±25.59	0.98±0.01	0.64±0.03	754.00±60.11	879.97±319.75
12	577.42±214.64	0.97±0.01	0.73±0.07	386.53±157.25	370.43±148.02
13	721.32±6.95	0.99±0.01	0.70±0.03	494.31±28.40	493.51±26.96
14	734.60±8.95	0.98±0.01	0.66±0.01	485.69±7.59	473.43±5.86
15	1029.16±22.17	0.98±0.02	0.73±0.02	772.29±30.69	761.45±28.19
16	905.98±20.01	1.00±0.36	0.70±0.07	633.37±66.86	798.93±221.97
17	1721.49±131.02	0.98±0.01	0.67±0.01	1136.11±55.82	1112.20±56.80
18	390.51±3.62[j]	0.99±0.00	0.72±0.01	282.29±9.70	258.81±10.27

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง

สูตร	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
19	512.30±11.31	0.94±0.03	0.69±0.03	339.12±0.08	315.84±7.13
20	1273.58±404.52	0.98±0.02	0.70±0.03	830.01±315.86	808.15±307.03
21	528.36±58.27	0.98±0.02	0.71±0.02	349.90±7.65	369.05±48.26
22	1447.35±31.27	1.00±0.02	0.63±0.01	926.34±20.50	945.03±38.85
23	374.27±14.40	0.99±0.01	0.71±0.02	283.89±27.29	312.13±56.01
24	950.18±±35.53	0.99±0.00	0.65±0.01	636.81±10.60	630.04±11.99
25	247.30±±16.06	0.98±0.00	0.72±0.01	177.01±10.61	193.17±45.41
26	1100.13±17.27	0.96±0.01	0.65±0.04	756.62±90.63	756.72±130.42
27	407.43±17.82	1.01±0.02	0.69±0.02	295.45±17.86	279.97±13.57
28	1498.00±74.19	1.03±0.09	0.57±0.06	827.47±115.98	812.41±154.02
29	775.47±19.32	1.00±0.00	0.75±0.02	574.93±29.63	571.09±31.68
30	1061.81±15.77	0.99±0.01	0.67±0.02	708.87±21.84	696.23±24.96
31	826.93±23.49	1.01±0.05	0.67±0.02	580.44±7.63	587.64±46.26
32	716.62±62.74	0.98±0.01	0.70±0.05	400.95±62.97	401.16±48.08
33	315.02±13.01	1.00±0.02	0.66±0.02	229.64±12.28	210.10±8.84
34	1086.56±80.51	0.99±0.01	0.72±0.04	682.45±40.56	668.86±49.47
35	719.38±20.75	0.98±0.00	0.71±0.02	507.29±25.54	498.39±18.76
36	275.83±17.37	1.00±0.02	0.69±0.02	186.39±26.16	185.98±26.09
37	271.62±12.79	1.00±0.02	0.76±0.04	221.63±24.31	225.70±41.92

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการศึกษาคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง

สูตร	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
38	623.78±47.87	0.99±0.01	0.67±0.02	354.57±27.42	347.12±30.76
39	530.56±9.32	0.99±0.01	0.72±0.02	388.02±5.47	373.14±33.43
40	577.18±76.38	0.98±0.01	0.70±0.07	389.81±43.92	379.47±41.86
41	933.26±44.36g	0.96±0.01	0.68±0.04	691.62±85.18	669.40±76.37
42	169.93±6.36	0.97±0.01	0.61±0.02	102.66±2.95	99.35±6.62
43	1206.40±31.49	1.00±0.02	0.84±0.04	936.17±74.03	1066.24±277.96

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เครื่องหมายดอกจัน (*) คือ สูตรที่เหมือนกับไข่ทรงเครื่อง (C)

ค่าความแข็ง (Hardness) ของไข่ไก่ทรงเครื่อง (สูตร C) มีค่าเท่ากับ 248.64±11.55 g และไข่เทียมทรงเครื่องมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 169.93±6.36 ถึง 1721.49±131.02 g โดยที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุดในสูตร 42 เท่ากับ 169.93±6.36 g และมีค่าความแข็งมากที่สุดในสูตร 17 เท่ากับ 1721.49±131.02 g

ค่าการคืนตัวของอาหาร (Springiness) ของไข่ไก่ทรงเครื่อง (สูตร C) มีค่าเท่ากับ 0.99±0.01 และไข่เทียมทรงเครื่องมีค่าการคืนตัวของหารอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันตั้งแต่ 0.94 ถึง 1.00 โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Cohesiveness) ของไข่ไก่ทรงเครื่อง (สูตร C) มีค่าเท่ากับ 0.69±0.03 และไข่เทียมทรงเครื่องมีค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารอยู่ในช่วง 0.61±0.02 ถึง 0.84±0.04 โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ในสูตรที่ 42 เท่ากับ 0.61±0.02 และมีค่ามากที่สุดในสูตรที่ 43 เท่ากับ 0.84±0.04

ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) ของไข่ไก่ทรงเครื่อง (สูตร C) มีค่าเท่ากับ 140.34±4.70 และไข่เทียมทรงเครื่องมีค่าพลังงานการเคี้ยงกึ่งเหลวอยู่ในช่วง 102.66±2.95 ถึง 1136.11±55.82 โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ในสูตรที่ 42 เท่ากับ 102.66±2.95 และค่ามากสุดในสูตรที่ 17 เท่ากับ 1136.11±55.82

ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง (Chewiness) ของไข่ไก่ทรงเครื่อง (สูตร C) มีค่าเท่ากับ 141.52±2.38 และไข่เทียมทรงเครื่องมีค่าพลังงานการเคี้ยงอาหารแข็งอยู่ในช่วง 99.35±6.62 ถึง 1112.20±56.80 โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ในสูตรที่ 42 เท่ากับ 99.35±6.62 และมีค่ามากสุดอยู่ในสูตรที่ 17 เท่ากับ 1112.20±56.80

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ไข่เทียมทรงเครื่องสูตรที่ 17 มีคุณลักษณะทั้งหมด 4 ด้าน ได้แก่ ด้านค่าความแข็ง ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว และค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็งที่มีค่ามากสุด ในขณะเดียวกันสูตรที่ 42 มีคุณลักษณะดังกล่าวน้อยที่สุดทั้ง 4 ด้าน ($p \leq 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบจากการปรับส่วนผสมในสูตร

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของส่วนผสมในทั้งสองสูตรจากตารางที่ 3.2 เห็นได้ว่าสูตร 17 มีปริมาณผงถั่วลูกไก่/อคาฟาบา/แป้งมันสำปะหลัง/แป้งข้าวเจ้า/น้ำกรอง เท่ากับ 10.81/16.22/8.11/16.22/48.65% ตามลำดับ และสูตร 42 มีปริมาณผงถั่วลูกไก่/อคาฟาบา/แป้งมันสำปะหลัง/แป้งข้าวเจ้า/น้ำกรอง เท่ากับ 25.00/18.75/0.00/0.00/56.25% ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณผงถั่วลูกไก่ต่างกัน 14.19 % แป้งมะสำปะหลัง 8.11 % และแป้งข้าวเจ้า 16.22 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มปริมาณผงถั่วลูกไก่ในสูตร 42 ปริมาณ 14.19 % โดยที่ไม่ได้ใช้แป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง ทำให้สูตรนี้มีค่าความแข็งลดลง เนื่องจากโปรตีนจากผงถั่วลูกไก่ที่มีความสามารถในการสร้างพันธะข้ามโมเลกุล (cross-linking) ซึ่งปกติช่วยเสริมความแข็ง และความยืดหยุ่นของโครงสร้างอาหารได้ดี แต่การเพิ่มผงถั่วลูกไก่เพียงอย่างเดียวไม่ได้สามารถทดแทนคุณสมบัติของแป้งที่ช่วยเพิ่มความแข็ง และความเหนียวได้อย่างสมบูรณ์แบบ (Riaz และ Chaudry, 2017) นอกจากนี้ อะไมโลสจากแป้งข้าวเจ้า มีบทบาทช่วยเสริมความแข็งแรง และความสามารถในการยึดเกาะของไข่เทียมทรงเครื่องได้ดีขึ้นก็ถูกตัดออกไปจากสูตรนี้ (Juliano, B. O., 1985; Riaz & Chaudry, 2017)

ในขณะเดียวกัน สูตรที่ไม่มีแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้สูญเสียความสามารถในการดูดซับ และการเกิดเจลของไข่เทียมทรงเครื่อง ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น และความเหนียวในอาหาร ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารที่ลดลงตามไปด้วย (Tong, Z., และ Liu, R, 2015)

ดังนั้น จากการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง สามารถสรุปได้ว่า แม้บางสูตรที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกันกับไข่ทรงเครื่องไม่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบการขึ้นรูป แต่การผสมผงถั่วลูกไก่ และแป้งข้าวเจ้าในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถทดแทนบทบาทของแป้งมันสำปะหลังในการสร้างโครงสร้างเนื้อสัมผัส โดยเฉพาะค่าความแข็ง ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายใน และค่าพลังงานการเคี้ยว จึงกล่าวได้ว่า สมดุลของสัดส่วนวัตถุดิบในการขึ้นรูปอย่าง โปรตีน-คาร์โบไฮเดรต-น้ำ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.1.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ส่วนผสมหลักของไข่เทียมทรงเครื่อง

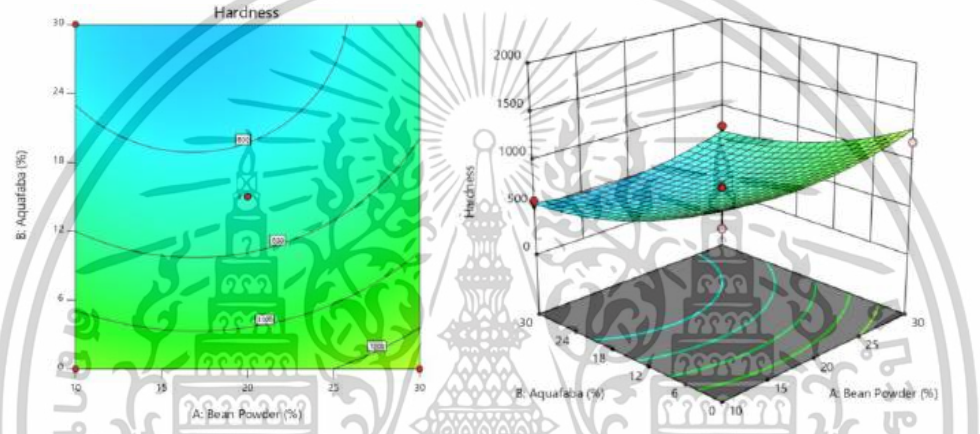
4.1.1.1.1 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าความแข็ง

ค่าสัมประสิทธิ์ คือ ตัวเลขที่แสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนวัตถุดิบแต่ละชนิด โดยค่าบวก หมายถึง แนวโน้มที่ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นส่วนค่าลบ แสดงแนวโน้มที่ทำให้ความแข็งลดลง ยิ่งค่าเหล่านี้มีค่ามาก ผลกระทบที่วัตถุดิบนั้นมีต่อความแข็งยิ่งชัดเจนมากขึ้น โดยจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงในภาคผนวก ตารางที่ ค.1 พบว่า วัตถุดิบที่มีค่าสัมประสิทธิ์บวก ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ (+78.79, P = 0.0074) แป้งมันสำปะหลัง (+237.64, P < 0.0001) และแป้งข้าวเจ้า (+459.35, P = 0.0601) ดังสมการต่อไปนี้

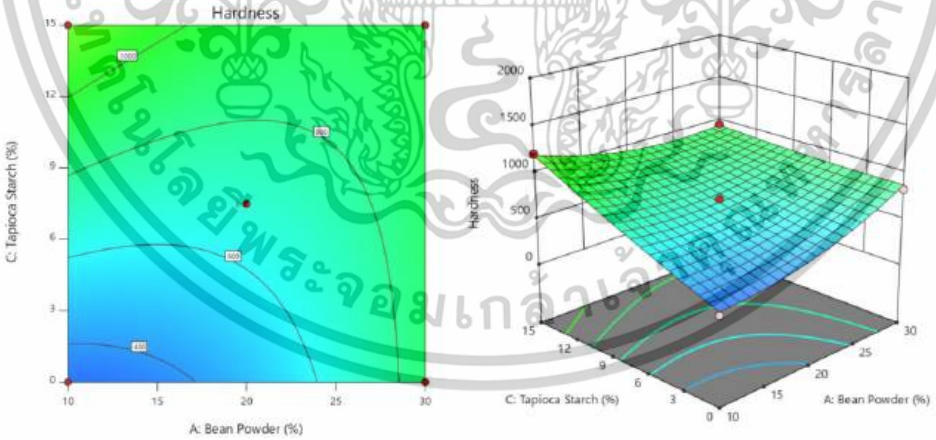
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของค่าความแข็ง = 684.27 + 78.79A - 312.28B + 237.64C + 459.35D - 52.95E + 6.05AB - 201.56AC - 153.16AD - 13.74AE + 6.8BC - 149.56BD + 60.9BE + 18.96CD + 6.93CE + 17.76DE + 125.32A^2 + 137.01B^2 + 22.75C^2 + 112.14D^2 + 18.31E^2

ซึ่งแนวโน้มเพิ่มค่าความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเฉพาะแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลังที่มีคุณสมบัติในการสร้างโครงสร้างเจล และเสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ (Juliano, 1985; Zhou et al., 2022) ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) ดังแสดงในภาพที่ 4.1a-j

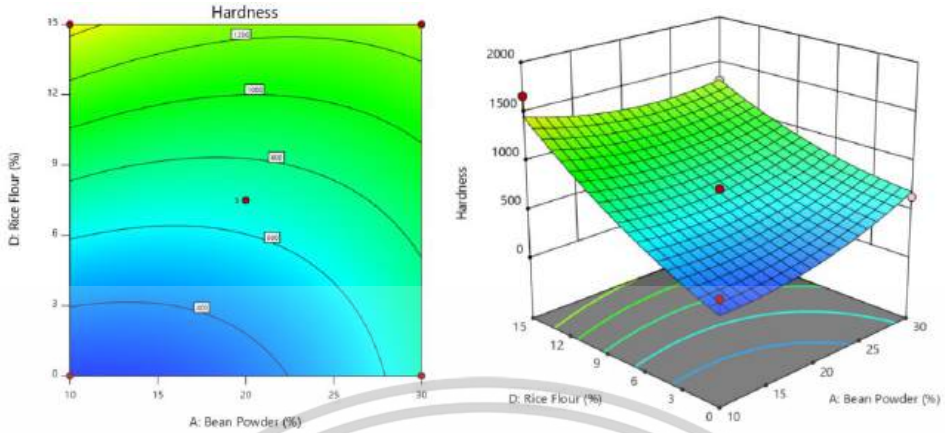


4.1a พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และอควาฟาบา (B) ต่อค่าความแข็ง

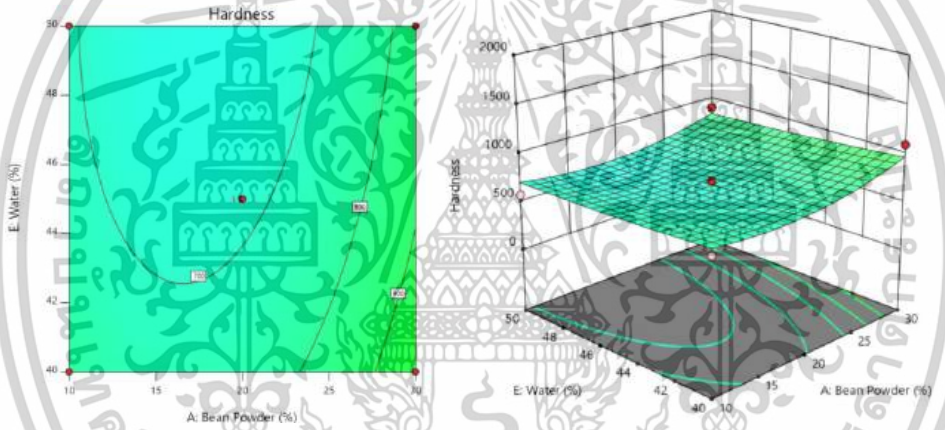


4.1b พื้นผิวตอบสนองของถั่วลูกไก่ (A) และแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าความแข็ง

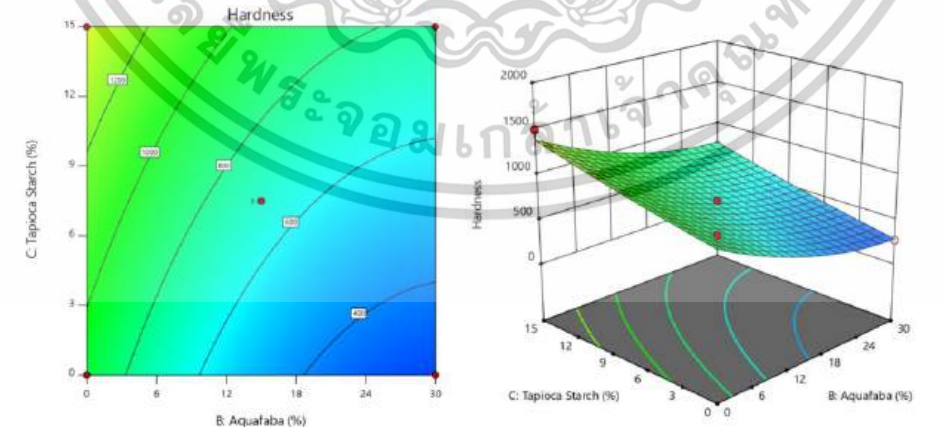
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.1c พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าความแข็ง

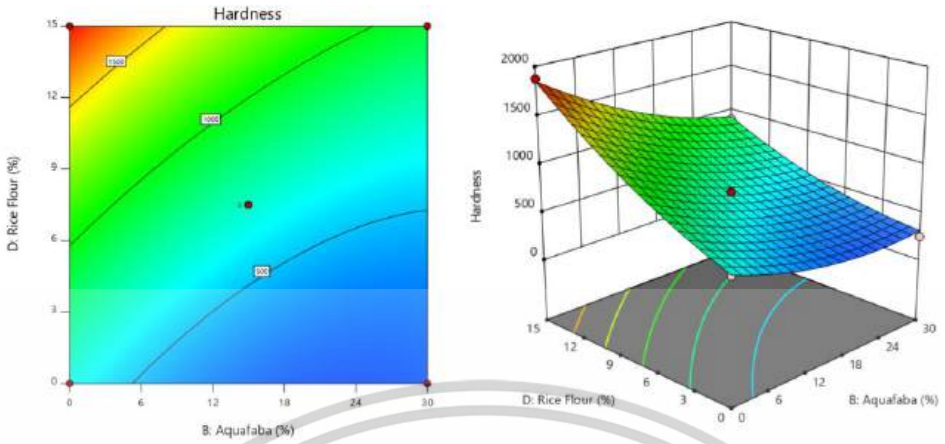


4.1d พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าความแข็ง

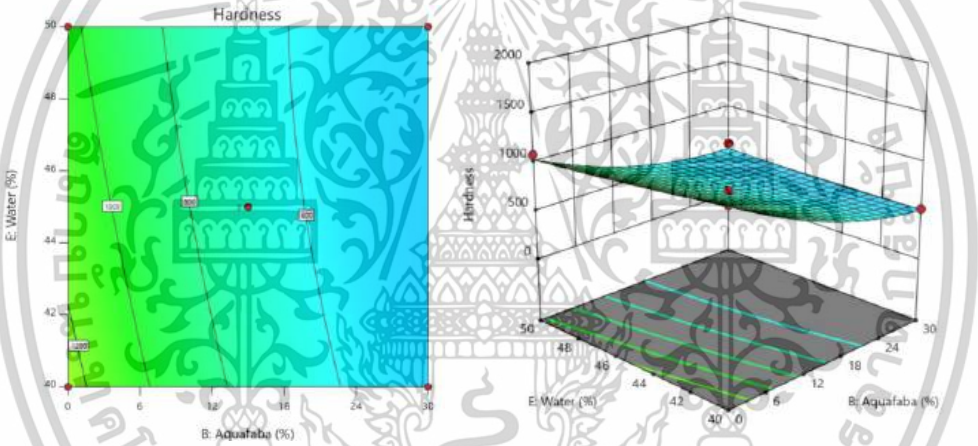


4.1e พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าความแข็ง

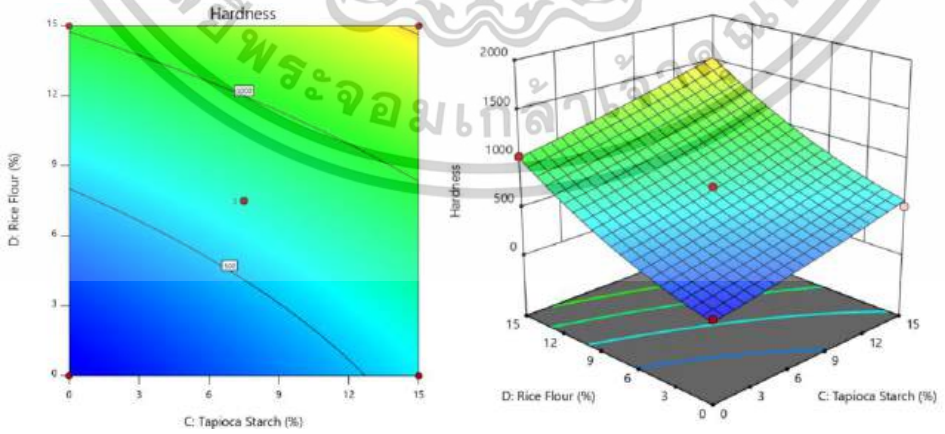
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.1f พื้นผิวตอบสนองของอความฟาบา (B) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าความแข็ง

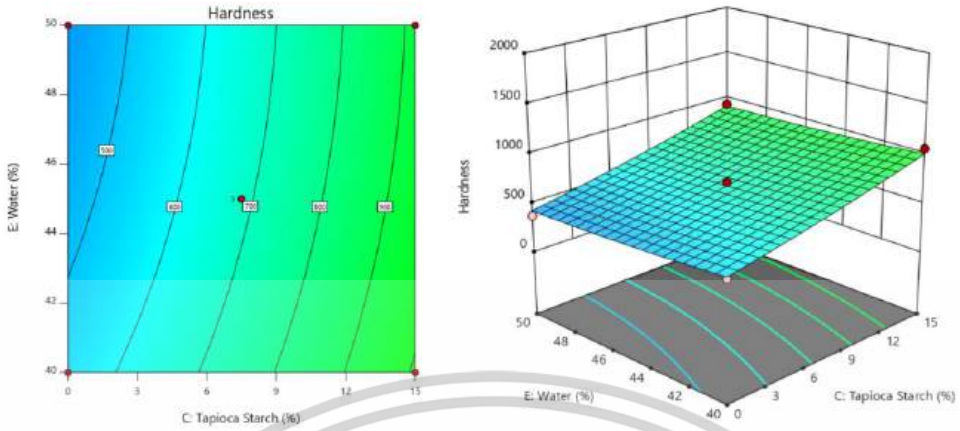


4.1g พื้นผิวตอบสนองขออควาฟาบา (B) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าความแข็ง

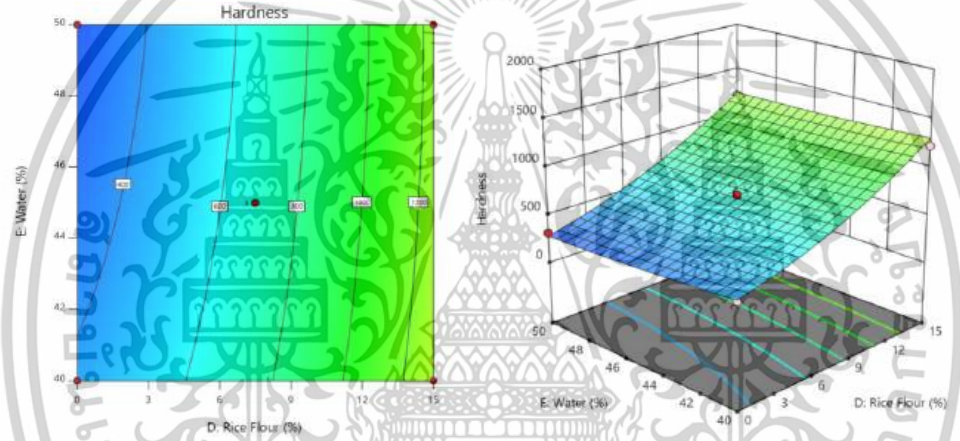


4.1h พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.1i พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าความแข็ง



4.1j พื้นผิวตอบสนองของแป้งข้าวเจ้า (D) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าความแข็ง

ภาพที่ 4.1a-j แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าความแข็งในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.1a-j แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีฟ้า (ค่าความแข็งต่ำ) ไปสู่สีเขียว (ค่าความแข็งสูง) ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องมากที่สุด ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า โดยแนวโน้มค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้วัตถุดิบเหล่านี้ในปริมาณสูง (เช่น ≥ 12%) โดยเฉพาะการใช้แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าคู่กับโปรตีนจากถั่วที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจะให้โครงสร้างเจลที่แข็งแรงมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม การใช้ปริมาณอควาฟาบา และน้ำกรองในระดับสูง จะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงอย่างชัดเจนในเกือบทุกกรณี เพราะอควาฟาบามีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำ และลดความหนืด ทำให้โครงสร้างของไข่เทียมทรงเครื่องอ่อนตัวลง (Day et al., 2021)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างผงถั่วลูกไก่ กับแป้งชนิดต่าง ๆ (AC และ AD) อย่าง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงผลต้านกันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบบางชนิดต่อโครงสร้างภายในเจล สอดคล้องกับภาพที่ 4.1b-c ซึ่งการใช้ปริมาณผงถั่วลูกไก่ในปริมาณที่สูงพร้อมกับอควาฟาบา อาจส่งผลต่อโครงสร้างของโปรตีนในลักษณะที่เกิดพันธะข้ามโมเลกุล (cross-linking) ให้เกิดความแข็ง และความแน่นน้อยลง (McClements, 2009)

จากสมการ และตารางที่ ค1. ในการศึกษานี้ พบว่า ผลยกกำลังสอง แสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของผงถั่วลูกไก่ อควาฟาบา และแป้งข้าวเจ้า ต่อค่าความแข็ง เป็นผลจากพฤติกรรมการเกิดเจลหรือการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของปริมาณวัตถุดิบดังกล่าว (Wang et al., 2023)

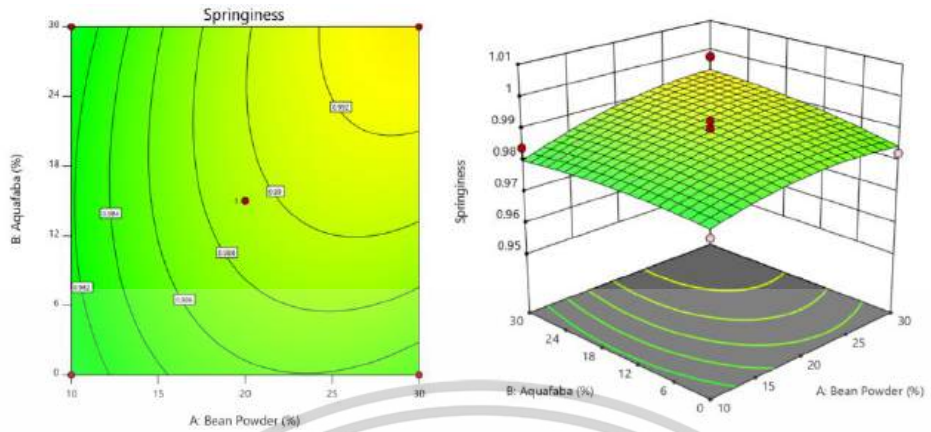
4.1.1.1.2 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าการคืนตัว

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของค่าการคืนตัว ตัวแปรด้านวัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ อควาฟาบา แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และน้ำกรอง โดยค่าสัมประสิทธิ์คือค่าที่แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าการคืนตัวเมื่อมีการปรับปริมาณวัตถุดิบนั้น ๆ ทั้งนี้ ค่าบวกแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของการคืนตัว ขณะที่ค่าลบแสดงแนวโน้มลดลง โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงไว้ในภาคผนวก ค. และแสดงสมการดังต่อไปนี้

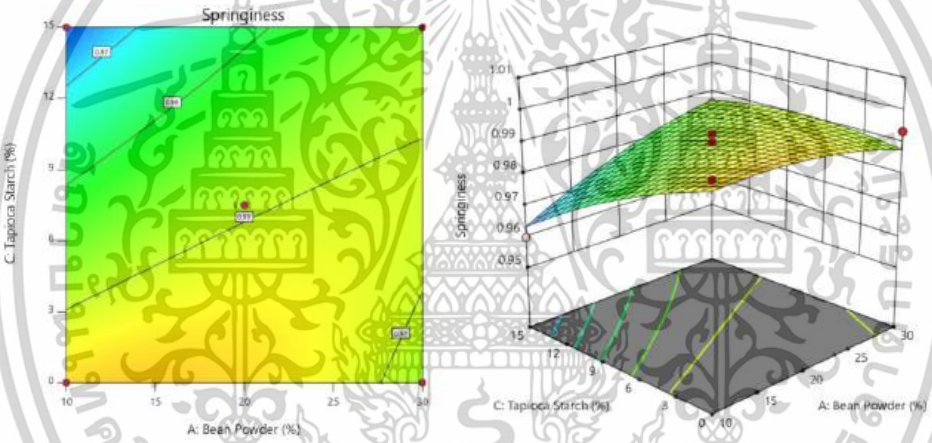
ปริมาณของค่าการคืนตัว = 0.9893 + 0.0044A + 0.0021B - 0.008C + 0.0011D - 0.0017E + 0.0022AB + 0.0077AC + 0.0072AD + 0.012AE - 0.0036BC + 0.0081BD + 0.0044BE + 0.0148CD - 0.005CE + 0.004DE - $0.0031A^2$ - $0.0016B^2$ - $0.0029C^2$ - $0.0007D^2$ + $0.0018E^2$

ซึ่งแสดงถึงการใช้ผงถั่วลูกไก่ (A) ที่มีค่าสัมประสิทธิเป็นบวก (+0.004) แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าการคืนตัว และมีค่า P เท่ากับ 0.0005 ซึ่งบ่งบอกถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การใช้แป้งมันสำปะหลัง (C) ให้ผลในทิศทางตรงกันข้าม โดยลดค่าการคืนตัวลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (-0.0080, $P < 0.0001$) ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) ในภาพที่ 4.2a–j

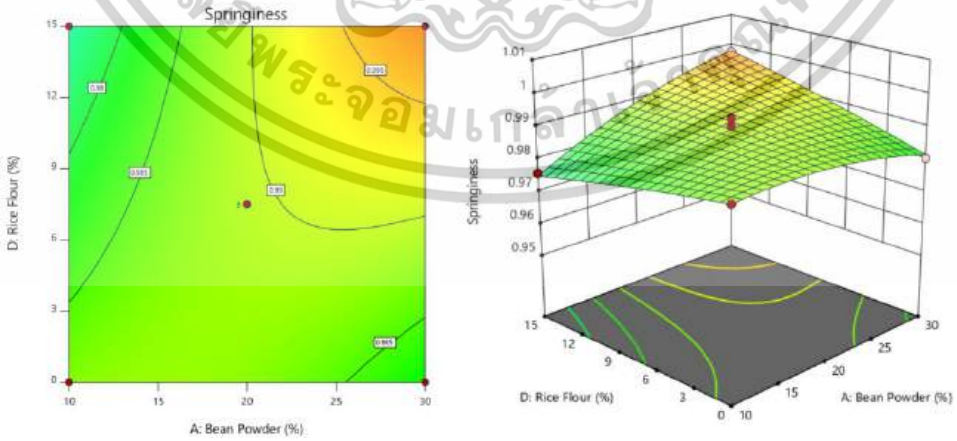
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.2a พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และอควาฟาบา (B) ต่อค่าคืนตัว

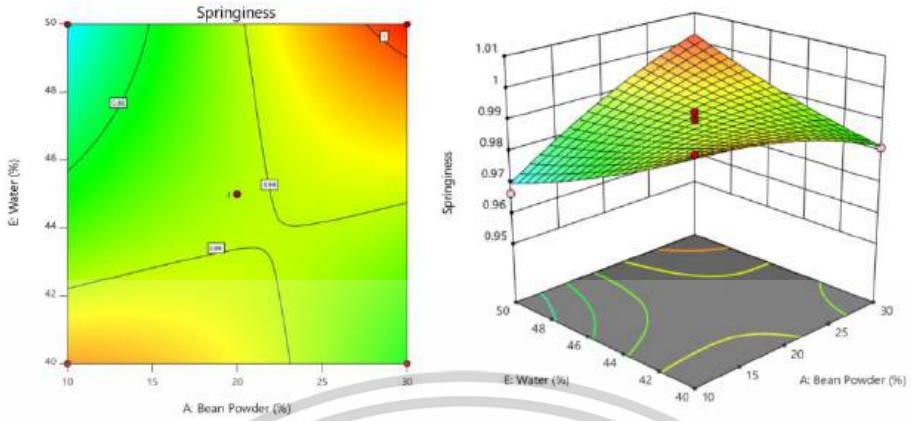


4.2b พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าคืนตัว

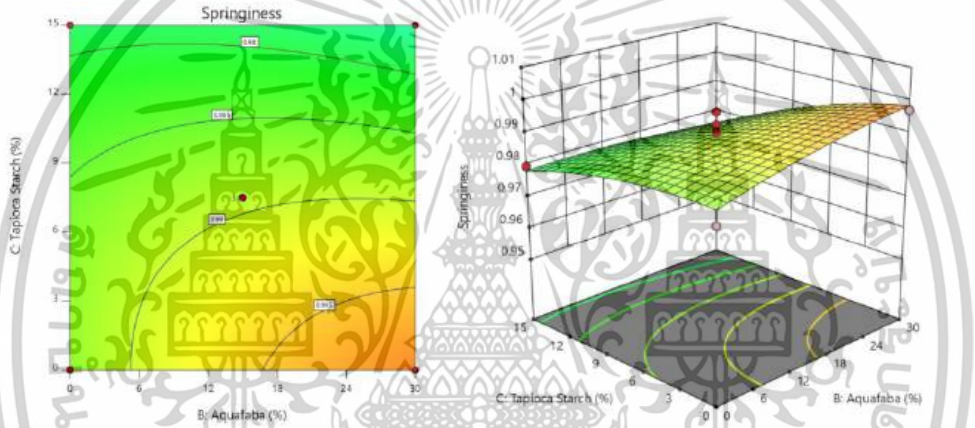


4.2c พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าคืนตัว

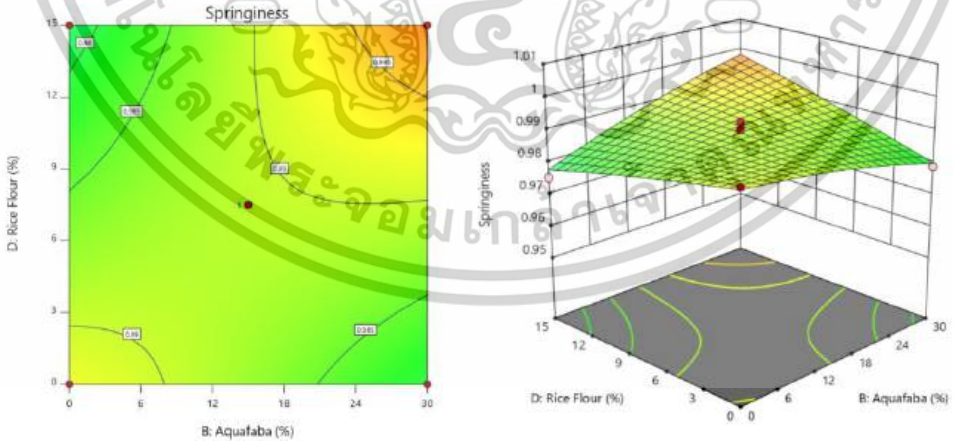
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.2d พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าคืนตัว

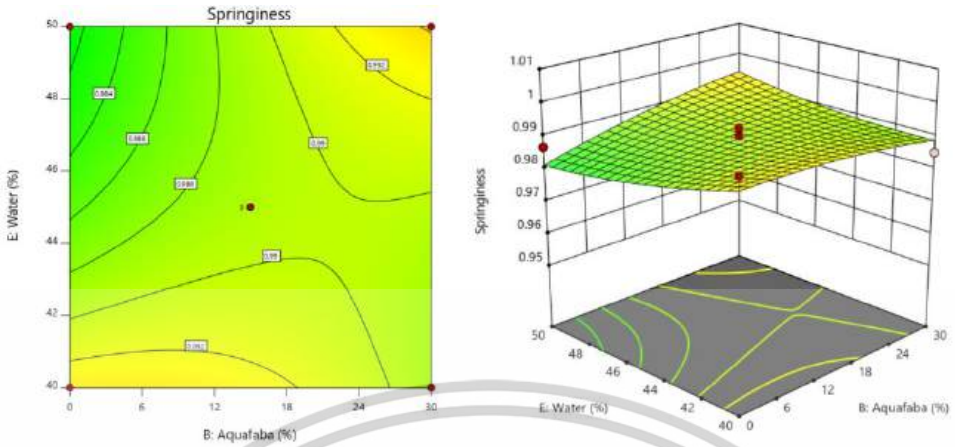


4.2e พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าคืนตัว

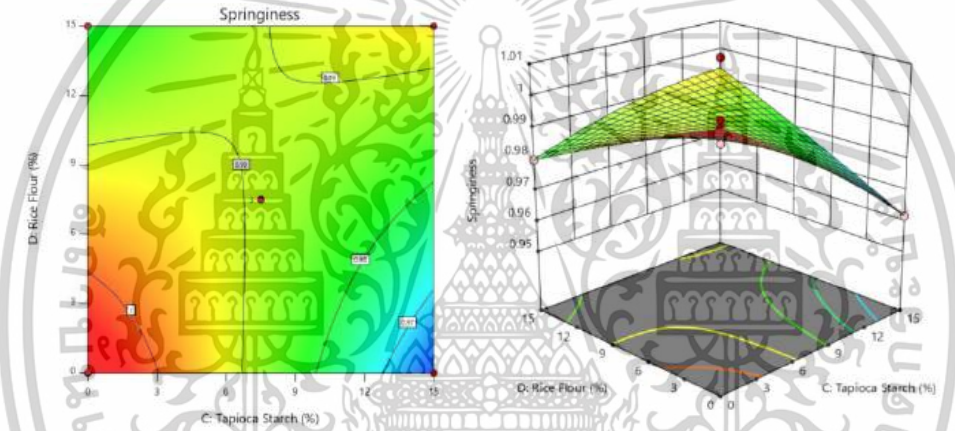


4.2f พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าคืนตัว

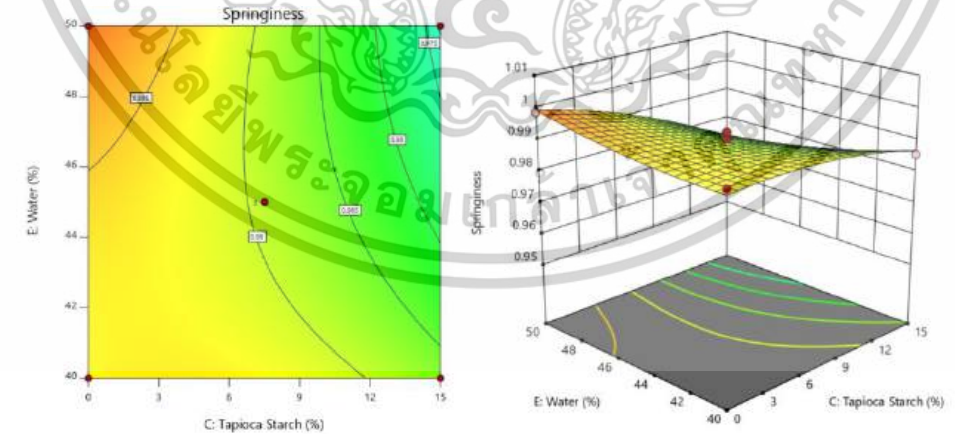
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.2g พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าคืนตัว

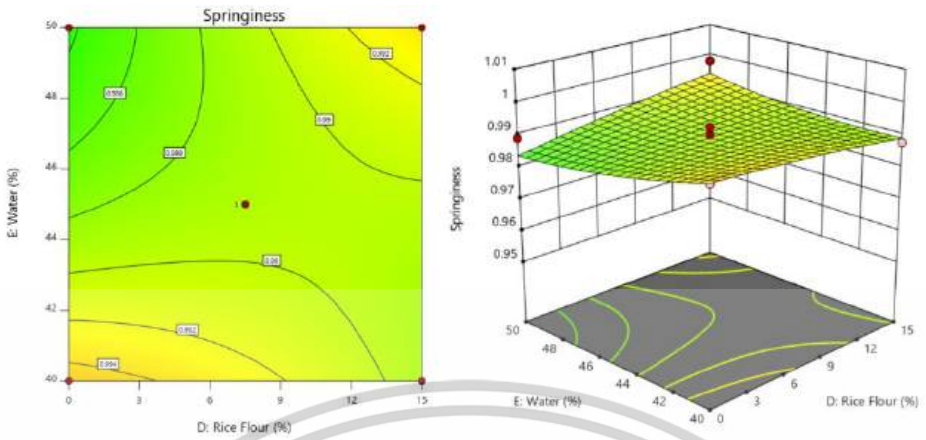


4.2h พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าคืนตัว



4.2i พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าคืนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.2j พื้นผิวตอบสนองของแป้งข้าวเจ้า (D) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าคืนตัว

ภาพที่ 4.2a-j แสดงปัจจัยต่างที่มีผลต่อปริมาณของค่าคืนตัว ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.2 a-j แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีเขียว (ค่าการคืนตัวต่ำ) ไปสู่สีแดง (ค่าการคืนตัวสูง) ซึ่งแนวโน้มของค่าการคืนตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อมีการใช้ผงถั่วลูกไก่และอควาฟาบาในปริมาณสูงช่วง 25-30 และ 24-30 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติโครงสร้างของโปรตีนจากถั่วที่ช่วยเสริมโครงสร้างเจล และความยืดหยุ่นภายในผลิตภัณฑ์ (Solanke et al., 2021) ในทางตรงกันข้ามส่วนผสมอย่างแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้ามีแนวโน้มที่ลดลงตามค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นลบ -0.0080 ($P < 0.0001$) โดยเฉพาะเมื่อใช้ในปริมาณสูงช่วง 10-12% และ 45-50% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากที่แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าให้โครงสร้างแน่นทึบ แต่ไม่ยืดหยุ่นเพียงพอ (Zhou et al., 2022)

นอกจากนี้ การปฏิสัมพันธ์ของวัตถุดิบหลายคู่ อย่างผงถั่วลูกไก่กับแป้งมันสำปะหลัง (AC, $P = 0.0016$) ผงถั่วลูกไก่กับแป้งข้าวเจ้า (AD, $P = 0.0024$) ผงถั่วลูกไก่กับน้ำกรอง (AE, $P < 0.0001$) รวมถึงอควาฟาบากับแป้งข้าวเจ้า (BD, $P = 0.0010$) และแป้งมันสำปะหลังกับน้ำกรอง (BE, $P < 0.0001$) ให้ค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวกทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการใช้วัตถุดิบเหล่านี้ร่วมกันในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถเสริมค่าการคืนตัวได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการเสริมสร้างโครงสร้างเจลที่มีการกระจายตัวของน้ำ และโมเลกุลอย่างเหมาะสมในระบบของไข่เทียมทรงเครื่อง (McClements, 2009)

ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์กำลังสองของตัวแปรทั้งหมดจากสมการ และตารางที่ ค.2 ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ อควาฟาบา แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และน้ำกรอง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

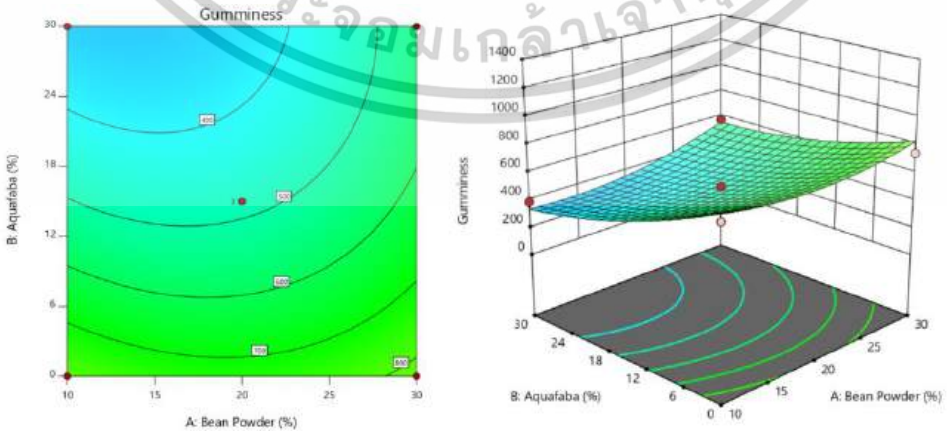
แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดกับค่าการคืนตัวมีลักษณะเป็นเชิงเส้น กล่าวคือ การเพิ่มหรือลดของวัตถุดิบมีผลต่อค่าการคืนตัวในแนวโน้มที่คงที่ภายในช่วงที่ศึกษา

4.1.1.1.3 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร แสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงต่อค่าวัตถุดิบนั้นๆ โดยค่าบวกแสดงว่าเมื่อเพิ่มวัตถุดิบนั้นจะเพิ่มค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร ในขณะที่ค่าลบจะบ่งชี้ถึงแนวโน้มการลดลงของค่าความสามาถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร โดยจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงในภาคผนวก ตารางที่ ค.3 และแสดงสมการดังต่อไปนี้

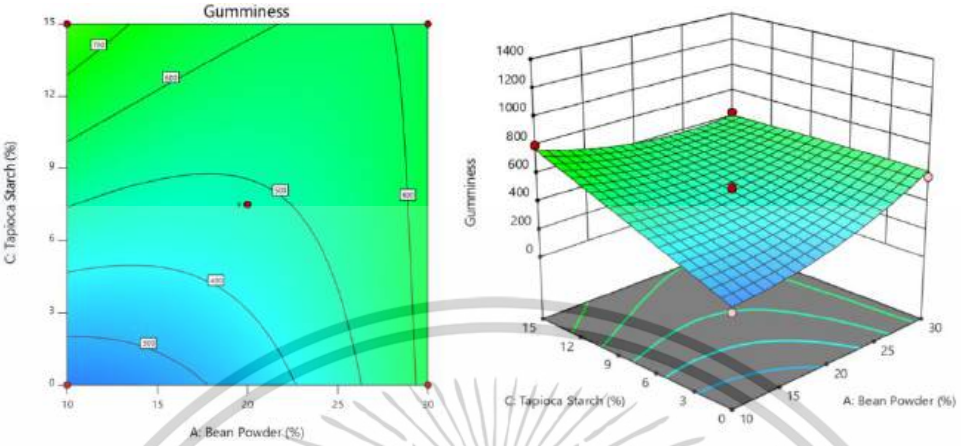
ปริมาณของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร = 0.7048 - 0.0046A + 0.0139B - 0.0178C + 0.0116D + 0.0024E + 0.0076AB + 0.0041AC + 0.0258AD + 0.0060AE + 0.0003BC - 0.0027BD - 0.0159BE - 0.0438CD + 0.0065CE + 0.0088DE - 0.0156A^2 - 0.0066B^2 - 0.0221C^2 - 0.0004D^2 + 0.0039E^2

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อควาฟาบา (B) และแป้งข้าวเจ้า (D) มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อการเพิ่มค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารของไข่เทียมทรงเครื่อง โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวกเท่ากับ +0.0139 และ +0.0116 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของอควาฟาบา ในฐานะโครงสร้างกึ่งเจลที่สามารถกักเก็บน้ำ และช่วยให้เนื้อผลิตภัณฑ์คงรูปได้ดีขึ้น (Day et al., 2021) อีกทั้ง แป้งข้าวเจ้าในฐานะแหล่งของอะไมโลสที่ช่วยเพิ่มความเหนียวและโครงสร้างให้กับผลิตภัณฑ์ (Juliano, 1985)

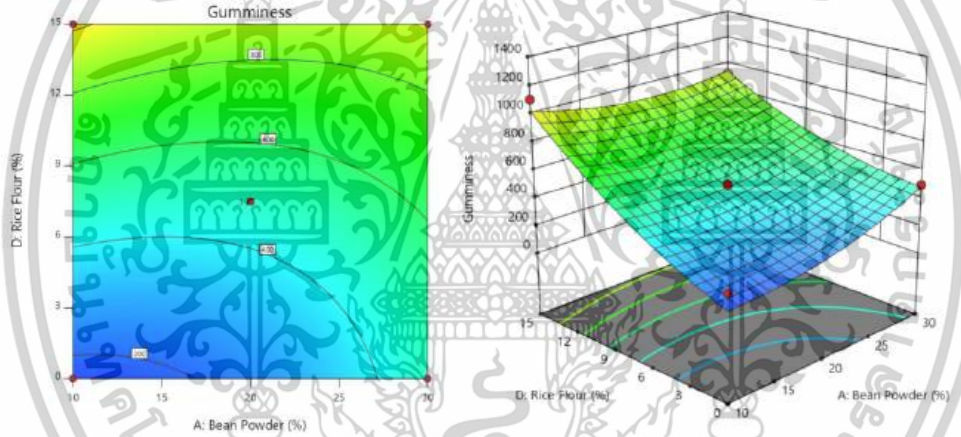


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

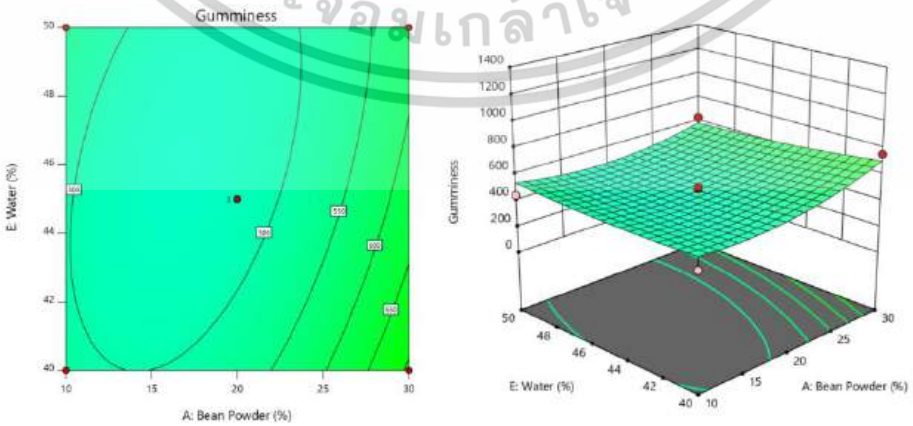
4.3a พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และอควาฟาบา (B) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร



4.3b พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) ต่อแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร

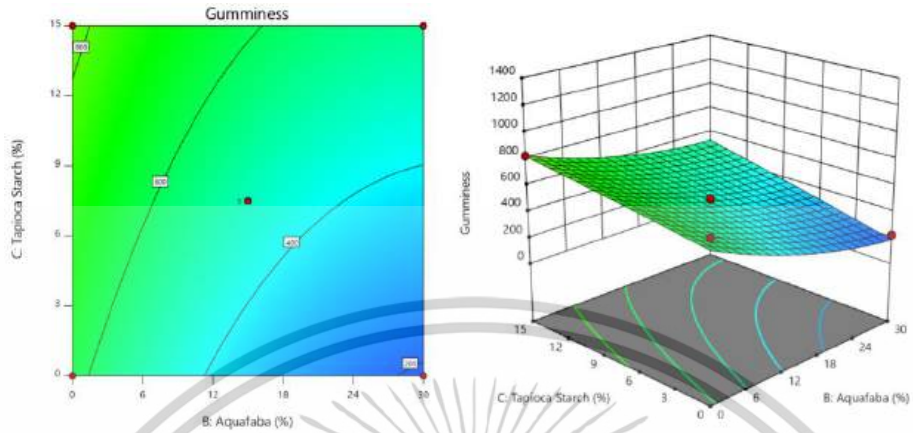


4.3c พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) ต่อแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร

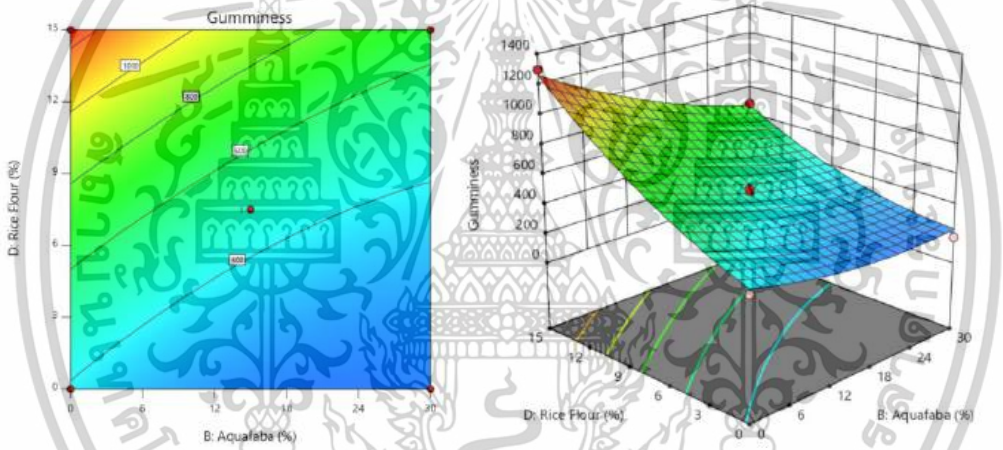


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

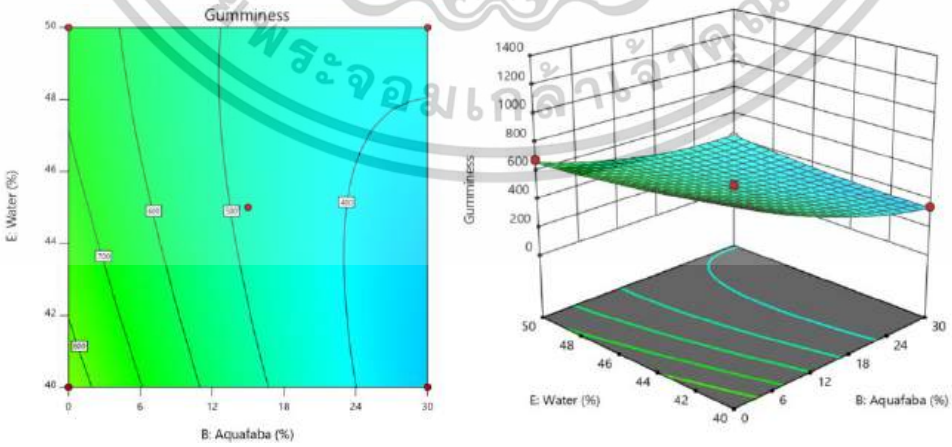
4.3d พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) กับน้ำกรอง (E) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร



4.3e พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) กับแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร

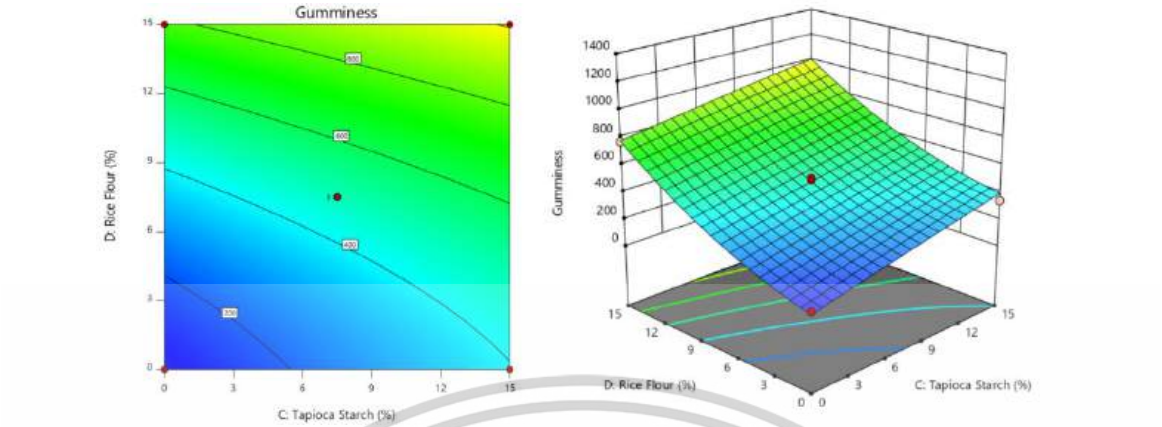


4.3f พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) กับแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร

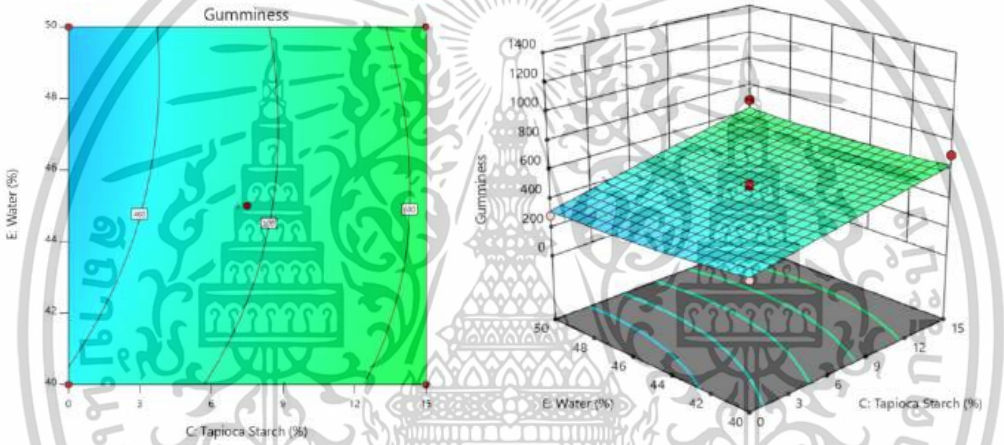


4.3g พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร

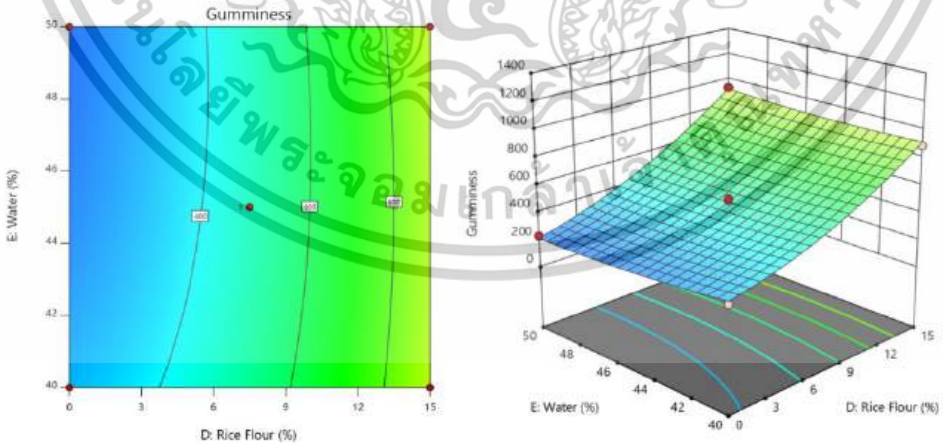
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.3h พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร



4.3i พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (D) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร



4.3j พื้นผิวตอบสนองของแป้งข้าวเจ้า (D) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร

ภาพที่ 4.3a-j แสดงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณของความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.3 a-j ที่แสดงภาพแนวโน้มผ่านแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) พบว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารต่ำ) ไปสู่สีเหลือง (ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารสูง) ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้อควาฟาบา (B) แป้งข้าวเจ้า (D) เมื่อมีการใช้ในปริมาณ 24-30 และ 14-15 % ตามลำดับ แสดงถึงผลของความชื้นและพอลิแซ็กคาไรด์ที่ช่วยให้โครงสร้างมีแรงยึดเหนี่ยวภายในสูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม การใช้แป้งมันสำปะหลัง (C) มีผลลดค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารอย่างมีนัยสำคัญ (–0.00178, $P < 0.0001$) เนื่องจากลักษณะของอะมิโลเพกตินในแป้งมันสำปะหลังที่ให้เจลนุ่ม แต่ไม่เหนียวแน่น จึงลดการจับตัวของโครงสร้างอาหาร (Zhou et al., 2022)

ในส่วนของการปฏิสัมพันธ์ พบว่า การใช้อควาฟาบา ร่วมกับน้ำกรอง (BE) และการใช้แป้งมันสำปะหลัง ร่วมกับแป้งข้าวเจ้า (CD) มีแนวโน้มลดค่าความสามารถในการยึดเกาะ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ แสดงถึงผลต้านต่อการเกิดพันธะโครงสร้างของอาหาร ขณะที่การจับคู่ระหว่างผงถั่วลูกไก่กับแป้งข้าวเจ้า (AD) กลับให้ผลในทางบวก แสดงให้เห็นว่า โปรตีนจากถั่วลูกไก่มีแนวโน้มที่จับกับโครงสร้างของแป้งได้ดี และเกิดผลเสริมซึ่งกันและกัน (McClements, 2009; Wang et al., 2023)

นอกจากนี้ ยังพบผลยกกำลังสองของผงถั่วลูกไก่ และแป้งมันสำปะหลัง จากสมการ และตารางที่ ค.3 มีค่า $P = 0.0019$ และ < 0.0001 ตามลำดับ และให้ค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ แสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของผลการใช้วัตถุดิบเหล่านี้ กล่าวคือ หากใช้ในปริมาณมากเกินไป อาจทำให้โครงสร้างผลิตภัณฑ์อ่อนลง แทนที่จะยึดเกาะกันแน่นขึ้นเหมือนในช่วงปริมาณที่เหมาะสม (Wang et al., 2023)

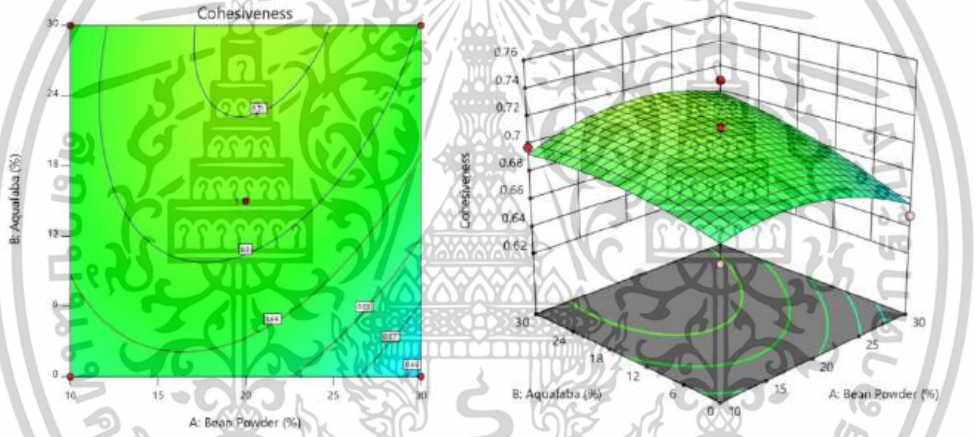
4.1.1.1.4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

ค่าสัมประสิทธิ์ใช้เพื่อแสดงแนวโน้มของผลตอบสนอง (Response) ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นบวกบ่งชี้ว่าการเพิ่มวัตถุดิบนั้นมีแนวโน้มเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) ในขณะที่ค่าลบ แสดงถึงผลในทางตรงกันข้าม (Montgomery, 2017) โดยจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (แสดงในภาคผนวก ค.4) และแสดงสมการดังต่อไปนี้

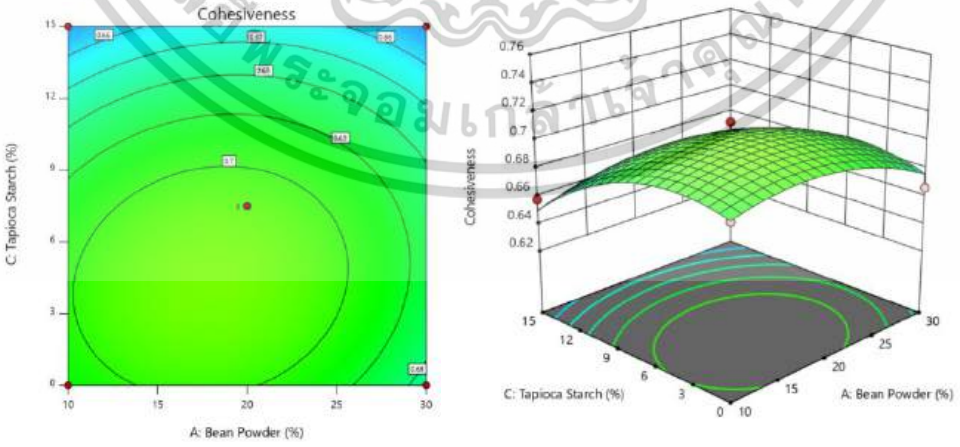
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว = 480.83 + 59.88A - 185.21B + 135.61C + 327.94D - 23.51E + 49.14AB - 140.69AC - 100.48AD - 36.79AE + 38.24BC - 109.41BD + 67.83BE - 20.60CD + 21.72CE + 28.33DE + 83.42A^2 + 68.77B^2 - 5.06C^2 + 89.65D^2 + 23.34E^2

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้ผงถั่วลูกไก่ (A) แป้งมันสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (D) ส่งผลเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า ที่สามารถเกิดเจล และเสริมความหนืดเป็นอย่างดี ทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความแน่น และเหนียวมากขึ้น (Juliano, 1985; Zhou et al., 2022) ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) ในภาพที่ 4.4a-j

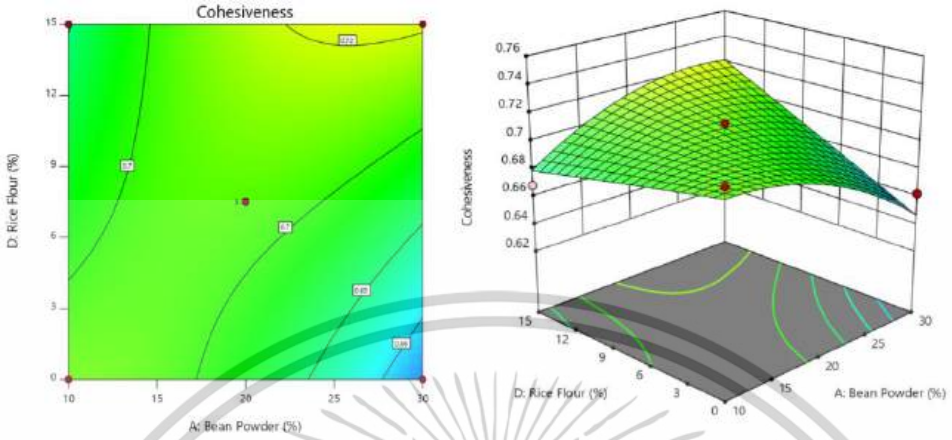


4.4a พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และอควาฟาบา (B) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

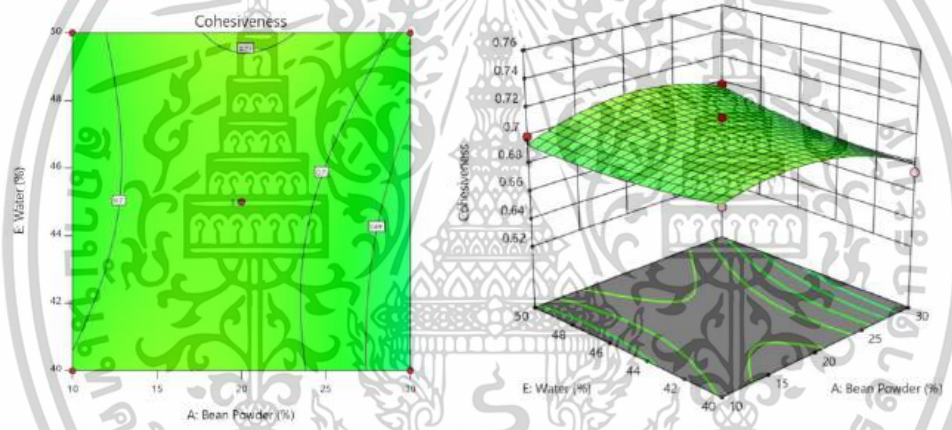


4.4b พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

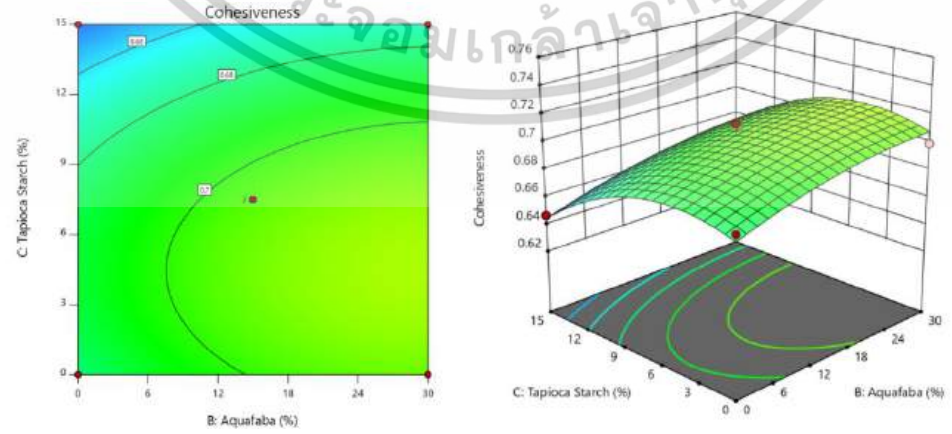
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.4c พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

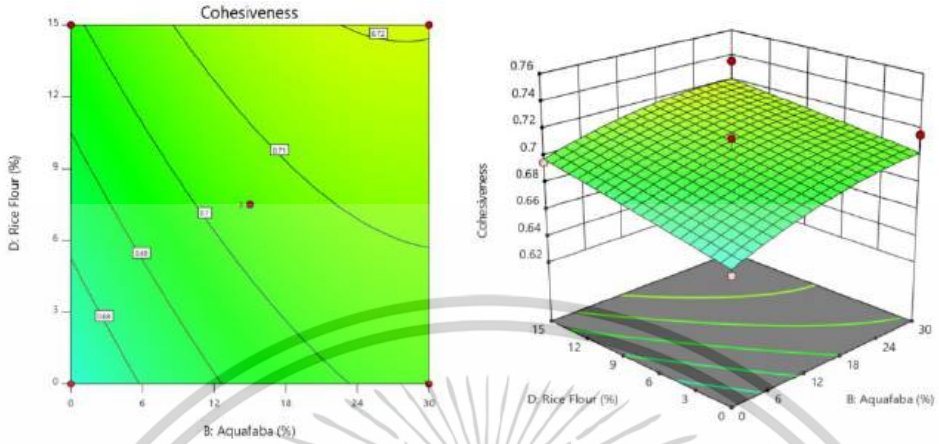


4.4d พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

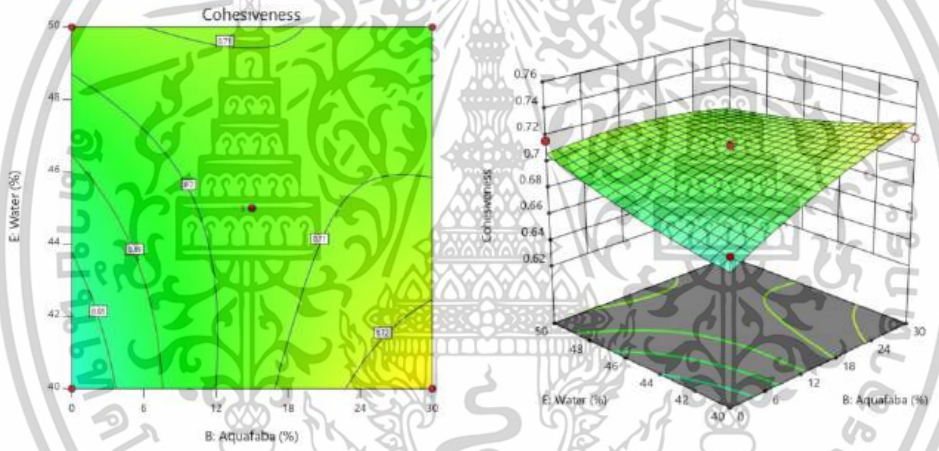


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

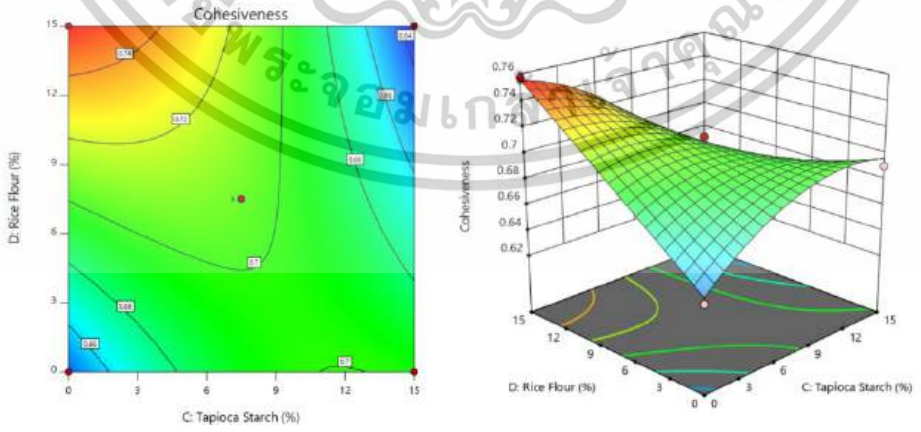
4.4e พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) ต่อแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว



4.4f พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

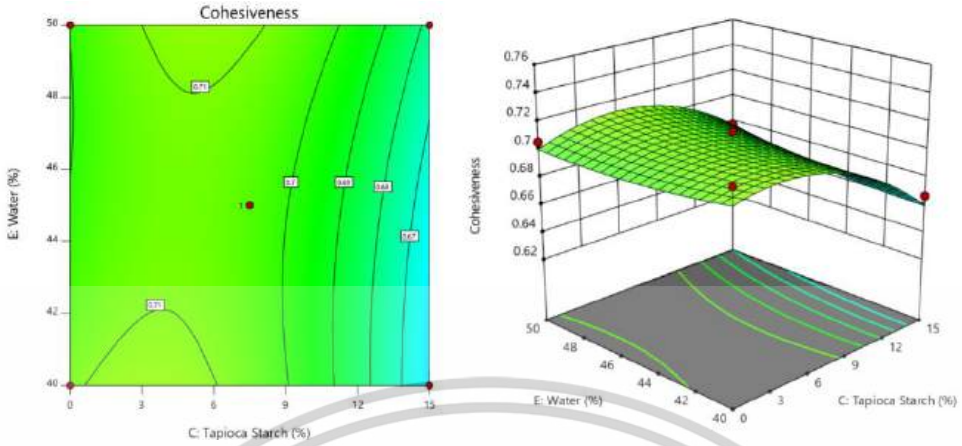


4.4g พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และน้ำกรอง (D) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

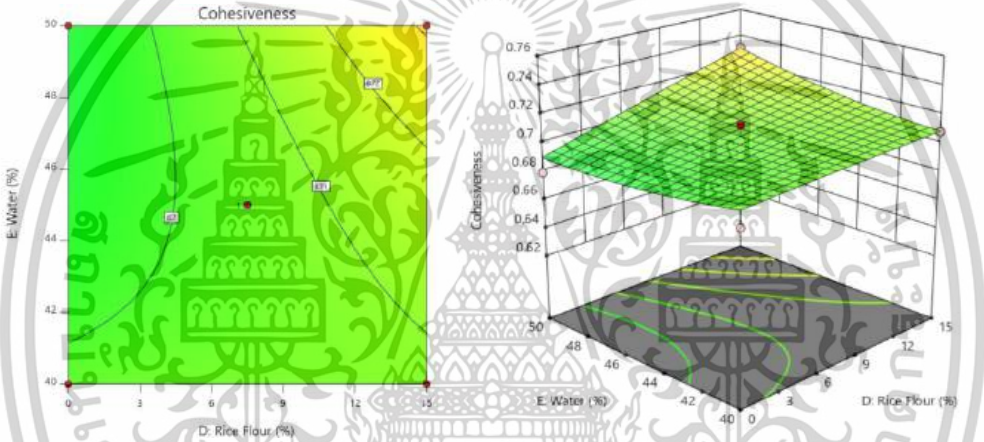


4.4h พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.4i พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว



4.4j พื้นผิวตอบสนองของแป้งข้าวเจ้า (D) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

ภาพที่ 4.4a-j แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.4 a-j ที่แสดงภาพแนวโน้มผ่านแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) พบว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวต่ำ) ไปสู่สีแดง (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวสูง) ซึ่งแนวโน้มเพิ่มเมื่อมีการใช้ผงถั่วลูกไก่ (A) แป้งมันสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (D) โดยเฉพาะในช่วงปริมาณ 12-15% ในทางตรงกันข้ามการใช้อควาฟาบา (B) ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นลบ (–185.21, $P < 0.0001$) มีผลลดต่อการค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวอย่างชัดเจน เนื่องจากคุณสมบัติของอควาฟาบามีแนวโน้มเพิ่มทั้งปริมาณน้ำอิสระ และช่วยลดความหนืด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างที่นิ่ม และแตกง่ายขึ้น (Day et al., 2021)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่า คู่ตัวแปรระหว่างผงถั่วลูกไก่กับแป้งมันสำปะหลัง (AC) ผงถั่วลูกไก่กับแป้งข้าวเจ้า (AD) และอควาฟาบากับแป้งข้าวเจ้า (BD) มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบและมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นถึง ผลการลดลงของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว ที่เกิดจากผลต้านทางกายภาพภายในระหว่างโครงสร้างโปรตีน และแป้งที่ไม่สามารถจัดเรียงตัวเพื่อสร้างโครงสร้างเจลที่เสถียรได้ (McClements, 2009)

นอกจากนี้ พบว่า ตัวแปรยกกำลังสองจากสมการ และตารางที่ ค.4 ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ (A^2) อควาฟาบา (B^2) และแป้งข้าวเจ้า (D^2) ให้ค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก และมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของผลกระทบ กล่าวคือ การใช้วัตถุดิบดังกล่าวในปริมาณที่เหมาะสม วัตถุดิบเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวได้ แต่หากมากเกินไปอาจกลับให้ผลตรงข้าม (Wang et al., 2023)

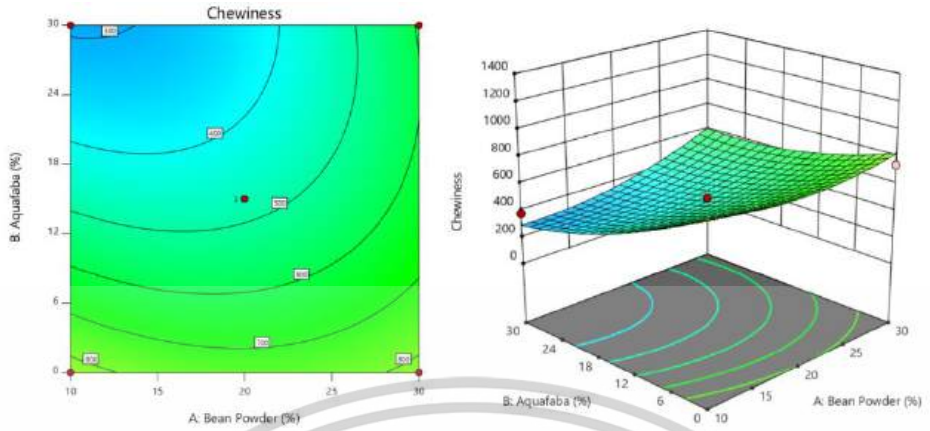
4.1.1.1.5 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง

ค่าสัมประสิทธิ์ เป็นตัวชี้วัดทิศทาง และความแรงของผลกระทบจากวัตถุดิบต่อค่าตัวแปรเป้าหมาย โดยในที่นี้คือค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง (Chewiness) ซึ่งมีความสำคัญต่อการรับรู้เนื้อสัมผัสของผู้บริโภค เนื่องจากเกี่ยวข้องกับความแน่น ความเหนียว และความยืดหยุ่นของอาหาร (Szczesniak, 2002; McClements, 2009) โดยจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ (แสดงในภาคผนวก ค.5) และดังสมการต่อไปนี้

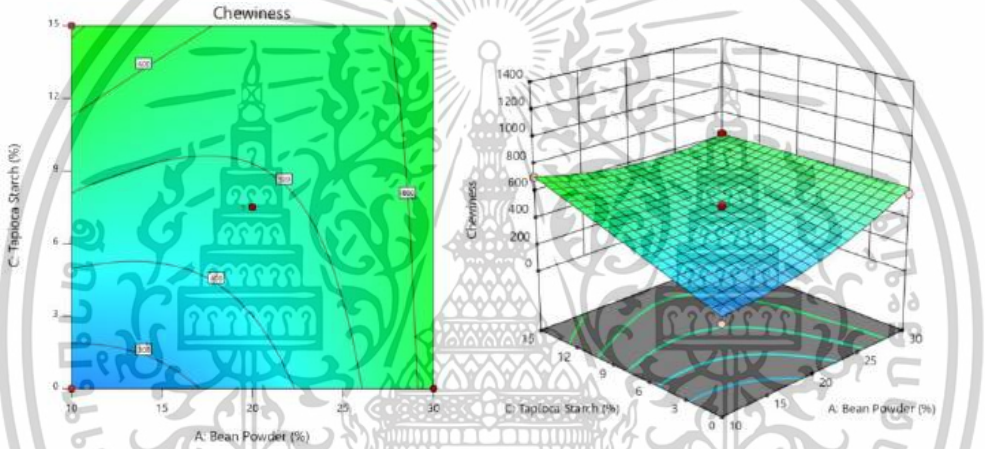
ปริมาณของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง = 471.96 + 75.54A - 192.00B + 118.06C + 330.61D - 0.2317E + 82.09AB - 120.42AC - 89.35AD + 18.24AE + 63.36BC - 108.51BD + 58.70BE - 8.23CD + 8.54CE + 84.68DE + 85.06A^2 + 85.58B^2 - 3.97C^2 + 79.83D^2 + 31.57E^2

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วัตถุดิบที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก ได้แก่ ผงถั่วลูกไก่ (A = +75.54, P = 0.0020) แป้งมันสำปะหลัง (C = +118.06, P < 0.0001) และแป้งข้าวเจ้า (D = +330.61, P < 0.0001) ซึ่งส่งผลเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผงถั่วลูกไก่ที่เป็นแหล่งโปรตีนจากพืชสามารถสร้างโครงสร้างโปรตีนที่ยืดหยุ่นได้เมื่อได้รับความร้อน ในขณะที่แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าส่งเสริมการเกิดเจลและเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างเจล (Juliano, 1985; Zhou et al., 2022) ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) ในภาพที่ 4.5a-j

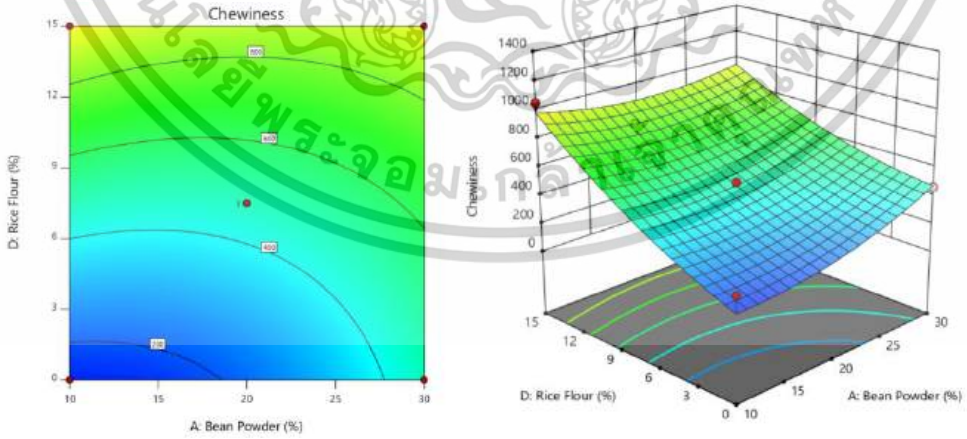
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.5a พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และอควาฟาบา (B) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

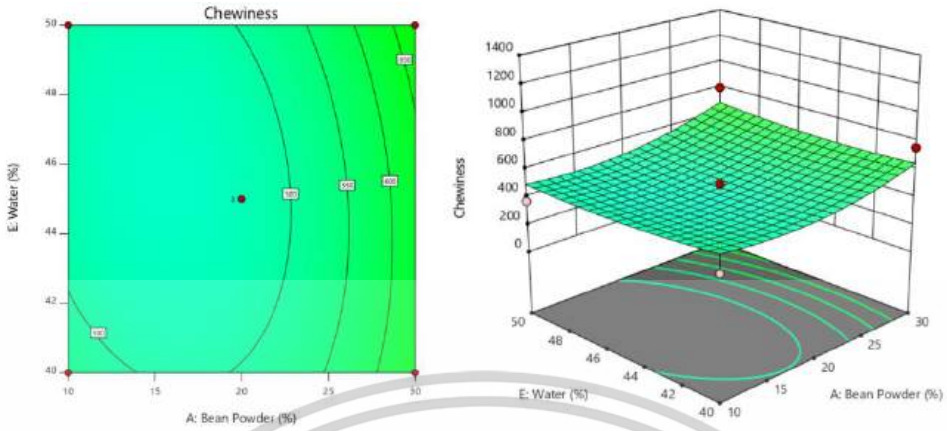


4.5b พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

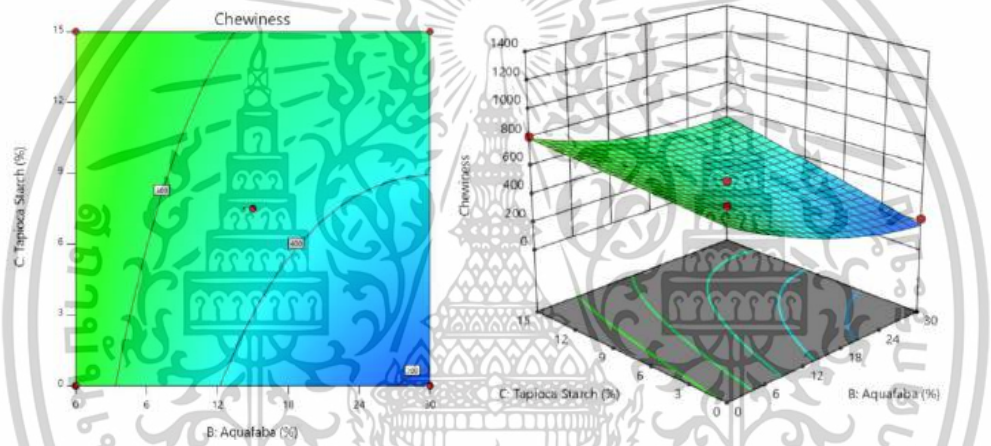


4.5c พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

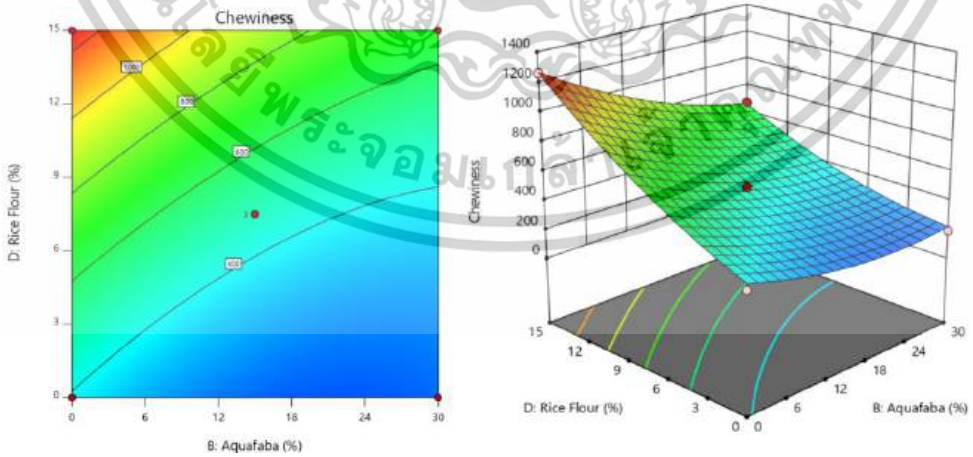
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.5d พื้นผิวตอบสนองของผงถั่วลูกไก่ (A) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

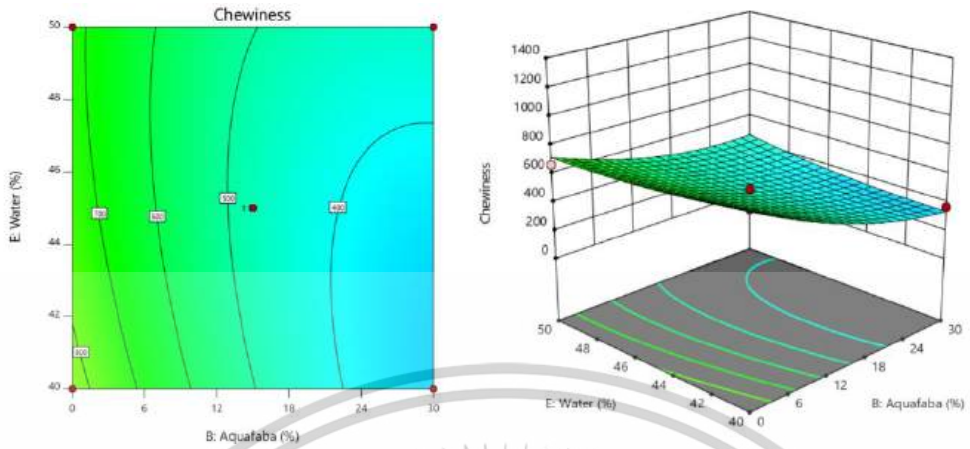


4.5e พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และแป้งมันสำปะหลัง (C) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

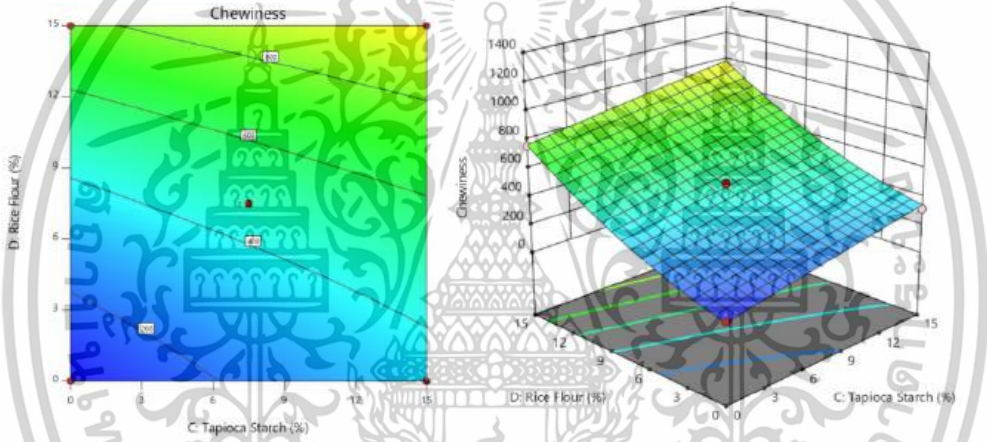


4.5f พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

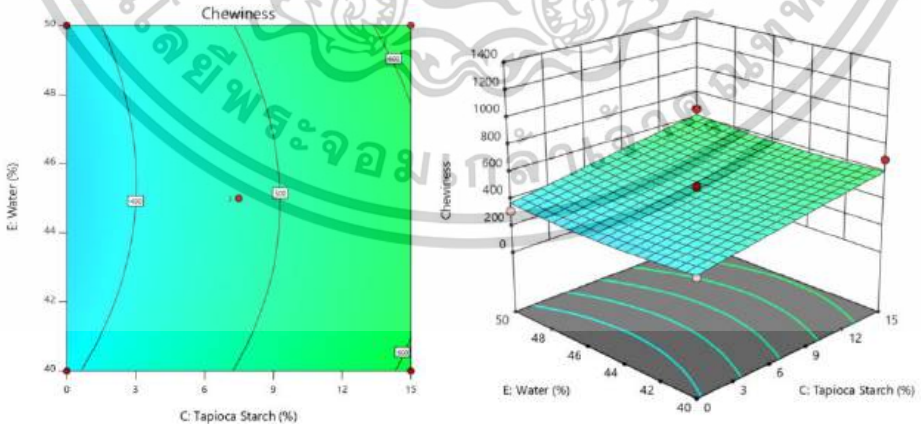
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.5g พื้นผิวตอบสนองของอควาฟาบา (B) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

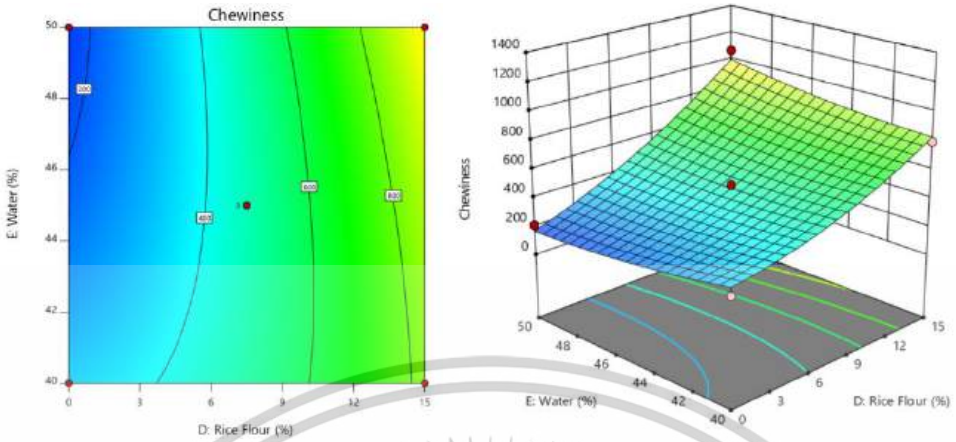


4.5h พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (D) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง



4.5i พื้นผิวตอบสนองของแป้งมันสำปะหลัง (C) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.5j พื้นผิวตอบสนองของแป้งข้าวเจ้า (D) และน้ำกรอง (E) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

ภาพที่ 4.5a-j แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.5 a-j ที่แสดงภาพแนวโน้มผ่านแผนภาพพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) พบว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งต่ำ) ไปสู่สีแดง (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งสูง) ซึ่งแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานอาหารแข็ง เกิดจากการเพิ่มขึ้นของผงถั่วลูกไก่ (A) แป้งในสำปะหลัง (C) และแป้งข้าวเจ้า (C) โดยเฉพาะในช่วงปริมาณ 14-15% แสดงถึงโครงสร้างที่แน่น และต้องใช้แรงเคี้ยวสูง ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มอควาฟาบา (B) และน้ำกรอง (E) ส่งผลลดลงต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของความแน่นของโครงสร้างภายในของไข่เทียมทรงเครื่อง (Zhou et al., 2022; McClements, 2009)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่า การใช้ผงถั่วลูกไก่ ร่วมกับแป้งมันสำปะหลัง (AC) และอควาฟาบา ร่วมกับแป้งข้าวเจ้า (BD) มีผลต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวของแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจาก การเกิดโครงสร้างเจลที่แน่น และแข็งแรงมากขึ้น เมื่อโปรตีนจากถั่วลูกไก่มีโอกาสสร้างพันธะไฮโดรเจน หรือพันธะไดซัลไฟด์ร่วมกับแป้ง ที่มีคุณสมบัติในการเกิดเจล เช่น แป้งมันสำปะหลังที่มีอะโมโลเพคตินสูง และแป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสสูง ซึ่งเมื่อให้ความร้อน จะสามารถพองตัว และสร้างโครงข่ายที่เหนียวหนืด ช่วยพยุงโครงสร้างเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ดี (Zhou et al., 2022; Tolstoguzov, 2000)

และสำหรับตัวแปรยกกำลังสองอย่าง ผงถั่วลูกไก่ (A^2), อควาฟาบา (B^2) และแป้งข้าวเจ้า (D^2) จากสมการ และตารางที่ ค.5 พบว่า มีผลเพิ่มค่าพลังงานในการเคี้ยวของอาหารแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ กล่าวคือ หากใช้อยู่ในช่วงความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความแน่นของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ได้ดี แต่หากเกินระดับนั้นอาจทำให้โครงสร้างแน่นหรือแข็งเกินไปจนลดทอนความยืดหยุ่น (Wang et al., 2023; Ahmed et al., 2022)

4.1.2 ผลการตรวจสอบค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่อง

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์อาหาร คือ ค่าสี (Color parameters) เป็นปัจจัยแรกที่ผู้บริโภครับรู้ และส่งผลโดยตรงต่อการยอมรับของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยค่าสีในที่นี้ หมายถึง ค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ค่าความเข้มสี (c) และค่าเฉดสี (h) ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ได้จากระบบสี CIE Lab* ที่ได้รับความนิยมมากในการตรวจสอบคุณภาพสีของอาหาร (Pathare et al., 2013) ค่าสีจึงมีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบความคล้ายคลึงกันกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (เช่น ไข่ทรงเครื่อง) โดยเฉพาะในกรณีที่ผู้บริโภคยังไม่รับประทาน หากค่าสีมีความแตกต่างจากต้นแบบมาก อาจทำให้รู้สึกว่าอาหารดูไม่เป็นธรรมชาติ แม้ว่าเนื้อสัมผัสหรือรสชาติจะใกล้เคียงก็ตาม

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องทั้ง 43 สูตรในตารางที่ 4.1 โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (ไข่ทรงเครื่อง) พบว่า สูตรที่แสดงค่าพารามิเตอร์ทางกล อย่างค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการคืนตัว (Springiness) ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Gumminess) ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) และค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งแข็ง (Chewiness) ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ได้แก่ สูตร 18, 23, 33 และ 42 จึงได้เลือกสูตรทั้ง 4 นี้มาเปรียบเทียบค่าสี ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สีทั้ง 5 ค่าอย่างละเอียดและประเมินระดับความใกล้เคียงกับต้นแบบในแต่ละมิติของค่าสี

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่

สูตร	L	a*	b*	c	h
C	69.89±1.45^{a}	-0.38±0.46^{b}	25.27±0.88^{a}	25.28±0.87^{a}	92.48±0.93^{a}
18	64.61±0.56^{c}	1.64±0.26^{a}	19.39±0.16^{bc}	19.46±0.14^{c}	85.15±0.73^{bc}
23	70.93±1.10^{a}	-0.23±0.32^{b}	19.98±0.95^{b}	19.98±0.95^{a}	90.68±0.95^{b}
33	66.26±0.02^{b}	-0.45±0.07^{b}	13.2.43±0.48^{c}	13.24±0.25^{a}	91.40±0.20^{c}
42	70.44±0.02^{a}	0.39±0.09^{b}	19.67±0.40^{b}	19.67±0.40^{b}	88.84±0.29^{b}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq$0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลดังกล่าวในตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าความสว่าง (L*) ของไข่เทียมทรงเครื่องสูตร 23 และ 42 มีค่าเท่ากับ 64.61±0.56 และ 70.44±0.02 ตามลำดับ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (p>0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่อง ที่มีค่าความสว่างเท่ากับ 69.89±1.45

สำหรับค่าความเป็นสีแดง (a*) สูตรที่มีค่าใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุด (p>0.05) คือ สูตร 23, 33 และ 42 มีค่าเท่ากับ -0.23±0.32, -0.45±0.07 และ 0.39±0.09 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่องที่มีค่าความเป็นสีแดงเท่ากับ -0.38±0.46

สำหรับค่าความเข้มสี (c) สูตรที่มีค่าใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุด (p>0.05) คือ สูตร 23 และ 33 มีค่าเท่ากับ 19.98±0.95 และ 13.24±0.25 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่องที่มีค่าความเข้มสี เท่ากับ 25.28±0.87

และสำหรับค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และค่าเฉดสี (h) ของไข่เทียมทรงเครื่องไม่มีสูตรใดเหมือนกับไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)

จากค่าสีทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ พบว่า ไข่เทียมทรงเครื่องสูตรที่มีความใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุดคือสูตรที่ 23 ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) จากผลิตภัณฑ์ต้นแบบใน 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเข้มสี โดยสูตรนี้ประกอบด้วยผงถั่วลูกไก่ 21.62% อควาฟาบา 16.22% แป้งมันสำปะหลัง 0.00% แป้งข้าวเจ้า 8.11% และน้ำกรอง 54.05% เมื่อพิจารณาควบคู่กับคุณลักษณะของวัตถุดิบ อควาฟาบามีองค์ประกอบของโปรตีน และแป้งที่สามารถช่วยให้เนื้อผลิตภัณฑ์มีความใส และสว่างขึ้น ส่วนแป้งข้าวเจ้า มีสมบัติของการเกิดเจลขุ่น ส่งผลต่อภาพรวมของเฉดสีให้ดูคล้ายกับผลิตภัณฑ์จากไข่ทรงเครื่อง (Day, 2013; Pathare et al., 2013) ในขณะที่การไม่ใช้แป้งมันสำปะหลัง อาจช่วยเพิ่มผลของเฉดสีขุ่น หรือสว่างขึ้นที่เกิดจากอะไมโลสบางชนิด (Juliano, 1985) ดังนั้นสูตรที่ 23 จึงมีศักยภาพในการนำไปพัฒนาต่อในด้านการปรับปรุงเนื้อสัมผัส หรือรสชาติ เนื่องจากมีลักษณะค่าสีใกล้เคียงผลิตภัณฑ์ต้นแบบมากที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์ทดแทนไข่ (Pathare et al., 2013)

ในส่วนของไข่เทียมทรงเครื่องสูตรที่ 18 มีความแตกต่างจากไข่ไก่ทรงเครื่องมากที่สุดในทุกๆ พารามิเตอร์ของสี (p≤0.05) ซึ่งอาจเกิดจากสัดส่วนส่วนผสมที่โดดเด่นคือผงถั่วลูกไก่ 12.90% อควาฟาบา 19.95% แป้งมันสำปะหลัง 9.68% แป้งข้าวเจ้า 0.00% และน้ำกรอง 58.07% การมีแป้งมันสำปะหลังในปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ค่อนข้างสูง อาจส่งผลต่อโครงสร้าง และการกระจายแสงของผลิตภัณฑ์ ทำให้ค่าสีแตกต่างจากต้นแบบ ในขณะที่สูตรที่ 23 ที่มีการเพิ่มปริมาณผงถั่วลูกไก่ และแป้งข้าวเจ้าในสูตรนี้ อาจช่วยรักษาความสมดุลของโทนสีและความสว่างได้ดีกว่า ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของส่วนผสมโดยเฉพาะโปรตีนและแป้งมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมคุณสมบัติสีของไข่เทียมทรงเครื่อง และเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการพัฒนาสูตรให้ใกล้เคียงกับต้นแบบมากที่สุด (Pathare et al., 2013; Juliano, 1985)

4.1.3 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไข่เทียมทรงเครื่องผ่านฟังก์ชัน Response Optimizer

การทำนายหาสูตรที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาสูตรไข่เทียมทรงเครื่อง เป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยให้สามารถเลือกสัดส่วนของวัตถุดิบตามลักษณะที่ต้องการ อย่างลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค การใช้โปรแกรม Design-Expert 13 ในการวิเคราะห์ข้อมูลจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยโปรแกรมดังกล่าวมีฟังก์ชัน Response Optimizer ที่คอยทำหน้าที่วิเคราะห์ค่าตอบสนอง (Response variables) จากข้อมูลในการทดลอง เพื่อทำนายหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในการทำนายผลของไข่เทียมทรงเครื่องได้ใช้ผลจากการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสในหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผ่าน Response Optimizer ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สัดส่วนของไข่เทียมทรงเครื่องสูตรคัดเลือกจากฟังก์ชัน Response Optomizer

	ผงถั่วลูกไก่ (%)	อคาฟาบา (%)	แป้งมันสำปะหลัง (%)	แป้งข้าวเจ้า (%)	น้ำกรอง (%)
ไข่เทียมทรงเครื่องสูตรคัดเลือก (AEC)	19.35	4.00	6.45	0.13	70.07

***หมายเหตุ** AEC ย่อมาจาก ไข่เทียมทรงเครื่องจากถั่วลูกไก่ (Artificial egg products from chickpeas)

4.1.3.1 ผลการเปรียบเทียบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่ทรงเครื่อง กับไข่เทียมทรงเครื่อง

จากการวิเคราะห์ผ่านฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมของไข่เทียมทรงเครื่อง (ตารางที่ 4.3) ได้ถูกนำมาขึ้นรูปจริง เพื่อเปรียบเทียบกับคำนาย และไข่ทรงเครื่อง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยเน้นการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคโดยตรง เช่น ความแน่น ความยืดหยุ่น และความเหนียวของผลิตภัณฑ์ (Szczesniak, 2002) โดยลักษณะทางเนื้อสัมผัสถูกตรวจสอบผ่านค่าทางกล ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) การคืนตัว (Springiness) ความสามารถในการยึดเกาะกันภายใน (Cohesiveness) พลังงานการเคี้ยวของอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) และอาหารแข็ง (Chewiness) ผลการตรวจสอบ พบว่าไข่เทียมทรงเครื่องที่ได้จากการทำนาย มีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับค่าที่โปรแกรมทำนายไว้ในทุกตัวแปร ยกเว้นค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง (Chewiness) ที่มีความแตกต่าง ($p \leq 0.05$) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่อง พบว่าค่าความแข็ง (Hardness) และการคืนตัว (Springiness) เป็นเพียงสองพารามิเตอร์ที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) แสดงให้เห็นว่าสูตรคัดเลือกสามารถพัฒนาลักษณะเนื้อสัมผัสได้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบในระดับหนึ่ง แต่ยังมีบางด้านที่จำเป็นต้องปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมลักษณะทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ต้นแบบอย่างไข่ทรงเครื่อง

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องจากการทำนาย และไข่เทียมทรงเครื่องจากการทดลอง

	Hardness^{ns}	Springiness^{ns}	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
ไข่ทรงเครื่อง	247.88±0.00	0.99±0.00	0.57±0.00^{b}	142.85±0.00^{b}	142.46±0.00^{b}
ไข่เทียมทรงเครื่องจากการทำนาย	246.77±0.00	0.98±0.00	0.62±0.00^{a}	157.09±0.00^{a}	142.76±0.00^{b}
ไข่เทียมทรงเครื่องจากการทดลอง	248.01±0.00	0.98±0.00	0.68±0.00^{a}	159.64±0.00^{a}	145.33±0.00^{a}

***หมายเหตุ** ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

เนื่องจากการเปรียบเทียบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องจากการทำนาย และไข่เทียมทรงเครื่องจากการทดลอง จากตารางที่ 4.4 พบว่า ไข่ทั้งสามชนิด มีค่าความแข็ง และค่าการคืนตัว ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) และใกล้เคียงกันในทุก ๆ ด้านระหว่างไข่เทียมทรงเครื่องจากการทำนาย และการทดลอง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายของแบบจำลองที่สร้างจากฟังก์ชัน Response Optimizer ในการทำนายสูตรที่ให้เนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องอย่างแม่นยำในระดับหนึ่ง

ดังนั้น จึงสามารถนำสูตรที่ได้รับจากการทำนาย มาใช้ในการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบปริมาณน้ำอิสระ กับความชื้น (หัวข้อ 4.1.3.2) และการพัฒนาไข่เทียมทรงเครื่องร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ในหัวข้อถัดไป (หัวข้อ 4.2)

4.1.3.2 ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำอิสระ และความชื้น

ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity; Aw) และความชื้น (Moisture content) เป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพทางกายภาพ และความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะในแง่ของลักษณะเนื้อสัมผัส และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสื่อมเสียทางจุลินทรีย์ (Fennema, 1996; Rahman, 2007) โดยปริมาณน้ำอิสระ เป็นตัวชี้วัดของปริมาณน้ำที่อยู่ในสถานะพร้อมใช้งานในระบบอาหาร ซึ่งแตกต่างจากความชื้นที่วัดจากปริมาณน้ำโดยรวมของอาหาร โดยปริมาณน้ำอิสระที่สูงมักมีความสัมพันธ์กับความชื้นที่สูง และเนื้อสัมผัสที่นุ่ม อย่างผลิตภัณฑ์ประเภทไข่ ที่มีปริมาณน้ำอิสระสูงกว่า 0.97 และความชื้นมากกว่า 65 % (Jay et al., 2005) ซึ่งจากผลการตรวจสอบปริมาณน้ำอิสระ และความชื้น แสดงในตาราง 4.5 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบไข่ทรงเครื่อง กับไข่เทียมทรงเครื่อง AEC ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) แสดงให้เห็นว่า ไข่เทียมทรงเครื่องมีปริมาณน้ำในระบบได้ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่อง ซึ่งถือเป็นข้อบ่งชี้ถึงความเหมาะสมของสูตร AEC ที่ได้รับจากการทำนายจากฟังก์ชัน Response Optimizer

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างไข่ทรงเครื่อง และไข่เทียมทรงเครื่องต่อปริมาณน้ำอิสระ และความชื้น

สูตร	ปริมาณน้ำอิสระ^{ns}	ความชื้น ($\%_{WB}$)^{ns}
ไข่ทรงเครื่อง (ควบคุม)	0.98±0.00	66.74±0.43
ไข่เทียมทรงเครื่องสูตรคัดเลือก (AEC)	0.97±0.02	67.15±0.45

***หมายเหตุ** ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)
AEC ย่อมาจาก ไข่เทียมทรงเครื่องจากถั่วลูกไก่ (Artificial egg products from chickpeas)

จากผลการตรวจสอบปริมาณน้ำอิสระ และความชื้น จากตารางที่ 4.5 พบว่า มีปริมาณน้ำอิสระ และความชื้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.97 – 0.98 และ 66 – 67 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ไข่เทียมทรงเครื่อง AEC สามารถจำลองคุณสมบัติเชิงน้ำได้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบอย่างไข่ทรงเครื่อง ถือเป็นช่วงค่าที่เหมาะสมต่อการคงสภาวะความนุ่ม ชุ่มชื้น และเนื้อสัมผัสแบบอาหารกึ่งเหลว คล้ายกับผลิตภัณฑ์อย่างไข่ต้ม หรือไข่ตุ๋น (Jay et al., 2005; Rahman, 2007)

เมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะเนื้อสัมผัสในตารางที่ 4.9 พบว่า ไข่เทียมทรงเครื่อง AEC ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องในด้านความแข็ง และการคืนตัว (p>0.05) ในขณะที่ค่าความสามารถในการยึดเกาะ พลังงานการเคี้ยว และพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็งมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05) แสดงให้เห็นว่า การที่ไข่เทียมทรงเครื่องมีปริมาณน้ำอิสระ และปริมาณน้ำที่สูงไม่ได้ลดคุณสมบัติทางกลของเนื้อสัมผัส

การรักษาสมดุลของความชื้นในระดับนี้ (67 - 68 %) มีบทบาทสำคัญในการคงโครงสร้างเจลให้มีความยืดหยุ่น และไม่แห้งจนเกินไป ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบของส่วนผสมในตารางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกรองปริมาณ 50 กรัม และอดความฟาบาปริมาณ 2.86 กรัม ที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำสูง และช่วยเพิ่มความหนืดเล็กน้อยในระบบอาหาร (Erem et al., 2023; Day et al., 2021)

นอกจากนี้ ผงถั่วลูกไก่ที่เติมลงไปในปริมาณ 13.81 กรัม เป็นแหล่งของโปรตีน และเส้นใยอาหาร ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับ และกักเก็บน้ำ รวมถึงช่วยในการคงรูปของระบบอาหาร (Solanke et al., 2021) ในขณะเดียวกันแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ร่วมกันในสูตร แม้จะมีความสำคัญในการสร้างโครงสร้างให้คงตัว แต่ก็มีคุณสมบัติในการดูดซับ และกักเก็บน้ำไว้ภายในผลิตภัณฑ์เช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่ไม่มีการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์หลังการขึ้นรูป ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นคงอยู่ในระดับสูง (Petchsomrit และ Leelaphiwat, 2015)

ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่าปริมาณน้ำอิสระ และความชื้นในไข่เทียมทรงเครื่อง AEC ยังคงอยู่ในระดับเดียวกับไข่ทรงเครื่อง โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพขององค์ประกอบหลักที่คอยรักษาความสมดุลของระบบน้ำในไข่เทียมทรงเครื่อง แม้ยังไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในสูตรก็ตาม

4.2 การปรับปรุงคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์

แม้ว่าไข่เทียมทรงเครื่องสูตรคัดเลือก (AEC) ที่ได้จากในหัวข้อ 4.1.3 มีผลลัพธ์เชิงกายภาพที่อยู่ในเกณฑ์น่าพอใจ โดยมีลักษณะเนื้อสัมผัสทางกลทั้ง 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ความยืดหยุ่น (Springiness) ความเหนียว (Gumminess) การเคี้ยว (Chewiness) และการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Cohesiveness) ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่จากการสังเกตด้วยสายตาและประสาทสัมผัสจากรูปภาพในตารางก. (ในภาคผนวก ก.) พบว่า ไข่เทียมทรงเครื่อง มีข้อจำกัดในด้านคุณลักษณะผิวภายนอกบางประการ เช่น ความมันวาวที่ยังไม่เพียงพอ และให้ความรู้สึกขณะสัมผัสในลักษณะที่คล้ายกับการบีบแป้งมากกว่าการบีบเนื้อไข่จริง ซึ่งมีผลต่อความรู้สึกที่ผู้บริโภครับรู้เมื่อสัมผัสผลิตภัณฑ์โดยตรง

นอกจากนี้ ภายใต้สภาวะความร้อน และแรงดันสูงจากกระบวนการรีทอร์ทที่ต้องดำเนินการในขั้นถัดไป ถึงแม้ว่ามีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดูเหมาะสมขณะยังไม่ผ่านกระบวนการรีทอร์ท แต่ไข่เทียมทรงเครื่อง อาจสูญเสียความเสถียร อย่างเกิดการยุบตัว การแยกชั้นของส่วนประกอบ หรือความแน่นเนื้อที่ลดลง ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคทั้งด้านเนื้อสัมผัสและรูปลักษณ์โดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการปรับปรุงสูตรไข่เทียมทรงเครื่องโดยเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่มีคุณสมบัติทนความร้อน และสามารถเสริมสร้างโครงสร้างเจลให้มีความเสถียรยิ่งขึ้น ได้แก่ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน (Alavi et al., 2018) เพื่อมุ่งหวังให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการรีทอร์ทยังคงรูปร่างได้ดี มีเนื้อสัมผัสแน่นสมจริง และมีลักษณะผิวที่ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุด

ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาสูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ทั้งแบบชนิดเดียว สองชนิด และสามชนิดร่วมกันตามลำดับในหัวข้อต่อไป เพื่อเปรียบเทียบผลต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส โดยมุ่งเน้นให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการผสมผสานไฮโดรคอลลอยด์มากกว่าการใช้ชนิดเดียวอย่างโดดเดี่ยว โดยการผสมไฮโดรคอลลอยด์แบบสองชนิดและสามชนิดร่วมกันออกแบบการทดลองด้วย Full factorial design (FFD)

4.2.1 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคลออยด์ชนิดเดียว

สำหรับการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียวในการผสมขึ้นรูปไข่เทียมทรงเครื่อง ที่มีสูตรพื้นฐานมาจากสูตรคัดเลือก AEC ที่มีส่วนผสมหลัก คือ ผงถั่วลูกไก่ 13.81 % อควาฟาบา 2.86 % แป้งมันสำปะหลัง 4.60 % แป้งข้าวเจ้า 0.09 % และน้ำกรอง 50.00 % และมีสัดส่วนใสการผสมไฮโดรคอลลอยด์ตามตารางที่ 3.3 ทั้งหมด 9 สูตร พบว่า มีเพียงสูตร 5 สูตร คือสูรที่ 3, 4, 6, 7 และ 9 ที่สามารถขึ้นรูปเป็นไข่เทียมทรงเครื่องได้ โดยมีผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียว

สูตร	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
C	0	0	0	248.64±11.55^{e}	0.99±0.01^{b}	0.56±0.02^{c}	140.34±4.70^{c}	141.52±3.65^{c}
3	0	0	1	556.42±30.79^{c}	1.40±0.21^{a}	0.57±0.03^{c}	360.13±19.76^{b}	379.83±34.53^{b}
4	3	0	0	196.63±16.23^{f}	0.99±0.00^{b}	0.76±0.02^{a}	152.78±9.13^{c}	161.03±6.95^{c}
6	0	0	3	945.02±25.80^{a}	0.98±0.03^{b}	0.58±0.02^{c}	552.95±3.49^{a}	534.01±8.38^{a}
7	5	0	0	301.03±12.50^{d}	0.92±0.00^{b}	0.64±0.00^{b}	185.33±10.34^{c}	171.92±14.79^{c}
9	0	0	5	689.27±122.71^{b}	1.00±0.00^{b}	0.59±0.02^{c}	415.48±96.04^{b}	425.75±115.20^{b}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากจากตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องที่ผสมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียว พบว่า ไม่มีสูตรใดที่มีค่าความแข็ง (Hardness) ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่อง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ อย่างไรก็ตาม พบว่าในพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น ความยืดหยุ่น (Springiness) ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) และกึ่งแข็ง (Chewiness) หลายสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องโดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (p>0.05) โดยเฉพาะใน สูตรที่ 4 และสูตรที่ 7 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ที่ดีในด้านเหล่านี้

ในส่วนขององค์ประกอบ พบว่า สูตรที่ 4 ใช้กัวร์กัมในระดับ 3% ขณะที่ สูตรที่ 7 ใช้กัวร์กัมในระดับ 5% สะท้อนว่าไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียวที่มีศักยภาพในการพัฒนาเนื้อสัมผัสได้ดีที่สุด คือ กัวร์กัม ซึ่งมีคุณสมบัติในการสร้างโครงสร้างเจล และเพิ่มความหนืดได้ดี (Mudgil & Barak, 2013) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แซนแทนกัม หรือคาราจีแนนเพียงอย่างเดียว พบว่า ผลลัพธ์ด้านลักษณะเนื้อสัมผัสมีความแตกต่างจากไข่ทรงเครื่องมากกว่าในทุกพารามิเตอร์

แม้ว่าการใช้กัวร์กัมเดี่ยว ๆ จะให้ผลบางประการที่น่าพึงพอใจ แต่ยังไม่สามารถปรับค่าความแข็งให้ใกล้เคียงผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้ จึงสะท้อนว่า การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียวอาจไม่เพียงพอในการจำลองลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่ทรงเครื่องได้ครบถ้วน โดยเฉพาะค่าความแข็งที่มีผลต่อการรับรู้เนื้อสัมผัสของผู้บริโภคในขั้นต้น การประยุกต์ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แบบผสมจึงมีความจำเป็นในการสร้างสมดุลระหว่างคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อเลียนแบบเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

4.2.2 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์สองชนิด

สำหรับการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกันสองชนิดในการผสมขึ้นรูปไข่เทียมทรงเครื่อง ที่มีสูตรพื้นฐานมาจากสูตรคัดเลือก AEC ที่มีส่วนผสมหลัก คือ ผงถั่วลูกไก่ 13.81 % อควาฟาบา 2.86 % แป้งมันสำปะหลัง 4.60 % แป้งข้าวเจ้า 0.09 % และน้ำกรอง 50.00 % และมีสัดส่วนใสการผสมไฮโดรคอลลอยด์ตามตารางที่ 3.3 ทั้งหมด 27 สูตร ประกอบไปด้วย กัวร์กัมผสมแซนแทนกัม (AB) 9 สูตร กัวร์กัมผสมคาราจีแนน (AC) 9 สูตร และแซนแทนกัมผสมคาราจีแนน (BC) 9 สูตร แต่ทั้งหมดมีเพียง 16 สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ ได้แก่ สูตร AB มี สูตรที่ 10, 12, 13, 15 และ 18 สูตร AC มีสูตรที่ 19, 20, 21, 22, 25 และ 27 และสูตร BC มีสูตรที่ 30, 31, 32, 34, 35 และ 36 ที่สามารถขึ้นรูปเป็นไข่เทียมทรงเครื่องได้ โดยมีผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 4.7 – 4.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB)

สูตร	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)	Hardness (g)	Springiness ns	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
C	0	0	0	248.64±11.55^{b}	0.99±0.01	0.56±0.02^{d}	140.34±4.70^{d}	141.52±3.65^{b}
10	5	1	0	387.35±2.29^{a}	0.99±0.02	0.71±0.01^{a}	284.52±4.06^{a}	258.54±28.09^{a}
12	3	1	0	229.93±11.26^{c}	1.10±0.16	0.68±0.02^{b}	161.24±0.10^{c}	177.13±25.69^{b}
13	5	5	0	379.44±14.44^{a}	0.99±0.00	0.59±0.01^{d}	186.48±7.83^{b}	183.19±10.19^{b}
15	3	5	0	253.46±7.38^{b}	0.97±0.00	0.62±0.02^{c}	148.49±3.91^{d}	155.77±4.00^{b}
18	5	3	0	192.86±3.48^{d}	0.99±0.00	0.56±0.02^{d}	97.45±5.66^{e}	94.73±6.47^{c}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.7 ที่แสดงผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) มีเพียง 1 สูตรที่ไม่แตกต่างกับไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมากที่สุด ($p>0.05$) คือ สูตรที่ 15 ซึ่งมีสัดส่วนกัวร์กัมกับแซนแทนกัน เท่ากับ 3 และ 5 % ตามลำดับ โดยมีพารามิเตอร์ค่าความแข็ง ค่าการคืนตัว ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว และแข็งที่เหมือนกับไข่ทรงเครื่อง

ความสำเร็จของสูตรนี้อาจเกิดจาก การเสริมฤทธิ์กันของไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิด (synergistic effect) โดยกัวร์กัมซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำหน้าที่เพิ่มความหนืดของไข่เทียมทรงเครื่อง และช่วยรักษาโครงสร้างให้มีความแน่น (Mudgil & Barak, 2013) ขณะที่แซนแทนกัมมีบทบาทในการเพิ่มความยืดหยุ่น และช่วยสร้างโครงข่ายโพลิเมอร์ร่วมกับแป้ง และโปรตีน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการคืนตัวหลังจากแรงกด (Imeson, 2010) การใช้แซนแทนกัมในปริมาณที่สูงกว่ากัวร์กัมในสูตรที่ 15 จึงอาจเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการสร้างสมดุลระหว่างความแข็ง ความยืดหยุ่น และความสามารถในการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่ผู้บริโภครับรู้ผ่านการเคี้ยว (Jridi et al., 2015)

ตารางที่ 4.8 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมกัวร์กัม และคาราจีแนน (AC)

สูตร	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)	Hardness (g)	Springiness ns	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
C	0	0	0	248.64±11.55^{a}	0.99±0.01	0.56±0.02^{b}	140.34±4.70^{a}	141.52±3.65^{ab}
19	3	0	3	119.78±11.94^{b}	0.99±0.00	0.62±0.06^{ab}	67.17±4.35^{b}	66.77±4.37^{b}
21	5	0	3	273.64±3.60^{a}	0.99±0.00	0.68±0.02^{a}	136.05±14.11^{a}	180.36±25.57^{a}
22	3	0	5	225.69±3.93^{a}	1.00±0.00	0.65±0.01^{ab}	152.01±9.76^{a}	145.85±7.50^{ab}
25	5	0	1	268.25±1.54^{a}	0.99±0.00	0.60±0.02^{b}	136.20±0.45^{a}	135.00±0.21^{ab}
27	5	0	5	227.25±79.28^{a}	1.00±0.00	0.62±0.03^{ab}	119.06±43.19^{a}	159.64±14.31^{ab}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องที่ผสม กัวร์กัมและคาราจีแนน (AC) พบว่าในบรรดา 5 สูตร มี 4 สูตร ที่ลักษณะเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างจากไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ได้แก่ สูตรที่ 21, 22, 25 และ 27 โดยสูตรเหล่านี้มีการใช้กัวร์กัมและคาราจีแนนในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ สูตรที่ 21 มีการใช้กัวร์กัมผสมคาราจีแนนในสัดส่วน 5 และ 3 %ตามลำดับ สูตรที่ 22 มีสัดส่วน 3 และ 5 % ตามลำดับ สูตรที่ 25 มีสัดส่วน 5 และ 1 % ตามลำดับ และสูตรที่ 27 มีสัดส่วน 5 และ 5 %ตามลำดับ แม้ว่าสูตรที่ 21 จะมี ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Cohesiveness) แตกต่างจากไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในพารามิเตอร์ด้านเนื้อสัมผัสอื่น ๆ อย่าง ความแข็ง (Hardness) ความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าพลังงานในการเคี้ยว (Chewiness) กลับไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญสถิติ ($p>0.05$)

ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับต้นแบบในสูตรกลุ่ม AC นี้ อธิบายได้จากคุณสมบัติเสริมฤทธิ์กันของกัวร์กัม และคาราจีแนน โดยกัวร์กัมมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความหนืด และคงตัวของระบบเจล ขณะที่คาราจีแนน มีความสามารถในการสร้างเจลที่แน่นและให้โครงสร้างที่มั่นคง โดยเฉพาะในสภาวะที่มีความร้อนสูง (Campo et al., 2009; Imeson, 2010) เมื่อใช้ร่วมกันในสัดส่วนที่เหมาะสม จะช่วยให้เกิดเจลที่มีโครงข่ายแน่นหนา แต่ยังคงมีความยืดหยุ่นเพียงพอ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับเนื้อสัมผัสของไข่ทรงเครื่อง

อย่างไรก็ตาม ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในที่ต่ำในบางสูตร อาจสะท้อนถึงการกระจายตัวของคาราจีแนนในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ไม่สมดุลในบางสัดส่วน ทำให้โครงข่ายเจลมีช่องว่างมากขึ้น และยึดเกาะกันได้น้อยลง (Funami et al., 2005) ดังนั้น การเลือกใช้สัดส่วนที่เหมาะสมจึงเป็นประเด็นสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

ตารางที่ 4.9 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมแซนแทนกัมและคาราจีแนน (BC)

สูตร	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)	Hardness (g)	Springiness ns	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
C	0	0	0	248.64±11.55^{e}	0.99±0.01	0.56±0.02^{d}	140.34±4.70^{e}	141.52±3.65^{d}
30	0	3	1	358.19±20.56^{d}	0.97±0.01	0.62±0.02^{c}	192.42±4.30^{d}	178.78±3.01^{d}
31	0	5	3	491.47±9.88^{b}	1.00±0.02	0.65±0.01^{b}	286.28±9.75^{b}	355.93±10.25^{b}
32	0	3	5	365.50±23.21^{d}	0.96±0.01	0.57±0.01^{d}	157.33±2.37^{e}	153.21±3.65^{d}
34	0	5	5	441.18±14.87^{c}	0.98±0.00	0.59±0.01^{d}	248.03±23.01^{c}	233.47±12.2^{c}
35	0	3	3	349.86±6.78^{d}	0.98±0.00	0.74±0.01^{d}	350.74±31.06^{d}	389.50±27.90^{c}
36	0	1	5	576.71±7.99^{a}	0.96±0.00	0.58±0.02^{a}	209.97±8.48^{a}	218.01±14.73^{a}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.9 ซึ่งแสดงผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องที่ผสมแซนแทนกัมและคาราจีแนน (BC) พบว่า มีเพียงสูตรที่ 32 ที่ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุดในทุกพารามิเตอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ยกเว้นค่าความแข็ง (Hardness) ที่มีค่าความแข็งมากกว่าไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่ 32 มีสัดส่วนแซนแทนกัมกับกัวร์กัม เท่ากับ 3 และ 5 %ตามลำดับ

ลักษณะผลลัพธ์ดังกล่าว อธิบายได้จาก บทบาทเชิงหน้าที่ของคาราจีแนน และแซนแทนกัมในการสร้างโครงสร้างเจลที่มีความแน่นและยืดหยุ่น โดยเฉพาะในกรณีของคาราจีแนน ซึ่งสามารถสร้างเจลที่แข็งและคงรูปได้ดีเมื่อใช้ในปริมาณสูง เช่น 5% ในสูตรนี้ (Campo et al., 2009) ส่วนแซนแทนกัมมีคุณสมบัติเด่นในการเพิ่มความยืดหยุ่น (springiness) และความเหนียวแน่นของเจล ซึ่งช่วยส่งเสริมคุณสมบัติเนื้อสัมผัสในภาพรวม (Imeson, 2010)

อย่างไรก็ตาม การที่ค่าความแข็งยังคงสูงกว่าไข่ทรงเครื่อง อาจสะท้อนถึงความเข้มข้นของคาราจีแนนที่มากเกินระดับที่เหมาะสม ส่งผลให้เจลมีโครงข่ายที่แน่นเกินไป จนเกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่แน่นและแข็งมากกว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Funami et al., 2005) จึงอาจพิจารณาว่าสัดส่วนคาราจีแนนในระดับ 5% เมื่อใช้ร่วมกับแซนแทนกัมในสูตรนี้ ยังคงต้องการการปรับลดในขั้นต่อไป เพื่อให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในพารามิเตอร์ของความแข็ง

4.2.3 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์สามชนิด

สำหรับการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกันสามชนิดในการผสมขึ้นรูปไข่เทียมทรงเครื่อง ที่มีสูตรพื้นฐานมาจากสูตรคัดเลือก AEC ที่มีส่วนผสมหลัก คือ ผงถั่วลูกไก่ 13.81 % อควาฟาบา 2.86 % แป้งมันสำปะหลัง 4.60 % แป้งข้าวเจ้า 0.09 % และน้ำกรอง 50.00 % และมีสัดส่วนใสการผสมไฮโดรคอลลอยด์ตามตารางที่ 3.3 ทั้งหมด 27 สูตร แต่มีเพียง 23 สูตรที่สามารถขึ้นรูปเป็นไข่เทียมทรงเครื่องได้ ได้แก่สูตรที่ 37, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62 และ 63โดยมีผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสดังแสดงในตารางที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมกัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกัน

สูตร	กัวร์กัม (%)	แซนแทนกัม (%)	คาราจีแนน (%)	Hardness (g)	Springiness ns	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
C	0	0	0	248.64±11.55*	0.99±0.01	0.56±0.02^{cd}	140.34±4.70	141.52±3.65
37*	1	3	3	193.72±6.78*	0.99±0.01	0.60±0.04^{bcd}	106.30±7.58	111.31±10.90*
38	3	1	3	454.70±0.69	1.00±0.00	0.67±0.0^{abc}	278.54±56.2	308.32±10.05
39*	5	1	5	709.14±26.42	0.95±0.01	0.58±0.01^{bcd}	419.35±2.37^{b}	386.69±20.52
40*	3	5	1	253.82±19.08*	0.96±0.00	0.52±0.02^{bcd}	156.38±19.90	150.38±16.96*
41	3	1	1	349.19±5.70	1.00±0.00	0.67±0.01^{abc}	258.45±6.35*	249.4710.59
42	3	5	3	340.93±5.87	0.98±0.02	0.50±0.02^{bcd}	181.52±11.14	178.84±14.02
43*	1	3	5	218.68±8.59*	1.00±0.00	0.58±0.02^{d}	119.12±6.19	118.66±6.29*
45	5	5	5	383.53±5.30	1.00±0.00	0.62±0.0^{cd}	235.12±22.81	224.31±6.12*
46	1	1	5	313.05±3.02	1.00±0.00	0.65±0.00^{bcd}	206.36±3.80	206.90±3.65*
47	1	1	3	292.87±17.70	1.00±0.00	0.64±0.04^{bcd}	194.37±12.39	193.95±12.18*
48	5	5	3	359.46±18.10	0.99±0.00	0.60±0.01^{bcd}	232.01±9.89	228.27±11.98*
49*	1	5	5	215.10±4.99*	0.96±0.03	0.65±0.03^{bcd}	124.95±8.44*	120.42±6.93*
50	3	3	5	319.89±2.58	1.01±0.03	0.64±0.01^{bcd}	210.94±0.73	201.30±3.3*
52	5	3	1	320.96±4.85	1.00±0.0	0.65±0.01^{bcd}	204.97±0.67	215.89±20.57*
53*	1	5	3	234.95±3.94*	0.98±0.0	0.62±0.01^{bcd}	157.05±10.9*	132.14±6.97*
54	3	1	5	410.61±1.33	0.99±0.03	0.78±0.25^{a}	253.24±43.14	355.64±86.26
55	5	3	3	352.54±39.14	1.00±0.00	0.62±0.01^{bcd}	248.08±3.2	195.99±7.76*
56	5	5	1	327.39±19.39	1.00±0.00	0.63±0.01^{bcd}	210.93±10.4	211.93±7.21*
57*	3	3	3	266.99±14.41*	1.00±0.00	0.67±0.02^{abc}	185.08±6.42	193.56±21.60*
60	5	1	3	624.01±8.92	1.02±0.06	0.70±0.00^{ab}	412.14±60.17	378.2437.89
61	3	5	5	315.25±15.00	1.00±0.00	0.56±0.02^{cd}	224.90±14.7	186.31±5.59*
62	5	1	1	582.37±6.40	0.98±0.02	0.64±0.03^{bcd}	391.42±17.9	371.43±20.58
63	5	3	5	447.87±66.80	0.94±0.00	0.60±0.00^{cbd}	277.26±10.46	268.89±7.04

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เครื่องหมายดอกจันทร์ (*) หมายถึง พารามิเตอร์นั้น ๆ ไม่แตกต่างทางสถิติกับไข่ทรงเครื่อง ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.10 พบว่า สูตรที่มีค่าความแข็ง (Hardness) ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับไข่ทรงเครื่อง ($p > 0.05$) ได้แก่ สูตรที่ 37, 39, 40, 43, 49, 53 และ 57 โดยสูตรเหล่านี้ยังแสดงให้เห็นว่า พารามิเตอร์ด้านลักษณะเนื้อสัมผัสอื่น ๆ เช่น ความยืดหยุ่น (Springiness) ความเหนียว (Cohesiveness) ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Chewiness) และแข็ง (Chewiness) มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับไข่ทรงเครื่อง ($p > 0.05$) ในหลายพารามิเตอร์เช่นกัน และสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันมากกว่าสูตรอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การผสมไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสามชนิด ได้แก่ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกัน สามารถส่งเสริมคุณลักษณะเชิงกล (mechanical properties) ของเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพียงชนิดเดียว หรือผสมเพียงสองชนิด โดยเฉพาะในการควบคุมค่าความแข็ง และพารามิเตอร์อื่น ๆ ให้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบอย่างไข่ทรงเครื่อง

ความสำเร็จในการสร้างเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงอาจมาจาก ผลเสริมฤทธิ์ร่วม (synergistic effect) ระหว่างไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสาม ซึ่งช่วยสร้างโครงสร้างเจลที่มีความสมดุลทั้งในแง่ของความแน่น ยืดหยุ่น และความสามารถในการคงตัว (Imeson, 2010; Campo et al., 2009; Mudgil & Barak, 2013) โดยกัวร์กัมทำหน้าที่เพิ่มความหนืดและช่วยพยุงโครงสร้างภายใน แซนแทนกัมช่วยในเรื่องความยืดหยุ่น และคาราจีแนนช่วยเสริมแรงยึดเหนี่ยวของเจลให้คงรูปได้ดี

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้ไฮโดรคอลลอยด์แบบผสมทั้งสามชนิดให้ผลลัพธ์ที่เสถียรและมีแนวโน้มเหมาะสมที่สุดในการพัฒนาไข่เทียมทรงเครื่องที่เลียนแบบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่ทรงเครื่องได้อย่างใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

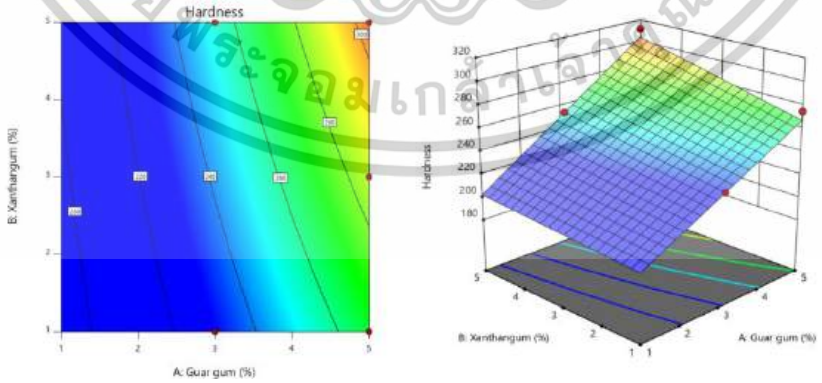
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของเนื้อสัมผัสไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์

4.2.4.1 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าความแข็ง

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องระหว่าง กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน แสดงในตารางที่ ง.1 (ภาคผนวก ง.) และพื้นผิวตอบสนองในภาพที่ 4.6a-c พบว่าการใช้กัวร์กัม (A) มีค่าสัมประสิทธิเป็นบวก (+107.93) แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่อง และมีค่า P น้อยกว่า 0.0001 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่แซนแทนกัม (B) มีผลในทิศทางตรงกันข้ามโดยลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (-72.34, $P < 0.0001$) ส่วนคาราจีแนน (C) มีผลในการเพิ่มค่าความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่อง (+33.66) เช่นเดียวกับกัวร์กัม (A) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.0203$) และสมการดังต่อไปนี้

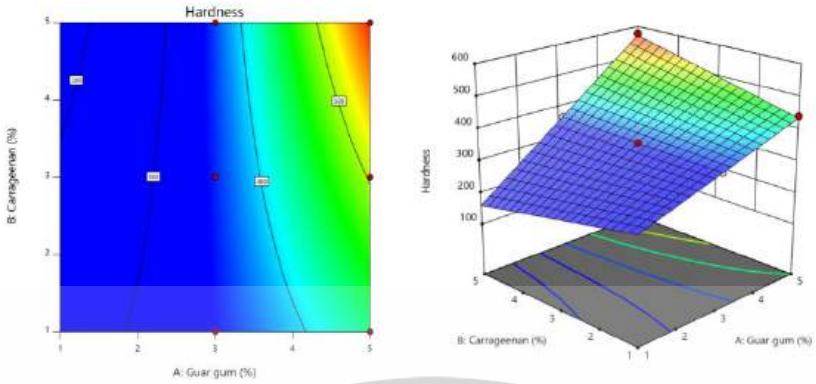
ปริมาณของค่าความแข็ง = 275.47 + 107.93A - 72.34B + 33.66C -54.25AB + 15AC - 10.86BC + 18.48A^2 + 88.77B^2 - 12.93C^2

สำหรับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) ให้ผลการลดลงต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (-54.25, $P = 0.0005$) แสดงให้เห็นว่าไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองมีผลต้านกันต่อโครงสร้างเจล ทั้งนี้ ผลยกกำลังสองของแซนแทนกัม (B^2) มีค่า $P < 0.0001$ และมีค่าสัมประสิทธิเป็นบวก (+88.77) ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของแซนแทนกัมที่มีต่อค่าความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่อง โดยเมื่อใช้ในระดับที่เหมาะสม เป็นไปได้ว่าเพิ่มความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องได้

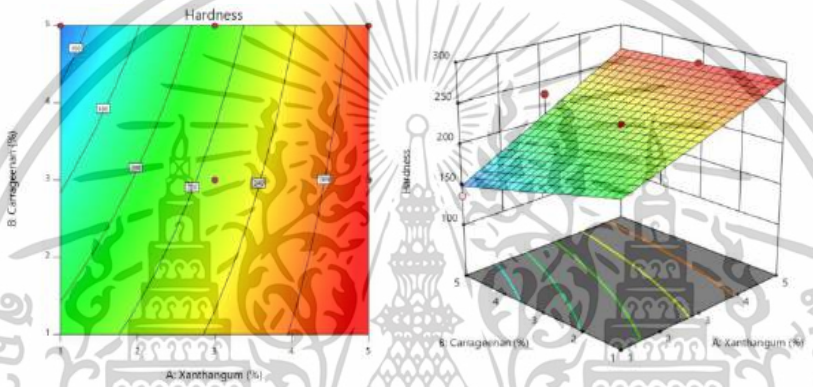


4.6a พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) ต่อค่าความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.6b พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AC) ต่อค่าความแข็ง



4.6c พื้นผิวตอบสนองของแซนแทนกัม และคาราจีแนน (BC) ต่อค่าความแข็ง

ภาพที่ 4.6a-c แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าความแข็ง ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.6 a-c แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าความแข็งต่ำ) ไปสู่สีแดง (ค่าความแข็งสูง) โดยการใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม (AB) ที่สุด ในปริมาณชนิดละ 5 % ส่งผลต่อค่าความแข็งมากที่สุด เนื่องจากกัวร์กัมมีคุณสมบัติในการสร้างความหนืดสูง และเสริมการยึดโยงทางโครงสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ร่วมกับแซนแทนกัมที่สามารถสร้างแรงระหว่างโมเลกุลได้ดีในระบบพอลิแซ็กคาไรด์ (Glicksman, 1986; Thakur et al., 1997)

สำหรับการใช้กัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน (AC) ในปริมาณชนิดละ 5 % เช่นเดียวกับ AB ส่งผลต่อค่าความแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องมากที่สุด เนื่องจากคาราจีแนนสามารถสร้างโครงสร้างเจลแบบแข็ง (rigid gel) ได้ โดยเฉพาะในระบบที่มีไอออนบวก และเมื่อรวมกับกัวร์กัมที่ให้ความหนืดสูง จะช่วยเสริมให้เกิดโครงสร้างที่มีความต้านทานแรงกดได้ดีขึ้น (Imeson, 2010; Wang et al., 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่การใช้แซนแทนกัมร่วมกับคาราจีแนน (BC) ต้องใช้ในปริมาณ 5% และ 1% ตามลำดับ แม้จะไม่ใช่อัตราส่วนที่เท่ากัน แต่ยังให้ค่าความแข็งสูงอย่างชัดเจน เนื่องจากแซนแทนกัมสามารถสร้างโครงข่ายระหว่างพอลิเมอร์ได้ และแม้คาราจีแนนในระดับ 1% จะไม่สร้างเจลเดี่ยวได้ดีนัก แต่เมื่อผสมกับแซนแทนกัมจะมีผลเสริมแรงในการเกิดโครงข่ายร่วม (synergistic effect) ที่เพิ่มความแข็งแรงของเจลได้ (Saha & Bhattacharya, 2010)

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ โมเดลการออกแบบ Box-Behnken Design (BBD) ได้วิเคราะห์เฉพาะผลของไฮโดรคอลลอยด์เป็นคู่ (2 ปัจจัย) ในแต่ละสูตรเท่านั้น จึงไม่สามารถระบุแนวโน้มของการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสามชนิดร่วมกัน (ABC) ได้โดยตรง แต่จากผลของคู่ผสมที่ศึกษาพบว่า กัวร์กัมและคาราจีแนนมีแนวโน้มเพิ่มความแข็งได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนแซนแทนกัมเมื่อนำมาใช้ร่วมกับอีกสองชนิด อาจแสดงผลทั้งเสริมแรง และลดแรงได้ตามสัดส่วนและลักษณะของสูตร (Glicksman, 1986; Saha & Bhattacharya, 2010)

และการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกันในผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่อง พบว่า มีผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยกัวร์กัม และคาราจีแนน มีแนวโน้มช่วยเพิ่มความแข็ง และความคงตัวของเจลได้ดี ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติในการดูดน้ำ และสร้างโครงสร้างเจลที่แน่น (Tharanathan & Mahadevamma, 2003) ในทางกลับกัน แซนแทนกัมมีบทบาทหลักในการเพิ่มความหนืดของระบบ แต่เมื่อนำมาใช้ร่วมกับกัวร์กัม และคาราจีแนน กลับพบว่ามีผลลดความแข็งของเจลลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นไปได้ว่าเกิดจากการรบกวนโครงข่ายเจลที่กัวร์กัมสร้างไว้ ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์นุ่มหรือแตกง่ายขึ้น

4.2.4.2 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าการคืนตัว

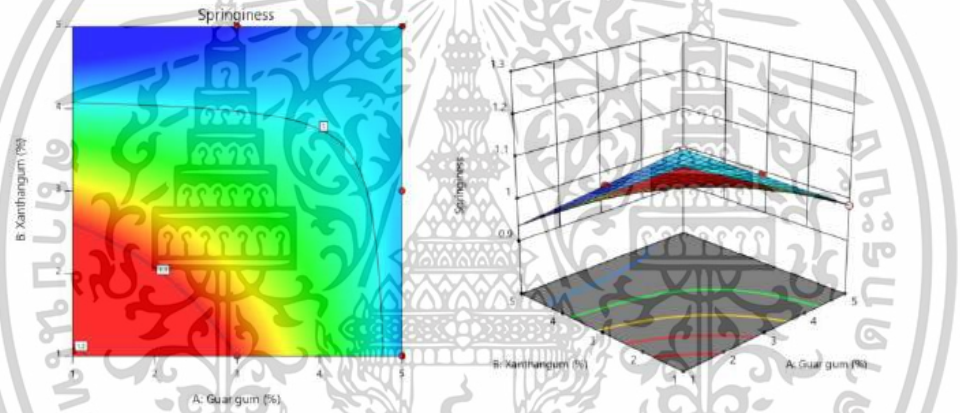
การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการคืนตัวของไข่เทียมทรงเครื่องระหว่างกัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน แสดงในตารางที่ ง.2 (ภาคผนวก ง.) และพื้นผิวตอบสนองในภาพที่ 4.7a-c พบว่า การใช้แซนแทนกัม (B) มีค่าสัมประสิทธิเป็นลบ (-0.0053) แสดงถึงแนวโน้มในการลดลงของค่าการคืนตัวของไข่เทียมทรงเครื่อง และมีค่า P เท่ากับ 0.0067 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และแสดงสมการดังต่อไปนี้

ปริมาณของค่าการคืนตัว = $1 + 0.0034A - 0.0053B + 0.0027C + 0.0182AB - 0.012AC + 0.0084BC - 0.0115A^2 - 0.0084B^2 - 0.0059C^2$

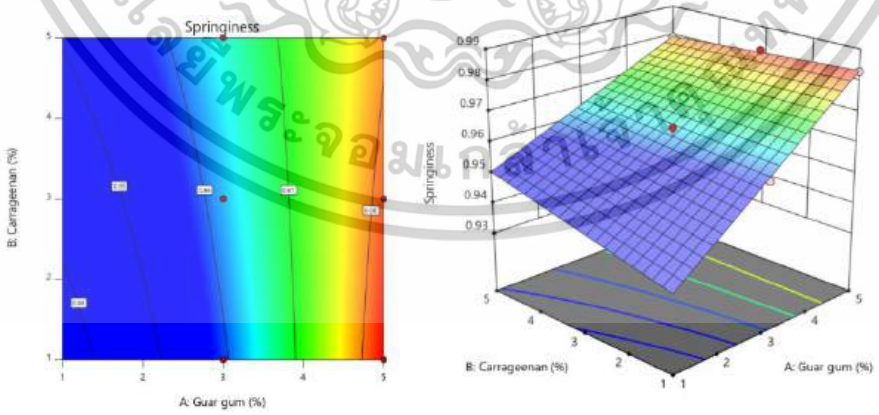
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB, +0.0182, P < 0.0001) กับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแซนแทนกัม และคาราจีแนน (BC, +0.0084, P = 0.0015) แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าการคืนตัว ซึ่งได้ผลตรงกันข้ามกับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัวร์กัม และคาราจีแนน (AC) ที่มีค่าสัมประสิทธิเป็นลบ (-0.0120, P = 0.0011) โดยที่การปฏิสัมพันธ์ทั้งหมดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

และสำหรับผลการยกกำลังของกัวร์กัม (A^2, -0.0115) และแซนแทนกัม (B^2, -0.0084) มีค่า P เท่ากับ 0.0019 และ 0.0131 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของกัวร์กัม และแซนแทนกันต่อค่าการคืนตัวของไข่เทียมทรงเครื่อง โดยเมื่อใช้ในระดับที่เหมาะสม อาจมีค่าการคืนตัวที่ลดลงได้

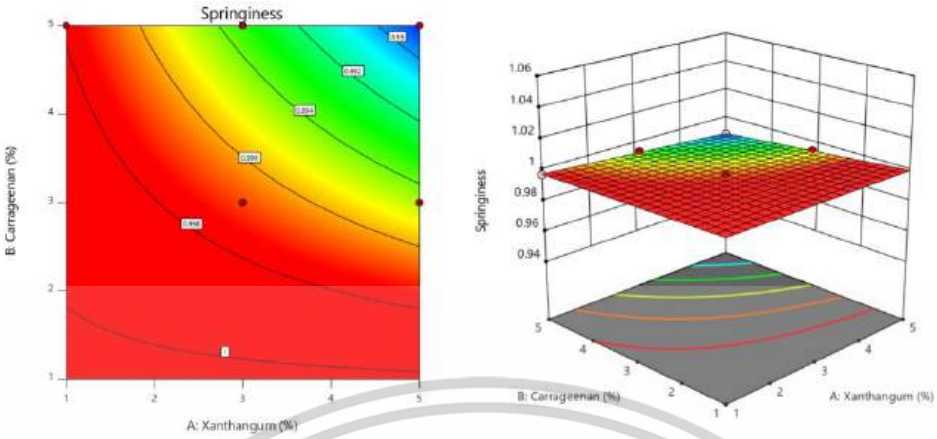


4.7a พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) ต่อค่าการคืนตัว



4.7a พื้นผิวตอบสนองของแซนแทน และคาราจีแนน (AC) ต่อค่าการคืนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.7c พื้นผิวตอบสนองของแซนแทนกัม และคาราจีแนน (BC) ต่อค่าการคืนตัว

ภาพที่ 4.7a-c แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าการคืนตัว ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.7 a-c แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าการคืนตัวต่ำ) ไปสู่สีแดง (ค่าการคืนตัวสูง) โดยการใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม (AB) ในปริมาณชนิดละ 1% ให้ลักษณะในการคืนตัวมากที่สุด เนื่องจากกัวร์กัมมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวแบบไม่มีการแตกแขนง ทำให้สามารถสร้างแรงอุ้มน้ำ และแรงคืนตัวได้ดี ในขณะที่แซนแทนกัมซึ่งมีโครงสร้างลักษณะกิ่ง (branched polysaccharide) มีแนวโน้มช่วยคงรูปร่าง และป้องกันการยุบตัวของโครงข่ายพอลิเมอร์ จึงส่งเสริมการคืนตัวของเจลได้เมื่อใช้ในระดับต่ำ (Phillips & Williams, 2009; BeMiller, 2019)

สำหรับการใช้กัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน (AC) ในปริมาณชนิดละ 5 และ 1% ตามลำดับ ให้ลักษณะการคืนตัวมากที่สุด เนื่องจาก พบว่ามีผลต่อการคืนตัวในระดับสูงเช่นกัน โดยคาดว่าเป็นผลจากโครงสร้างเจลที่แน่นของคาราจีแนนเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีไอออนบวก (เช่น K^+ หรือ Ca^{2+}) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของสายพอลิเมอร์แบบ Helical junction zones ซึ่งให้เจลที่มีความต้านทานการเสียรูปดีขึ้น และเมื่อรวมกับกัวร์กัมที่ช่วยเสริมแรงคืนรูป จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์คืนตัวได้มากขึ้น เมื่อใช้ในปริมาณ 5 และ 1% ตามลำดับ (Imeson, 2010; Glicksman, 1986)

อย่างไรก็ตาม การใช้แซนแทนกัมร่วมกับคาราจีแนน (BC) ในปริมาณชนิดละ 1-3% ให้ลักษณะการคืนตัวมากที่สุด อาจมาจากการเกิดเจลระหว่างคาราจีแนน และแซนแทนกัม ที่แม้แซนแทนกัมจะไม่สามารถสร้างเจลเดี่ยวได้ดีนัก แต่สามารถเสริมแรงกับโครงข่ายเจลของคาราจีแนนผ่านการเกิดพันธะไฮโดรเจนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น และแรงสปริงในโครงสร้างเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Saha & Bhattacharya, 2010; Thakur et al., 1997)

และจากผลการทำงานร่วมกันของไฮโดรคอลลอยด์แต่ละคู่ ทำให้เห็นได้ว่า การทำงานร่วมกันของไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสามชนิด อาจส่งผลต่อค่าการคืนตัวของไข่เทียมทรงเครื่อง แสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ที่มีความซับซ้อนในโครงสร้างของเจล โดยเฉพาะการใช้แซนแทนกัมในปริมาณที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มลดค่าการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะโครงสร้างที่หนืด และคงตัวสูงเกินไป ทำให้เจลมีความยืดหยุ่นน้อยลง (Phillips & Williams, 2009)

4.2.4.3 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร

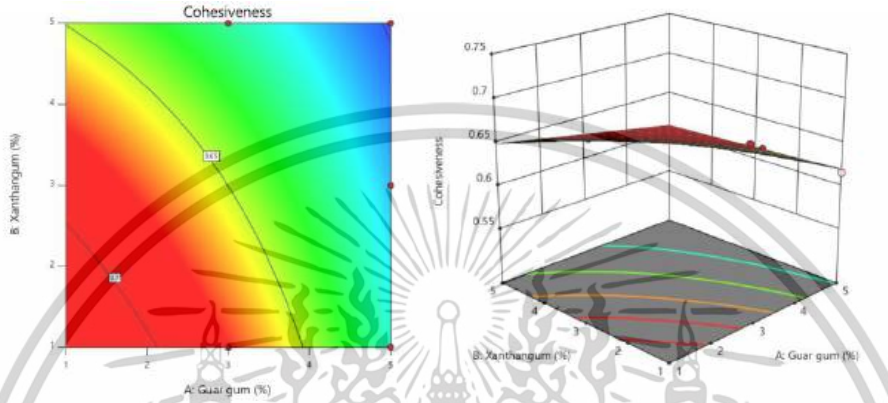
การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารของไข่เทียมทรงเครื่องระหว่างกัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน แสดงในตารางที่ ง.3 (ภาคผนวก ง.) และพื้นผิวตอบสนองในภาพที่ 4.8a-c พบว่าการใช้กัวร์กัม (A) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก (+0.0204) และการใช้คาราจีแนน (C) ที่มีค่าสัมประสิทธิเป็นบวก(+0.0099) แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการยึดกันภายในอาหารของไข่เทียมทรงเครื่อง และมีค่า P น้อยกว่า 0.0001 และ 0.0189 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การใช้แซนแทนกัม (B) ที่มีค่าสัมประสิทธิเป็นลบ (-0.0161, $P < 0.0001$) ให้ผลต่อค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และแสดงสมการดังต่อไปนี้

ปริมาณของความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร $= 0.6681 + 0.0204A - 0.0161B + 0.0099C - 0.0016AB - 0.0364AC + 0.016BC - 0.0154A^2 + 0.0047B^2 - 0.0379C^2$

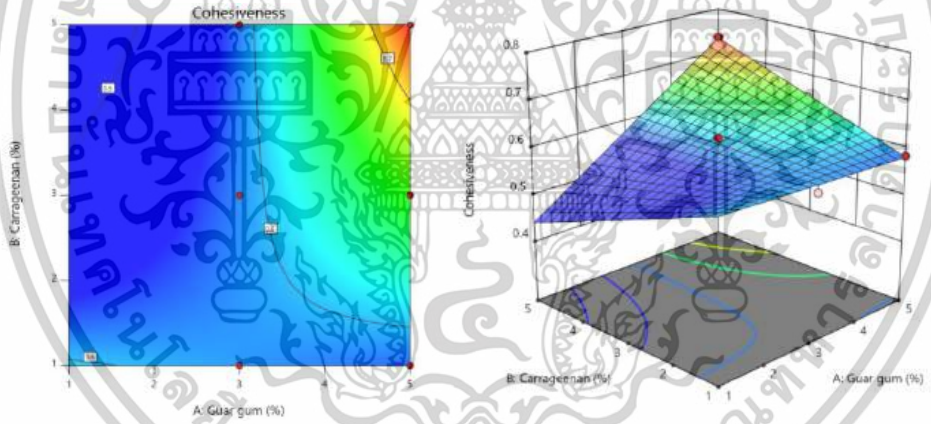
สำหรับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัวร์กัม และคาราจีแนน (AC) มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ (-0.0016) แสดงถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารของไข่เทียมทรงเครื่อง และมีค่า P น้อยกว่า 0.0001 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่างแซนแทนกัม และคาราจีแนน (BC) มีค่าสัมประสิทธิเป็นบวก ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามโดยลดค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (+0.0160, $P = 0.0005$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

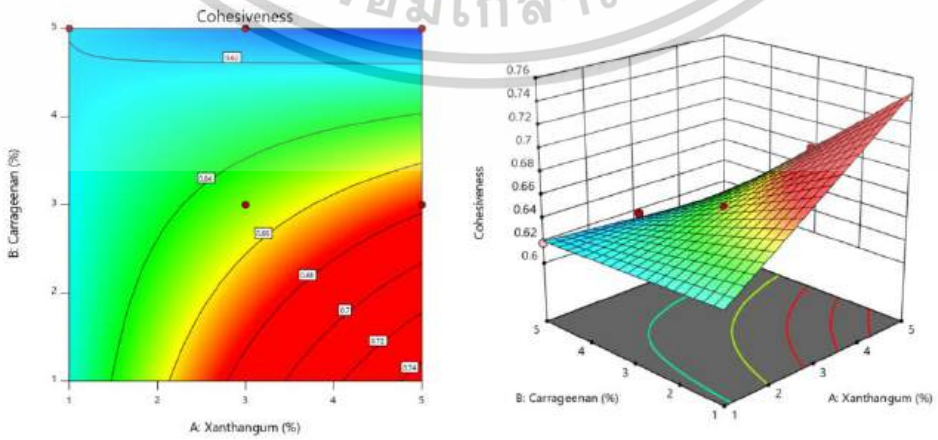
อีกทั้ง ผลยกกำลังสองของกัวร์กัม (A^2) มีค่า P เท่ากับ 0.0077 และคาราจีแนน (C^2) มีค่า P น้อยกกว่า 0.0001 ที่มีค่าสัมประสิทธิเป็นลบ (-0.0154 และ -0.0379 ตามลำดับ) แสดงถึงแนมโน้มการลดลงของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารของไข่เทียมทรงเครื่องที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเมื่อใช้ในระดับที่เหมาะสม อาจลดค่าความสามารถในการยึดเกาะของไข่เทียมทรงเครื่องได้



4.8a พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) ต่อค่าความสามารถในการยึดเกาะภายในอาหาร



4.8b พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และคาราจีแนน (AC) ต่อค่าความสามารถในการยึดเกาะภายในอาหาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8c พื้นผิวตอบสนองของแซนแทนกัม และคาราจีแนน (BC) ต่อค่าความสามารถในการยึดเกาะภายในอาหาร

ภาพที่ 4.8a-c แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าความสามารถในการยึดเกาะภายในอาหาร ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

จากภาพที่ 4.8 a-c แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าความสามารถในการยึดเกาะภายในอาหารต่ำ) ไปสู่สีแดง (ค่าความสามารถในการยึดเกาะภายในอาหารสูง) โดยในการใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม (AB) ในปริมาณชนิดละ 1-2% ให้ค่าความสามารถในการยึดเกาะสูงที่สุด เนื่องจากการทำงานร่วมกันในเชิงเสริมแรง (synergistic effect) ของกัวร์กัม ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบสายโซ่ตรง (linear galactomannan) กับแซนแทนกัม ซึ่งมีโครงสร้างแบบกิ่ง (branched polysaccharide) โดยกัวร์กัมมีคุณสมบัติในการดูดน้ำ และช่วยกระจายแรงต้านภายในเจล ในขณะที่แซนแทนกัมมีความสามารถในการสร้างความหนืดและโครงข่ายที่ยืดหยุ่นได้ดี การใช้ทั้งสองร่วมกันจึงช่วยให้โครงสร้างเจลมีความเหนียวแน่นไม่เปราะ หรือแตกง่าย ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความยึดเกาะสูง (Phillips & Williams, 2009; BeMiller, 2019)

การใช้กัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน (AC) ในปริมาณชนิดละ 5% ให้ค่าความสามารถในการยึดเกาะที่สุด เนื่องจากคาราจีแนน มีโครงสร้างที่สามารถเกิด helical junction zones เมื่ออยู่ในระบบที่มีไอออนบวก เช่น K^+ และ Ca^{2+} ทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่แน่น และแข็ง ในขณะที่กัวร์กัมมีบทบาทในการเพิ่มความชุ่มน้ำ และเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างโปรตีน และคาราจีแนน การทำงานร่วมกันของทั้งสองชนิดนี้จึงช่วยเสริมสร้างโครงสร้างเจลที่เหนียว และไม่แตกตัวง่าย (Imeson, 2010; Thakur et al., 1997)

ในกรณีของการใช้แซนแทนกัมร่วมกับคาราจีแนน (BC) ในปริมาณชนิดละ 5 และ 1% ตามลำดับ แม้แซนแทนกัมจะไม่สามารถสร้างเจลเดี่ยวที่แข็งแรงได้ แต่มีความสามารถในการกระจายแรงและคงโครงสร้าง เมื่อรวมกับคาราจีแนนในปริมาณ 1 % จึงสามารถสร้างเจลที่แข็งได้ดี เกิดการเสริมแรงร่วมกันผ่านพันธะไฮโดรเจน หรือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลในปริมาณที่เหมาะสม ส่งผลให้โครงสร้างมีความเหนียวและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (Saha & Bhattacharya, 2010)

และจากผลวิเคราะห์ของกการใช้ไฮโดรคอลลอยด์คู่กันต่อความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหารของไข่เทียมทรงเครื่อง แสดงให้เห็นว่า ในการใช้ไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดมีบทบาทเฉพาะในการควบคุมความเหนียวแน่นของโครงสร้างอาหาร โดยกัวร์กัม และคาราจีแนนส่งเสริมความสามารถใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยึดเกาะของเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของทั้งสองชนิดที่สามารถสร้างโครงสร้างเจลที่หนาแน่น และยืดหยุ่นได้ (Tharanathan & Mahadevamma, 2003) อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้ร่วมกับแซนแทนกัม พบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่น่าสนใจ โดยเฉพาะการจับคู่ระหว่างแซนแทนกัมกับคาราจีแนนซึ่งให้ผลลดค่าความยึดเกาะลงอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าทั้งสองจะสามารถเสริมความหนืด และความคงตัวในบางระบบได้ดี การลดลงที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการรบกวนโครงข่ายเจลหรือความไม่เข้ากันของโครงสร้างพอลิเมอร์ในสภาวะที่มีความร้อนหรือแรงเฉือนระหว่างการแปรรูป (Imeson, 2010)

4.2.4.4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

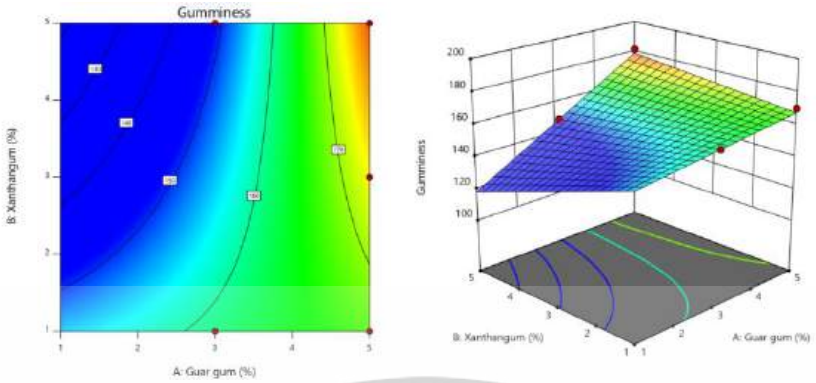
การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวของไข่เทียมทรงเครื่องระหว่างกัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน แสดงในตารางที่ ง.4 (ภาคผนวก ง.) และพื้นผิวตอบสนองในภาพที่ 4.9a-c พบว่า การใช้กัวร์กัม(A) ที่มีค่าสัมประสิทธ์เป็นบวก (+73.28) แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวของไข่เทียมทรงเครื่อง และมีค่า P น้อยกว่า 0.0001 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การใช้แซนแทนกัม (B) ให้ผลในทางตรงกันข้าม โดยลดลงต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (-52.11, $P < 0.0001$) และแสดงสมการดังต่อไปนี้

ปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว = $176.27 + 73.28A - 52.11B + 16.95C - 31.6AB + 5.48AC + 2.96BC + 6.47A^2 + 59.59B^2 - 7.13C^2$

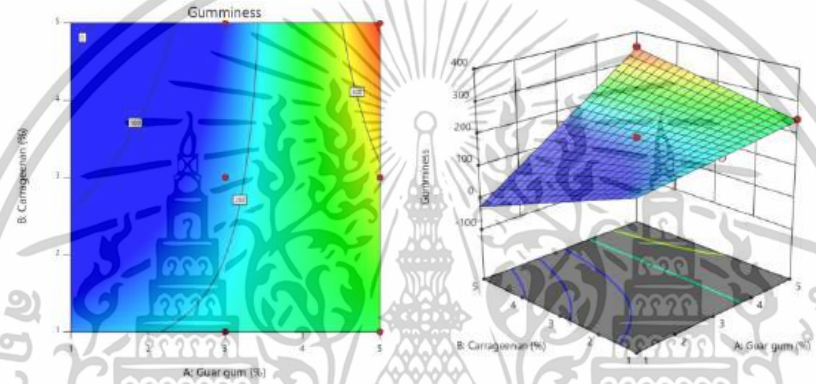
สำหรับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) มีค่าสัมประสิทธิเป็นลบ (-31.60) แสดงถึงแนวโน้มการลดลงของค่าพลังงานการเคี้ยวของไข่เทียมทรงเครื่อง และมีค่า P เท่ากับ 0.0009 ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ทั้งนี้ ผลยกกำลังสองของแซนแทนกัม (B^2) มีค่า P น้อยกว่า 0.0001 และค่าสัมประสิทธิเป็นบวก (+59.59) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแซนแทนกัมต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวของไข่เทียมทรงเครื่องได้ โดยเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม อาจมีผลในการเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวได้

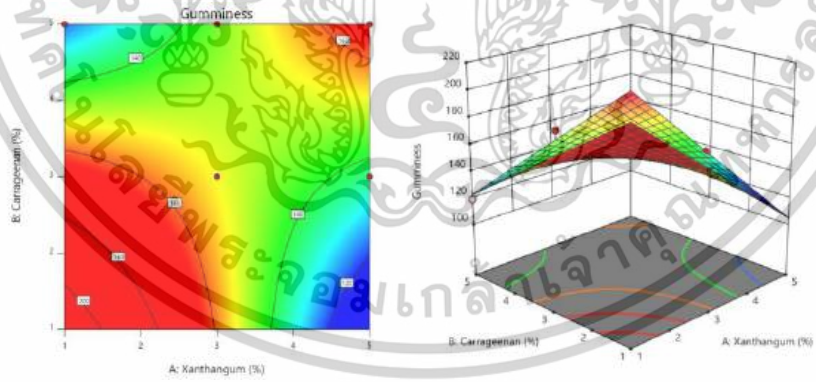
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.9a พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว



4.9b พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และคาราจีแนน (AC) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว



4.9c พื้นผิวตอบสนองของแซนแทนกัม และคาราจีแนน (BC) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

ภาพที่ 4.9a-c แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.9 a-c แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวต่ำ) ไปสู่สีแดง (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวสูง) การใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม (AB) ในปริมาณชนิดละ 5 % ให้ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวสูงที่สุด เนื่องจากกัวร์กัมเป็นกัมที่ให้ความหนืดสูง และช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างภายในของเจล ในขณะที่แซนแทนกัมมีความสามารถในการเพิ่มความหนืดอย่างรวดเร็ว และให้เนื้อสัมผัสที่มีความหนาแน่นเมื่อใช้ในปริมาณที่สูง การใช้ทั้งสองร่วมกันส่งผลให้เกิด โครงข่ายโพลีเมอร์แบบเสริมแรง (interpenetrating polymer network) ที่มีการกระจายแรงเคี้ยวได้ดี ทำให้ต้องใช้พลังงานในการเคี้ยวมากขึ้น (Phillips & Williams, 2009; BeMiller, 2019)

การใช้กัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน (AC) ในปริมาณชนิดละ 5 % ให้ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวสูงเช่นกัน เนื่องจาก คาราจีแนน มีคุณสมบัติในการสร้างโครงสร้างเจลแข็งได้ดี โดยเฉพาะในสภาวะที่มีไอออนบวก และเมื่อทำงานร่วมกับกัวร์กัมที่มีคุณสมบัติช่วยเสริมความหนืด และการยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างโปรตีนในระบบเจล ก็จะส่งผลให้เนื้อผลิตภัณฑ์มีลักษณะหนืบและแน่นมากขึ้น จึงเพิ่มค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการบดเคี้ยว (Imeson, 2010; Wang et al., 2020)

ในขณะที่การใช้แซนแทนกัมร่วมกับคาราจีแนน ในปริมาณชนิดละ 1-3 % ให้ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลวสูงที่สุด และมีจุดที่น่าสนใจตรงที่การใช้ร่วมกันในปริมาณชนิดละ 5% ให้ค่าพลังงานในการเคี้ยวสูงในโซนสีแดงรองลงมา ซึ่งอาจเกิดจากพฤติกรรมการเกิดเจลที่ ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear effect) เมื่อใช้แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกัน โดยแซนแทนกัมในระดับกลางจะช่วยควบคุมความหนืดของระบบไม่ให้สูงเกินไป ขณะที่คาราจีแนนช่วยสร้างเจลแบบเส้นตรงที่แข็งแรง ผลคือ ได้โครงสร้างที่สมดุลและตอบสนองต่อแรงเคี้ยวได้ดี โดยไม่แข็งหรือเปราะเกินไป (Saha & Bhattacharya, 2010; Thakur et al., 1997)

จากผลลัพธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า กัวร์กัมมีบทบาทอย่างชัดเจนในการเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยว แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงข่ายเจล โดยมีบทบาทคล้าย Thickening agent ที่สามารถจับน้ำ และสร้างโครงสร้างที่แน่นหนาได้ดี (Phillips & Williams, 2009) ในขณะที่แซนแทนกัม เมื่อใช้เดี่ยว ๆ กลับลดค่าพลังงานการเคี้ยว ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะเจลที่เนียนนุ่มมากเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดแรงต้านระหว่างการเคี้ยวมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่น่าสนใจคือ เมื่อกัวร์กัม และแซนแทนกัมถูกใช้ร่วมกันน้อยกว่า 5 % กลับพบผลลดลงของค่าพลังงานการเคี้ยวอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงผลต้านกัน (Antagonistic effect) ที่อาจเกิดจากการแย่งน้ำหรือโครงสร้างเจลที่ไม่ประสานกัน ส่งผลให้เนื้อสัมผัสหลวมลงในเชิงกล (Imeson, 2010) ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่ากำลังสองของแซนแทนกัมที่เป็นบวก แสดงว่าแม้สารนี้จะลดค่าการเคี้ยวในระดับที่มากเกินไป แต่หากใช้ในระดับที่พอเหมาะ อาจมีผลเสริมโครงสร้าง และเพิ่มแรงเคี้ยวได้ ซึ่งเป็นลักษณะความสัมพันธ์แบบโค้งที่ควรนำไปใช้ในการออกแบบสูตรให้เหมาะสมที่สุด

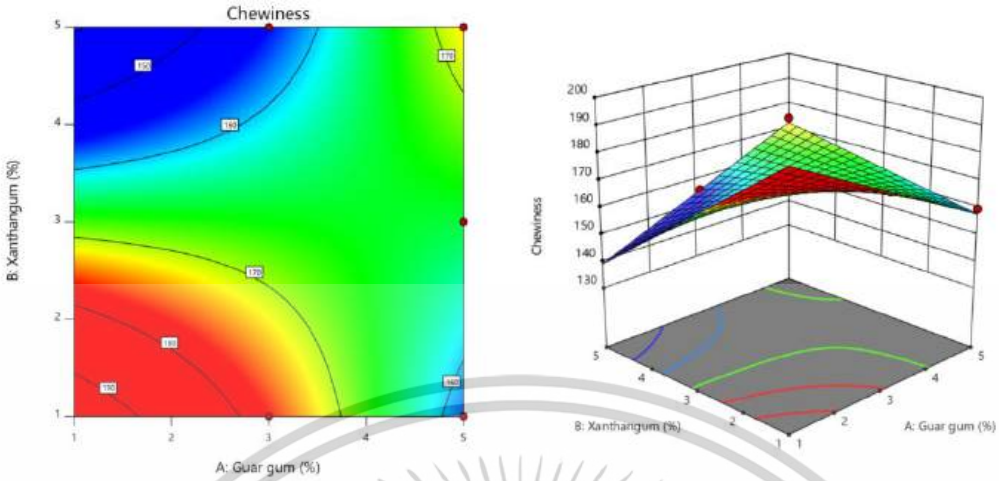
4.2.4.5 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องระหว่างกัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน แสดงในตารางที่ ง.5 (ภาคผนวก ง.) และพื้นผิวตอบสนองในภาพที่ 4.10a-c พบว่า การใช้กัวร์กัม(A) และคาราจีแนน (C) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก (+71.56 และ +22.35 ตามลำดับ แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานการเคี้ยวของแข็งของไข่เทียมทรงเครื่อง และมีค่า P น้อยกว่า 0.0001 และ P เท่ากับ 0.0075 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การใช้แซนแทนกัม (B) ให้ผลในทางตรงกันข้าม โดยลดค่าพลังงานการเคี้ยวของแข็งลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (-59.82, $P < 0.0001$) และแสดงสมการดังต่อไปนี้

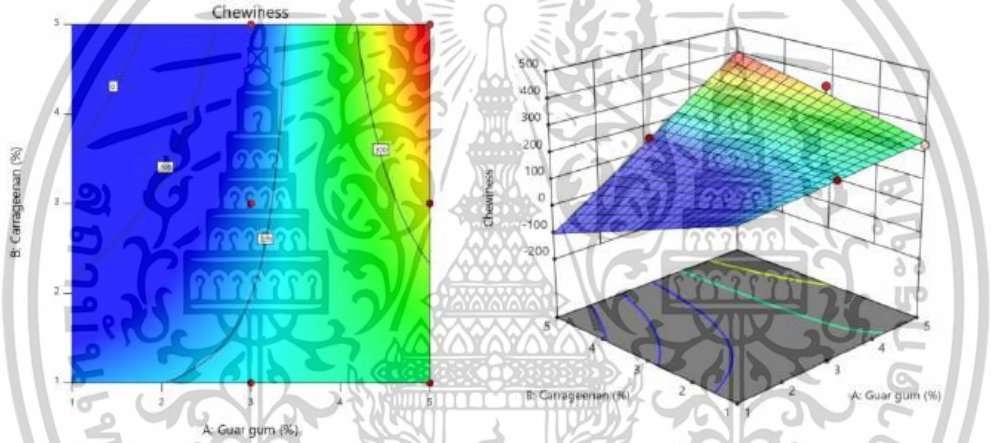
ปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง = $184.12 + 71.56A - 59.82B + 22.35C - 22.07AB - 4.44AC - 8.41BC - 15.56A^2 + 59.8B^2 - 6.06C^2$

สำหรับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) ให้ผลต่อค่าพลังงานการเคี้ยวของแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (-22.07, P = 0.0051) ทั้งนี้ ผลยกกำลังสองของของแซนแทนกัม (B^2) มีค่า P น้อยกว่า 0.0001 และมีค่าสัมประสิทธิเป็นบวก (+59.80) ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของการใช้แซนแทนกัมต่อค่าพลังงานการเคี้ยวของแข็ง โดยเมื่อใช้ในระดับที่เหมาะสม อาจเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยวของแข็งของไข่เทียมทรงเครื่องได้

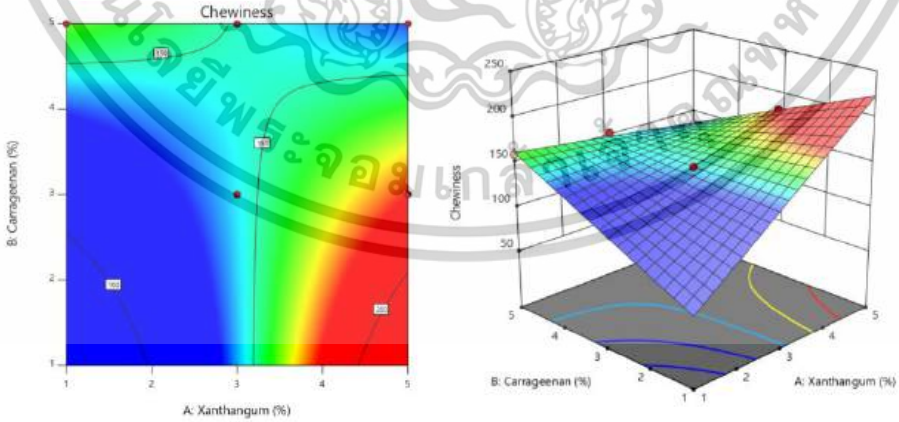
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.10a พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และแซนแทนกัม (AB) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง



4.10b พื้นผิวตอบสนองของกัวร์กัม และคาราจีแนน (AC) ต่อค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง



ภาพที่ 4.10 พื้นผิวตอบสนองของแซนแทนกัม และคาราจีแนน (BC) ต่อค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

ภาพที่ 4.10a-c แสดงปัจจัย AB, AC และ BC ที่มีผลต่อปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว ในรูปแบบ 2มิติ (ซ้าย) และรูปแบบ 3มิติ (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.10 a-c แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ของกราฟมีการไล่ระดับจากสีน้ำเงิน (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งสูง) ไปสู่สีแดง (ค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารสูง) ในการใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม (AB) ในปริมาณชนิดละ 1-2% แสดงค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งมากสุด เนื่องจาก กัวร์กัม มีลักษณะเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบสายตรงที่ให้ความหนืดสูง และสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้ดี เมื่อจับคู่กับแซนแทนกัม ซึ่งมีโครงสร้างแบบกิ่ง (branched) และคุณสมบัติในการเพิ่มความหนืดอย่างรวดเร็ว จะเกิดโครงสร้างแบบ interpenetrating polymer network (IPN) ที่เหนียว และต้านทานแรงกดได้ดี ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการบดเคี้ยวอาหาร (Phillips & Williams, 2009; BeMiller, 2019)

การใช้กัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน (AC) ในปริมาณชนิดละ 5% แสดงค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งมากที่สุด เนื่องจาก คาราจีแนน สามารถสร้างโครงสร้างเจลแบบ rigid ได้ในสภาวะที่มีไอออนบวก เช่น K^+ และ Ca^{2+} ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับกัวร์กัมซึ่งเสริมแรงหนืดได้ดี จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างที่เหนียวแน่นมากขึ้น ส่งผลต่อค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการเคี้ยวอาหารประเภทแข็งอย่างชัดเจน (Imeson, 2010; Wang et al., 2020)

และการใช้แซนแทนกัม ร่วมกับคาราจีแนน (BC) ในปริมาณชนิดละ 5 และ 1% ตามลำดับ แสดงค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็งมากที่สุด โดยเป็นไปได้ว่าแม้คาราจีแนนในระดับต่ำจะไม่สามารถสร้างเจลแข็งเดี่ยวได้ดีนัก แต่เมื่อทำงานร่วมกับแซนแทนกัมจะเกิด synergistic interaction ที่ช่วยเสริมแรงภายในโครงข่ายพอลิเมอร์ผ่านการเกิดพันธะไฮโดรเจน และแรงยึดเหนี่ยวเชิงกลภายใน ทำให้ไข่เทียมทรงเครื่อง มีโครงสร้างแน่น และต้องใช้พลังงานในการเคี้ยวมากขึ้น (Saha & Bhattacharya, 2010; Thakur et al., 1997)

จากผลลัพธ์ดังกล่าว กัวร์กัม และคาราจีแนนมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มค่าพลังงานการเคี้ยวของแข็งของไข่เทียมทรงเครื่อง สอดคล้องกับธรรมชาติของทั้งสองสารที่สามารถสร้างโครงสร้างเจลที่แข็ง และคงตัว โดยเฉพาะกัวร์กัมที่มีคุณสมบัติในการจับน้ำ และเพิ่มความหนืด ส่งผลให้เกิดการสร้างแรงต้านระหว่างการเคี้ยวสูงขึ้น (Tharanathan & Mahadevamma, 2003) คาราจีแนน ที่มีแรงเจลต่ำกว่าทั้งสอง แต่มีบทบาทในการเสริมแรงยึดเหนี่ยวในระบบที่มีไอออน จึงช่วยเพิ่มความหนาแน่นของเจลได้เช่นกัน (Imeson, 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการตรวจสอบค่าสีของการปรับปรุงคุณภาพไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์

สำหรับการตรวจสอบค่าสีของไข่ทรงเครื่อง และไข่เทียมทรงเครื่อง เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญสำหรับผู้บริโภคในความประทับใจแรกเริ่ม (First impassion) (Pathare et al., 2013) แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าไข่เทียมทรงเครื่องที่ออกแบบการทดลองด้วย Full factorial design (FFD) มีจำนวน 45 สูตรจาก 68 สูตรที่สามารถขึ้นรูป และถูกนำมาตรวจสอบค่าสีในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความสว่าง (L) ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ค่าความเข้มสี (c) และค่าเฉดสี (h)

จากการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องที่ผสมไฮโดรคอลลอยด์แบบสองชนิดและสามชนิดร่วมกัน ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.6–4.10 พบว่าสูตรที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุด ได้แก่ สูตรที่ 15, 21, 22, 25, 27, 37, 39, 40, 49, 53 และ 57 รวมทั้งสิ้น 11 สูตร โดยสามารถจำแนกตามชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม (AB) ได้แก่ สูตรที่ 15 กลุ่มที่ใช้กัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน (AC) ได้แก่ สูตรที่ 21, 22, 25 และ 27 และกลุ่มที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสามชนิดร่วมกัน (ABC) ได้แก่ สูตรที่ 37, 39, 40, 49, 53 และ 57 เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าสีเพิ่มเติมตามที่แสดงในตารางที่ 4.11 เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สีทั้ง 5 ค่า ได้แก่ ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ค่าความเข้มสี (c) และค่าเฉดสี (h) เพื่อตรวจสอบระดับความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบของไข่ทรงเครื่องในแต่ละพารามิเตอร์ของค่าสี

ทั้งนี้ การเลือกเน้นการศึกษาสูตรที่ผสมไฮโดรคอลลอยด์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป แทนการใช้เพียงชนิดเดียวนั้น เนื่องจากจากการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสในตารางที่ 4.6-4.10 พบว่า สูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียว แม้สามารถขึ้นรูปได้ แต่ยังไม่สามารถเสริมลักษณะเนื้อสัมผัสให้มีความใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องได้อย่างเพียงพอ โดยเฉพาะในด้านค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น และความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร จึงมีแนวโน้มว่าสูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แบบผสมจะเกิดผลเสริมฤทธิ์ร่วม (synergistic effects) ที่สามารถพัฒนาโครงสร้างเจลให้มีเสถียรภาพและลักษณะทางกลที่เหมาะสมมากกว่าภายหลังการรีทอร์ท (Campo et al., 2009; Imeson, 2010; Mudgil & Barak, 2013) จึงได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และคัดเลือกเฉพาะสูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์แบบผสม เพื่อประเมินค่าความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบอย่างไข่ทรงเครื่อง ในด้านพารามิเตอร์ของสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจสอบสีของไข่เทียมทรงเครื่องที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสคล้ายกับไข่ทรงเครื่อง

สูตร	L	a*	b*	c	h
C	69.89±1.45^{a}	-0.38±0.46^{f}	25.27±0.88^{a}	25.28±0.87^{a}	92.48±0.93^{a}
15	59.05±1.67^{de}	1.78±0.13^{a}	22.02±0.43^{c}	22.19±0.55^{c}	85.37±0.24 ^{e}
21	60.261.20^{bcd}	1.00±0.30 ^{d}	21.76±0.19^{c}	21.53±0.72^{c}	87.37±0.76 ^{bc}
22	61.93±0.39^{b}	1.07±0.20 ^{cd}	22.01±0.62^{c}	21.78±0.20^{c}	87.21±0.54 ^{bcd}
25	59.88±0.36^{bcde}	1.14±0.05^{bcd}	21.61±0.06^{c}	21.71±0.36^{c}	86.98±0.15^{bcd}
27	60.99±0.76^{bcd}	0.96±0.23^{d}	21.32±0.74^{c}	21.64±0.06^{c}	87.73±0.85^{b}
37	60.65±0.45^{bcd}	1.24±0.14^{bcd}	25.12±0.80^{a}	25.12±1.21^{a}	87.18±0.26 ^{bcd}
39	57.82±1.83^{e}	1.24±0.28^{bcd}	23.46±0.19^{b}	23.50±0.19^{b}	86.93±0.65 ^{bcd}
40	62.23±1.72^{b}	1.28±0.43^{bcd}	24.92±0.65^{a}	23.50±0.19^{a}	87.08±0.93 ^{bcd}
49	62.16±0.44^{cde}	1.08±0.07^{cd}	23.790.44^{b}	23.43±0.56^{b}	87.41±0.14 ^{b}
53	60.80±1.00^{bcd}	1.63±0.31^{ab}	23.86±0.39^{b}	23.47±0.19^{b}	86.08±0.82 ^{de}
57	61.62±0.71^{bc}	1.55±0.13^{abc}	23.09±0.33^{b}	23.10±0.50^{b}	86.16±0.27 ^{cde}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.11 พบว่า ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าเฉดสี (h) ของไข่เทียมทรงเครื่องทั้ง 13 สูตร มีความแตกต่างจากไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สะท้อนถึงลักษณะภายนอกที่ยังไม่สามารถจำลองลักษณะค่าสีให้เสมือนไข่ทรงเครื่องได้ในพารามิเตอร์ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม มีเพียงค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และค่าความเข้มสี (c) ของไข่เทียมทรงเครื่องในสูตรที่ 37 และ 40 ที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากไข่ทรงเครื่อง ($p > 0.05$) โดยมีค่าทั้งสองพารามิเตอร์อยู่ในช่วง 24–25 ซึ่งใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่อง

สูตรไข่เทียมทรงเครื่องที่ให้ค่าสีใกล้เคียงมากที่สุด คือ สูตรที่ 37 และ 40 ซึ่งล้วนเป็นสูตรที่ผสมไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ร่วมกัน โดยแตกต่างกันเพียงในอัตราส่วนของแต่ละชนิดที่ใช้ในสูตรตามการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design (FFD) ได้แก่ สัดส่วนกัวร์กัม/แซนแทนกัม/คาราจีแนน เท่ากับ 1/3/3 และ 3/5/1 ตามลำดับ

ผลลัพธ์ดังกล่าว สะท้อนถึงบทบาทเสริมฤทธิ์ร่วม (synergistic effects) ของไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสามชนิด ในการช่วยพัฒนาโครงสร้างเจลให้มีความสามารถในการกระจายสี และยึดสีได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะค่าความเป็นสีเหลือง และค่าความเข้มสี ที่เป็นคุณลักษณะที่สำคัญต่อภาพลักษณ์ของไข่ทรงเครื่อง นอกจากนี้ การมีสัดส่วนแซนแทนกัม และคาราจีแนนในระดับที่เหมาะสม ส่งผลต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับคาร์โบไฮเดรตในผลิตภัณฑ์ ช่วยให้เกิดการกระเจิงแสงอย่างสม่ำเสมอ และลดการเกิดจุดสีผิดเพี้ยน (color

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

inconsistency) ได้ดีกว่าสูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพียงชนิดเดียว หรือผสมเพียงสองชนิด (Campo et al., 2009; Mudgil & Barak, 2013; Imeson, 2010)

ทั้งนี้ ผลการตรวจสอบค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่องสะท้อนถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบในหัวข้อที่ 4.2.1-4.2.4 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างภายในของไข่เทียมทรงเครื่องสามารถมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการมองเห็นสีภายนอกของผลิตภัณฑ์ ค่าสีจึงถือเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญที่สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของเนื้อสัมผัสและโครงสร้างของไข่เทียมทรงเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ผลการทำนายไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์ผ่านฟังก์ชัน Response Optimizer

จากการตรวจสอบคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสในหัวข้อที่ 4.2.1 – 4.2.4 ได้นำมาทำนายสูตรของไข่เทียมทรงเครื่องร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์ โดยการใช้โปรแกรมเชิงสถิติถือเป็นเครื่องมือสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะกรณีที่มีปัจจัยจำนวนมาก อย่างการใช้ไฮโดรคอลลอยด์หลายชนิดร่วมกัน ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของไข่เทียมทรงเครื่องอย่างซับซ้อนผ่านฟังก์ชัน Response Optimizer เพื่อให้ไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ มีค่าใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุด โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านความแข็ง และการคืนตัว ที่มีบทบาทสำคัญต่อผู้บริโภคอย่างชัดเจน (Szczesniak, 2002) ซึ่งผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสหัวข้อ 4.2.2 พบว่า สูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงไข่ทรงเครื่องมากกว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพียงตัวเดียว เนื่องจากการทำงานร่วมกันของไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดสามารถเสริมสร้างโครงสร้างเจล ความยืดหยุ่น และความคงตัวของโครงสร้างได้ดีกว่าการใช้เดี่ยว ๆ (Funami, 2011)

จากผลการทดลองดังกล่าว จึงมีการนำเสนอข้อมูลจากสูตรที่สามารถขึ้นรูปได้จริงในกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์มากกว่าสองชนิดขึ้นไป นำไปวิเคราะห์ผ่านฟังก์ชั่น Response Optimizer เพื่อคัดเลือกสูตรที่คาดหวังว่าจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสเหมาะสมที่สุด ซึ่งจะถูกใช้ในการตรวจสอบในทางกายภาพในหัวข้อ 4.2.3.1 โดยสัดส่วนของไฮโดรคอลลอยด์ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 ดังนี้

ตารางที่ 4.12 สัดส่วนของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์สูตรคัดเลือกจากฟังก์ชัน Response Optomizer

สูตรจากโปรแกรม	**กัวร์กัม (%)**	**แซนแทนกัม (%)**	**คาราจีแนน (%)**
กัวร์กัม ร่วมกับแซนแทนกัม (AB)	5	1	-
แซนแทนกัม ร่วมกับคาราจีแนน (BC)	-	3.96	3.96
กัวร์กัม ร่วมกับคาราจีแนน (AC)	4.47	-	1
กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนนร่วมกัน (ABC)	3.56	4.33	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องไฮโดรคอลลอยด์

จากการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัส ที่เป็นลักษณะทางกายภาพที่สำคัญอย่างมากของอาหารได้มีการวิเคราะห์ตัวแปรทางกล ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Cohesiveness**)** การคืนตัวของอาหาร (Springiness) พลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) และพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง (Chewiness) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า ค่าความแข็ง ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว และแข็ง มีความแตกต่างกับไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าการคืนตัว และค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร ไม่มีความแตกต่างกับไข่เทียมทรงเครื่องเลย ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษาคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องด้วยไฮโดรคอลลอยด์สูตรคัดเลือก

สูตร	Hardness (g)	Springiness^{ns}	Cohesiveness^{ns}	Gumminess	Chewiness
ไข่ทรงเครื่อง	244.55±1.06^{cd}	0.99±0.00	0.56±0.00	139.90±1.00^{e}	141.85±1.53^{e}
กัวร์กัม+แซนแทนกัม	243.06±1.07^{d}	0.99±0.00	0.62±0.00	149.95±1.00^{d}	153.01±0.02^{d}
แซนแทนกัม+ คาราจีแนน	267.57±0.70^{b}	0.99±0.00	0.64±0.00	167.53±1.00^{b}	157.94±0.07^{c}
กัวร์กัม+ คาราจีแนน	413.07±1.00^{a}	0.98±0.00	0.59±0.00	135.63±1.00^{a}	239.83±0.20^{a}
กัวร์กัม+ แซนแทนกัม + คาราจีแนน	244.55±1.00^{c}	0.990±0.00	0.62±0.00	155.75±1.00^{c}	164.45±0.50^{b}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่ทรงเครื่อง และไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ ที่แสดงในตาราง 4.10 พบว่า การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ต่างชนิดร่วมกันให้ผลลัพธ์ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสที่หลากหลาย และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่อง

ในกลุ่มของสูตรที่ใช้กัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม พบว่า มีค่าความแข็ง เท่ากับ 243.06±1.07 g และค่าการคืนตัว เท่ากับ 0.99±0.00 ซึ่งใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่อง ($p > 0.05$) แสดงถึง ลักษณะทางโครงสร้างที่คงตัว และยืดหยุ่นอย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเสริมซึ่งกันและกันของกัวร์กัมกับแซนแทนกัม ช่วยเพิ่มความหนืดในระบบที่ช่วยเสริมให้โครงสร้างของไข่เทียมทรงเครื่องแข็งแรงขึ้น โดยกลไกนี้ทำให้เกิดการกักเก็บน้ำ และโครงสร้างเจลที่สามารถทนแรงเฉือนได้ดี (BeMiller, 2019; Funami, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่สูตรใช้แซนแทนกัมร่วมกับคาราจีแนน มีค่าความแข็ง และค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็งเพิ่มสูงขึ้น เท่ากับ 267.57±0.70 g และ 157.94±0.07 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่า พอลิเมอร์ของไฮโดรคอลลอยด์สองชนิดนี้ มีความสามารถในการสร้างโครงสร้างเจลที่มีความแข็ง และยืดหยุ่นสูง โดยเฉพาะคาราจีแนน ที่สามารถกิดพันธะไอออนิกกับไอออนโพแทสเซียมในระบบ โดยที่มีแซนแทนกัมคอยช่วยคงสภาพของโครงสร้างไว้ (Imeson, 2009; Abdolshahi et al., 2022)

สำหรับสูตรที่ใช้กัวร์กัมร่วมกับคาราจีแนน ให้ค่าความแข็งสูงที่สุด และค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็งสูงที่สุดจากสูตรทั้งหมด เท่ากับ 413.07±1.00 g และ 239.83±0.20 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสูตรอื่น ๆ แสดงให้เห็นถึงความแข็งที่มากเกินไปของไข่เทียมทรงเครื่อง ซึ่งเกิดจากโครงสร้างเจลที่แน่นเกินไปจากการเสริมซึ่งกันและกันของกัวร์กัม และคาราจีแนนในการเพิ่มความหนืดของระบบ โดยเฉพาะคาราจีแนน ที่จะเกิดพันธะข้ามโมเลกุล (cross-linking) เมื่อเจอกับความร้อนระหว่างการแปรรูป (Li et al., 2021)

และสำหรับสูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกันทั้งหมดสามชนิด ได้แก่ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน พบว่า มีค่าความแข็ง และค่าการคืนตัวใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่อง แต่กลับกันค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว และแข็งยังสูงกว่าไข่ทรงเครื่องอย่างมาก ซึ่งอาจเกิดจากผลของการผสมกันของโครงสร้างที่แข็งแรงจากการทำงานร่วมกันทั้ง 3 พอลิเมอร์ ส่งผลให้โครงสร้างเจลมีความหนาแน่นมากเกินไปสำหรับไข่ทรงเครื่อง (Pereira et al., 2020)

ดังนั้น หากพิจารณาจากความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบอย่างไข่ทรงเครื่องในด้านลักษณะเนื้อสัมผัสโดยรวม ซึ่งถือเป็นปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อการรับรู้ทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ทั้งในแง่ของความแข็ง ความยืดหยุ่น ความสามารถในการยึดเกาะกันภายใน และพลังงานในการเคี้ยว พบว่า ไข่เทียมทรงเครื่องที่ผสมกัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม ให้ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุด แม้ว่าผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2.5 พบว่า สูตรที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกันทั้ง 3 ชนิดให้ค่าสี (b* และ c) ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากกว่า

แต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนาผลิตภัณฑ์ทดแทนในรูปแบบไข่เทียมทรงเครื่องนั้น คุณสมบัติทางกล และโครงสร้างเจล ที่สัมพันธ์กับเนื้อสัมผัส ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อความรู้สึกปาก (mouthfeel) และการยอมรับโดยรวมมากกว่าปัจจัยด้านสี ซึ่งสามารถปรับแก้ได้เพิ่มเติมในกระบวนการผลิตภายหลัง เช่น การใช้สีธรรมชาติ หรือวิธีการให้ความร้อนที่เหมาะสม ทั้งนี้ การใช้กัวร์กัมและแซนแทนกัมร่วมกัน ยังช่วยให้เกิดโครงสร้างเจลที่มีความมั่นคง ไม่เสียรูปเมื่อผ่านกระบวนการความร้อน และสามารถเลียนแบบลักษณะเฉพาะของไข่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงเครื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการใช้ไฮโดรคอลลอยด์หลายชนิดร่วมกันซึ่งอาจส่งผลต่อต้นทุนหรือความซับซ้อนในการผลิต จากเหตุผลดังกล่าว จึงพิจารณาเลือกสูตรที่ผสมไฮโดรคอลลอยด์แบบสองชนิดที่ผสมกัวร์กัมร่วมกับแซนแทนกัม เป็นสูตรในการนำไปศึกษาร่วมกับกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ทในหัวข้อถัดไป

4.3 ผลการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์หลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

จากการคัดเลือกไข่เทียมทรงเครื่องสูตรที่มีกัวร์กัม ผสมกับแซนแทนกัมในปริมาณ 5 และ 1% จากปริมาณโดยรวมของไข่เทียมทรงเครื่องในหัวข้อที่ 4.2.3 ได้ถูกนำมาศึกษาผ่านกระบวนฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท เพื่อเปรียบเทียบระหว่าง ไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อนฆ่าเชื้อ และไข่เทียมทรงเครื่องหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท โดยการตรวจสอบคุณภาพต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัส ค่าสี การประเมินทางประสาทสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการ

สำหรับการนำไข่เทียมทรงเครื่องผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท มีเป้าหมายสำคัญในการช่วยให้ผลิตภัณฑ์สามารถคงสภาพในการเก็บรักษาเนื้อสัมผัสได้นานขึ้น และช่วยคงสีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น โดยเฉพาะไข่เทียมทรงเครื่องที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณความชื้นสูง การรีทอร์ทจึงเป็นแนวทางหนึ่ง ที่สามารถคาดหวังได้ว่า จะสามารถรักษาสมดุลระหว่างความแข็ง-หยืดหยุ่น-ความคงตัวของโครงสร้าง ได้มากยิ่งขึ้น (Silva & Almedia, 2015; Han et al., 2022)

4.3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางเนื้อสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ ก่อนและหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

จากการเปรียบเทียบระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อนฆ่าเชื้อ และไข่เทียมทรงเครื่องหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท แสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า หลังกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท ส่งผลต่อลักษณะของไข่เทียมทรงเครื่องในทุก ๆ ด้าน ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการคืนตัวของอาหาร (Springiness) ค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Cohesiveness) ค่าพลังงานการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว (Gumminess) และพลังงานการเคี้ยวอาหารแข็ง (Chewiness อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบลักษณะทางเนื้อสัมผัสระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

สูตร	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
ไข่ทรงเครื่อง	244.55±1.06^{b}	0.99±0.00^{a}	0.56±0.00^{c}	139.90±1.00^{b}	141.85±1.53^{c}
ก่อนฆ่าเชื้อ	243.06±1.06^{b}	0.99±0.00^{a}	0.62±0.00^{b}	149.95±1.00^{b}	153.01±0.02^{b}
หลังฆ่าเชื้อ	532.72±6.97^{a}	0.94±0.02^{b}	0.75±0.02^{a}	392.72±16.51^{a}	401.54±9.26^{a}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท มีผลอย่างมากต่อไข่เทียมทรงเครื่องในทุกพารามิเตอร์ทางกลของลักษณะเนื้อสัมผัส ($p \leq 0.05$) ยกเว้นค่าการคืนตัวที่มีค่าลดหลังภายหลังรีทอร์ท ซึ่งเกิดจากความร้อนในกระบวนการรีทอร์ท ที่กระตุ้นให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของแซนแทนกัมกับโปรตีนในระบบ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างเจลที่แข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม (Nipornram et al., 2023)

ในขณะเดียวกันกัวร์กัมที่ไม่สามารถสร้างเจลเองได้ ถูกความร้อนจากกระบวนการรีทอร์ทกระตุ้นให้เพิ่มความความหนืดในระบบ ที่ช่วยให้โครงสร้างของแซนแทนกัมมีความยืดหยุ่น และความสามารถในการยึดเกาะของเนื้อสัมผัสโดยรวมของไข่เทียมทรงเครื่องเพิ่มขึ้น (Murayama et al., 1995) อย่างไรก็ตาม ความหนืดเพิ่มขึ้นของกัวร์กัม แสดงถึงความสามารถในการคืนตัวที่ลดลง เพราะโครงสร้างของกัวร์กัมโดยรวมมีความแน่นขึ้น (Wang et al., 2023) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการคืนที่ลดลงหลังผ่านความร้อนจากกระบวนการรีทอร์ท

4.3.2 ผลการตรวจสอบค่าสีของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ ก่อนและหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

จากการเปรียบเทียบของค่าสีระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อนฆ่าเชื้อ และไข่เทียมทรงเครื่องหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท แสดงในตารางที่ 4.15 พบว่า ไข่เทียมทรงเครื่องภายหลังกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท มีค่าความสว่าง (L*) ลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบค่าสีระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

สูตร	L*	a*	b*	c	h
ไข่ทรงเครื่อง	69.89±1.45^{a}	-0.58±0.39^{c}	25.27±0.89^{a}	25.28±0.88^{a}	91.34±0.94^{a}
ก่อนฆ่าเชื้อ	59.05±1.61^{b}	1.45±0.57^{b}	21.45±1.09^{b}	21.51±1.11^{ab}	86.14±1.39^{b}
หลังฆ่าเชื้อ	55.49±0.72^{c}	2.06±0.78^{a}	20.18±0.75^{b}	16.85±6.49^{b}	87.20±0.27^{b}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการศึกษาคุณภาพของการฆ่าเชื้อไข่เทียมทรงเครื่องด้วยกระบวนการรีทอร์ท ต่อคุณลักษณะค่าสีของไข่เทียมทรงเครื่อง ดังในตารางที่ 4.12 พบว่า กระบวนการรีทอร์ท ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลืองของไข่เทียมทรงเครื่อง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความสว่างมีแนวโน้มที่ลดลงหลังกระบวนการรีทอร์ทได้ เนื่องจากการให้ความร้อนที่สูงมักส่งผลต่อค่าความสว่างของอาหารที่ลดลได้ (Liu et al, 2021)

นอกจากนี้ค่าความเป็นสีแดง และสีเหลือง ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังการรีทอร์ท เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ที่เกิดจากความร้อน อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเหล่านี้ อาจช่วยเพิ่มความน่ารับประทาน และการยอมรับของผู้บริโภคต่อไข่เทียมทรงเครื่องได้ (Benjakul et al., 2018)

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของค่าสีที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการรีทอร์ท มีความแตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เช่น การใช้ไฮโดรคอลลอยด์อย่างกัวร์กัม ร่วมกับแซนแทนกัม เมื่อเข้ารีทอร์ทสามารถส่งผลต่อโครงสร้าง และการกระจายตัวของสีไข่เทียมทรงเครื่อง อีกทั้ง การใช้ไฮโดรคอลลอยด์เหล่านี้ มีผลคอยช่วยรักษาสีของผลิตภัณฑ์อาหารได้ในระดับหนึ่ง (Shah et al., 2017)

4.3.3 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ ก่อนและหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

การประเมินทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้ของมนุษย์ โดยมักพิจารณาทั้งด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Stone & Sidel, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินนี้สามารถแสดงถึงความแตกต่างที่มนุษย์รับรู้ได้อย่างชัดเจน แม้ความแตกต่างนั้นจะไม่สามารถวัดได้จากเครื่องมือกายภาพโดยตรง (Lawless & Heymann, 2010) โดยผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท แสดงในตารางที่ 4.16 พบว่า กลุ่มผู้ประเมินกึ่งฝึกฝนให้คะแนนความชอบต่อไข่ทรงเครื่องมากกว่าไข่เทียมทรงเครื่องทั้งสองสภาวะ โดยให้คะแนนเฉลี่ยในทุกด้าน ≥ 7 จาก 9 คะแนน ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.16 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ

ตัวอย่าง	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่นรส	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
ไข่ทรงเครื่อง	7.87±0.86^{a}	7.07±1.68^{a}	6.70±1.62^{a}	7.58±1.56^{a}	7.34±1.59^{a}	7.87±1.57^{a}
ก่อนฆ่าเชื้อ	5.40±1.30^{b}	6.33±2.04^{a}	3.10±1.65^{b}	2.34±1.30^{b}	2.03±0.74^{b}	3.73±1.56^{b}
หลังฆ่าเชื้อ	2.35±2.33^{c}	5.97±3.54^{b}	2.18±1.22^{b}	2.54±0.63^{b}	1.28±5.33^{c}	2.11±3.87^{b}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในทุก ๆ พารามิเตอร์ความชอบ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยไข่ทรงเครื่องได้คะแนนเฉลี่ยสูงที่สุดในทุกด้าน (≥7 คะแนน) แสดงให้เห็นถึงความคุ้นเคย และการยอมรับของผู้ประเมินที่มีต่อองค์ประกอบสี กลิ่น และรสชาติอันเป็นเอกลักษณ์ของไข่ทรงเครื่อง (Stone & Sidel, 2004)

ในขณะที่ไข่เทียมทรงเครื่องก่อนฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท ที่ได้รับคะแนนความชอบต่ำกว่าไข่ทรงเครื่องในทุกด้าน แต่ยังถูกยอมรับในบางพารามิเตอร์ อย่างเช่น ลักษณะปรากฏ และสี (5.40±1.30 และ 6.33±2.04 คะแนน ตามลำดับ) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความชอบปานกลางตามเกณฑ์การประเมินแบบ 9-Point Hedonic Scale อย่างไรก็ตามเมื่อไข่เทียมทรงเครื่องถูกฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท ที่มีการใช้อุณหภูมิสูงถึง 121 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีกับวัตถุดิบภายในไข่เทียมทรงเครื่อง ส่งผลต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสโดยรวมลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านเนื้อสัมผัส และกลิ่นรส (1.28±0.53 และ 2.18±1.22 คะแนน ตามลำดับ) ซึ่งลดลงจากก่อนการฆ่าเชื้อลงถึงครึ่งนึง และอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ชอบมาก-มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากความร้อนที่สูง ส่งผลต่อโครงสร้างของพอลิเมอร์อาหาร อย่างเช่น โปรตีนจากถั่วลูกไก่ และโครงสร้างแป้งที่มีการเปลี่ยนสภาพ (Gelatinization และ Retrogradation) ส่งผลต่อความแข็งหรือความแน่น (Hardness) ที่เพิ่มขึ้น และค่าความยืดหยุ่น (Spinginess) ที่ลดลงสอดคล้องกับผลลัพธ์ในการตรวจสอบเนื้อสัมผัสในตารางที่ 4.35 รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด และการสลายของสารให้กลิ่นของวัตถุดิบทำให้กลิ่นรสเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (Van Boekel, 2006; Ramaswamy & Marcotte, 2006)

นอกจากนี้ด้วยลักษณะทางเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปของไข่เทียมทรงเครื่อง มีความแข็ง และเหนียวมากขึ้นก่อนการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท ซึ่งส่งผลต่อประสบการณ์โดยตรงต่อการเคี้ยว (Oral texture) ของผู้ประเมิน (Wang et al., 2023; Meullenet et al., 1998) เนื่องจากลักษณะดังกล่าว ทำให้เคี้ยวยาก ไม่นุ่มลิ้น และมีความรู้สึกเหนียวค้างในปาก เมื่อเปรียบเทียบกับไข่ทรงเครื่อง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลให้คะแนนด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของไข่เทียมทรงเครื่องหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ทลดลง (Kohyama, 2020)

อีกทั้งประเมินทางประสาทสัมผัสในพารามิเตอร์ของสี พบว่า คะแนนความชอบในด้านสีของไข่เทียมทรงเครื่องลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) หลังผ่านกระบวนการรีทอร์ท เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฆ่าเชื้อ โดยผู้ประเมินให้ความเห็นว่า สีของผลิตภัณฑ์มีความผิดแปลกไปจากไข่ทรงเครื่อง ส่งผลให้เกิดความรู้สึกเชิงลบต่อผลิตภัณฑ์ (Pathare et al., 2013) สอดคล้องกับผลการตรวจสอบคุณภาพสีในหัวข้อที่ 4.3.2 (ตารางที่ 4.36) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าสีในทุกพารามิเตอร์ระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ทอย่างชัดเจน ($p \leq 0.05$)

จากผลการประเมินทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 4.13) แสดงให้เห็นว่า การฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท ส่งผลโดยตรงต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของไข่เทียมทรงเครื่อง ทั้งในด้านเนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติ และสี ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค ทำให้เนื้อสัมผัสมีความแตกต่างกับไข่ทรงเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเฉพาะในด้านความแข็ง (Hardness) จากตารางที่ 4.11 ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคะแนนความชื่นชอบของผู้ประเมินทางประสาทสัมผัส เหลือเพียง 2 จาก 9 คะแนนในด้านความชอบโดยรวม แนวทางที่อาจช่วยปรับปรุงไข่เทียมทรงเครื่องให้ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากขึ้น ได้แก่ การเพิ่มสัดส่วนน้ำในสูตรของไข่เทียมทรงเครื่องเพื่อให้เนื้อสัมผัสมีความนุ่มขึ้น การปรับลดปริมาณไฮโดรคอลลอยด์เพื่อป้องกันเนื้อสัมผัสที่แน่นเกินไป รวมถึงการให้ความร้อนบางส่วนก่อนรีทอร์ท (Pre-gelatinization) อาจช่วยลดผลกระทบจากความร้อนสูงในกระบวนการรีทอร์ท ทั้งนี้ เพื่อให้ไข่เทียมทรงเครื่องหลังรีทอร์ท มีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่อง และเพิ่มระดับความชื่นชอบของผู้ประเมินทางประสาทสัมผัสในการวิจัยถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการของไข่เทียมทรงเครื่องผสมไฮโดรคอลลอยด์ ก่อนและหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

การตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการ (Proximate Analysis) เป็นการประเมินองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์อาหาร อย่างโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เถ้า และความชื้น ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่แสดงถึงคุณค่าทางอาหาร และการให้พลังงานแก่ผู้บริโภค (FAO, 2003) โดยเฉพาะปริมาณโปรตีน ที่มีบทบาทในการเสริมสร้างและซ่อมแซมกล้ามเนื้อ และไขมัน ที่ช่วยในการดูดซึมวิตามินที่ละลายในไขมัน อีกทั้งให้พลังงานที่สูง ขณะที่คาร์โบไฮเดรตมีหน้าที่หลักในการเป็นแหล่งพลังงานที่เข้าถึงได้รวดเร็ว (McClements, 2015) ซึ่งจากผลการตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการของไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท ในตารางที่ 4.17 พบว่า ไข่ทรงเครื่องมีปริมาณโปรตีน และไขมันสูงที่สุด โดยให้โปรตีน 13.32% และไขมัน 3.17% ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของไข่จริงที่ระบุไว้ในมาตรฐาน USDA (USDA, 2019) ในทางกลับกันไข่เทียมทรงเครื่องทั้งก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงถึง 24 %

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการระหว่างไข่ทรงเครื่อง ไข่เทียมทรงเครื่องก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท

สูตร	ไขมัน (%)	โปรตีน (%)	เถ้า (%)^{ns}	คาร์โบไฮเดรต (%)	ความชื้น (%)^{ns}
ไข่ทรงเครื่อง	3.17±0.00^{a}	13.32±0.00^{a}	1.86±0.00	14.01±0.00^{b}	66.74±0.00
ก่อนฆ่าเชื้อ	1.01±0.00^{b}	3.85±0.00^{b}	1.48±0.00	24.13±0.00^{a}	68.56±0.00
หลังฆ่าเชื้อ	1.07±0.00^{b}	3.91±0.00^{b}	1.57±0.00	24.03±0.0^{a}	68.43±0.00

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.14 พบว่า ไข่ทรงเครื่องมีปริมณไขมัน และโปรตีน ที่มากกว่าไขเทียมทรงเครื่องทั้งก่อน และหลังฆ่าเชื้อประมาณ 3 – 3.5 เท่า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าไขเทียมทรงเครื่องทั้งก่อน และหลังฆ่าเชื้อประมาณ 1.7 เท่า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับปริมาณเถ้า และความชื้น พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตัวอย่างทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไข่เทียมทรงเครื่องทั้งก่อน และหลังการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงถึง 24.13–24.03% โดยส่วนประกอบหลักมาจาก ถั่วลูกไก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า ซึ่งเน้นให้พลังงาน และช่วยคงรูปให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ โดยในสูตรมีการใช้ไฮโดรคอลลอยด์สองชนิดร่วมกัน คือ กัวร์กัม 5% และแซนแทนกัม 1% ซึ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่ช่วยสร้างโครงสร้างเจล และเพิ่มความเหนียวของเนื้อสัมผัส แต่ไม่ได้มีบทบาทโดยตรงในการเพิ่มโปรตีน (Wang et al., 2023) เนื่องจากไข่เทียมทรงเครื่องทั้งก่อน และหลังฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท มีส่วนผสมที่เน้นแหล่งพลังงานจากถั่วลูกไก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า เป็นหลักแทนแหล่งโปรตีนจากเนื้อสัตว์ จึงส่งผลให้มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่สูงกว่าไข่ทรงเครื่องประมาณ 10 % นอกจากนี้ ปริมาณเถ้า และความชื้นของทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การใช้ถั่วลูกไก่เป็นแหล่งโปรตีนพืช แม้จะเป็นตัวเลือกที่ปลอดจากสารก่อภูมิแพ้ แต่มีข้อจำกัดด้านปริมาณ และคุณภาพของกรดอะมิโน โดยเฉพาะ Methionine และ Cysteine ที่ต่ำกว่ามาตรฐานโปรตีนจากสัตว์ (Solanke et al., 2021; SpringerLink, 2025) นอกจากนี้ พบว่า แม้การฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ทจะไม่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนโดยรวมมากนัก แต่ความร้อน และความดันในกระบวนการดังกล่าว อาจมีผลทำให้โครงสร้างโปรตีนเสียสภาพ (denaturation) และเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด กับน้ำตาลในสูตร ส่งผลให้สูญเสียกรดอะมิโนบางชนิด และเกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงโครงสร้างของเจลโปรตีน (ScienceDirect, 2016; McClements, 2009)

ดังนั้น แม้ว่าไข่เทียมทรงเครื่องหลังการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ทจะยังคงมีข้อจำกัดในด้านปริมาณโปรตีน และคะแนนประเมินทางประสาทสัมผัสที่ต่ำกว่าไข่ทรงเครื่อง แต่ผลลัพธ์ด้านความชื้น เนื้อสัมผัส และโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรภายหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่สูง แสดงให้เห็นว่าไข่เทียมทรงเครื่องมีศักยภาพมากเพียงพอที่จะใช้พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อ ซึ่งเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมทางเลือกอย่างโปรตีนเกษตร ที่มุ่งเน้นด้านอายุการเก็บรักษา ความปลอดภัย และคุณค่าทางโภชนาการพื้นฐาน ทั้งนี้ การพัฒนาสูตรเพิ่มเติมในด้านโปรตีนให้มีคุณภาพที่สูงขึ้น และมีการปรับปรุงรสชาติสามารถทำได้ในวิจัยต่อยอดในอนาคต เพื่อคาดหวังว่าจะช่วยเพิ่มการยอมรับของผู้บริโภคได้ (Dekkers et al., 2018; McClements, 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ถั่วลูกไก่เป็นวัตถุดิบหลัก เนื่องจากมีปริมาณโปรตีน และเส้นใยที่สูง ซึ่งคอยช่วยในการดูดซับน้ำ และคงรูปผลิตภัณฑ์ได้ดีให้ใกล้เคียงกับไข่จริง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM) เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมที่สุดในคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัส พบว่า สูตรที่เหมาะสมมีส่วนผสมของถั่วลูกไก่ 13.81 % อควาฟาบา 2.86 % แป้งมันสำปะหลัง 4.60 % แป้งข้าวเจ้า 0.09 % และน้ำกรอง 50 %

5.1.2 สำหรับการทดลองในการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในไข่เทียมทรงเครื่อง มีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ กัวร์กัม คาราจีแนน และแซนแทนกัม ในสัดส่วนที่หมาะสม ซึ่งมีผลต่อไข่เทียมทรงเครื่องทั้งในด้านลักษณะเนื้อสัมผัส และค่าสี โดยเฉพาะกัวร์กัม และแซนแทนกัม ซึ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่สามารถทนความร้อนได้ดี นอกจากนี้ มีการใช้ Response Surface Methodology (RSM) เพื่อคัดเลือกสูตรที่มีค่าใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากที่สุดในลักษณะทางเนื้อสัมผัส ทั้งนี้ สูตรที่ได้คัดเลือกมามีส่วนผสมของกัวร์กัม และแซนแทนกัม 5 และ 1 % ตามลำดับ

5.1.3 สำหรับการศึกษาไข่เทียมทรงเครื่องหลังผ่านการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการรีทอร์ท สูตรผสมของกัวร์กัม และแซนแทนกัม 5 และ 1 % ตามลำดับ พบว่า ลักษณะทางกายภาพหลายอย่างเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน อย่างเช่น ค่าความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้นถึง 532.72±6.97 g ($p \leq 0.05$) และค่าความสามารถในการยึดเกาะภายในอาหารก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยคะแนนความชอบ พบว่า ไข่เทียมทรงเครื่องหลังรีทอร์ท มีคะแนนความชอบจากผู้ประเมิน ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี รสชาติ และความชอบโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของการใช้ความร้อนสูงต่อโครงสร้างของไข่เทียมทรงเครื่อง นอกจากนี้ ทำให้ทราบได้ว่า กระบวนการรีทอร์ท ไม่ส่งผลต่อไข่เทียมทรงเครื่องในทางโภชนาการ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เถ้า ความชื้น และคาร์โบไฮเดรต

5.1.4 สำหรับการพัฒนา และปรับปรุงคุณคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สาร ก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ด้วยสารไฮโดรคอลลอยด์ เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารทางเลือกที่เน้นถึงความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นหลัก ทั้งในด้านของการหลีกเลี่ยงการใช้วัตถุดิบที่มีสารก่อภูมิแพ้ การเลือกใช้วัตถุดิบจากพืช ที่มีแนวโน้มก่อภูมิแพ้น้อยกว่าโปรตีนจากสัตว์ และการควบคุมคุณภาพของไข่เทียมทรงเครื่องให้ปลอดภัยผ่านกระบวนการผลิตอย่างรีทอร์ท ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการรักษาคุณภาพ และความปลอดภัยของอาหารตามหลักวิทยาศาสตร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ให้มีการทดลองใช้กับวัตถุดิบจากพืชไร้สารก่อภูมิแพ้อื่น ๆ เพิ่มเติม ซึ่งอ้างอิงจากคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับถั่วลูกไก่ เช่น โปรตีนจากถั่วเหลืองที่ลดสารก่อภูมิแพ้ ถั่วดำ หรือโปรตีนจากข้าว

5.2.2 ปรับสูตรไข่เทียมทรงเครื่องภายหลังการรีทอร์ท โดยการเพิ่มสารคงตัว หรือสารป้องกันการเกิดออกซิเดชั่นจากธรรมชาติ เพื่อช่วยรักษาคุณลักษณะเดิมก่อนรีทอร์ทไว้

5.2.3 ศึกษาผลกระทบต่อโภชนการทางด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม แม้ความร้อนสูงของกระบวนการรีทอร์ท จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของไข่เทียมทรงเครื่องได้ดี แต่อาจทำให้สารอาหารบางอย่างหายไปเช่นกัน

5.2.4 ศึกษาการใช้อควาฟาบาร่วมกับสารเสริมเจลอื่น ๆ นอกจากไฮโดรคอลลอยด์ เช่น เส้นใยจากธรรมชาติ หรือแป้งดัดแปร เพื่อคาดหวังการพัฒนาเนื้อสัมผัสให้ใกล้เคียงกับไข่ทรงเครื่องมากขึ้น

5.2.5 ศึกษาถึงพฤติกรรมของผู้บริโภค และการยอมรับต่อไข่เทียมทรงเครื่อง ในกลุ่มวีแกน หรือผู้สนใจอาหารเพื่อสุขภาพ

5.2.6 ศึกษาอายุการเก็บรักษา พร้อมกับบรรจุภัณฑ์หลังการฆ่าเชื้อด้วยรีทอร์ท เพื่อดูปริมาณจุลินทรีย์ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสในระยะยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ณฐิฒา รอดขวัญ. (2565). *ผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากพืช*. วารสารวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, 52(4), 5–13.

ณัฐธิดา มหาชัยราชัน, กมลวรรณ แจ้งชัด, & อนุวัตร แจ้งชัด. (2554). ผลของไฮโดรคอลลอยด์และความชื้นของส่วนผสมต่อคุณภาพของอาหารเช้าชนิดแผ่นจากแป้งข้าวกล้องงอก. ใน *เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร* (หน้า 398–405). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

ดวงกมล ลิลิตกานต์พจน์, & ปารเมศ วรเศยานนท์. (2564). การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมสำหรับเด็กที่มีอาการแพ้นมวัวในช่วงอายุไม่เกิน 10 ปี. *วารสารวิชาการ Journal of Business Administration and Languages (JBAL)*, 9(1), 1–13.

ดารณี หมู่ขจรพันธ์. (2560). *กฎระเบียบของอาหารก่อภูมิแพ้ (food allergen) ที่ต้องรู้*. สืบค้นจาก https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/FQ144_p69-71.pdf

ธีรารัตน์ อิทธิโสภกุล, & วิชมณี ยืนยงพุทธกาล. (2562). *การผลิตสาหร่ายพวงองุ่นพร้อมบริโภคในรีทอร์ตเพาซ์*. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้, มหาวิทยาลัยบูรพา.

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2553). *เคมีอาหาร* (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.

ปาลิตา พิมพ์สาลี, & กุลธิดา แจงเล็ก. (2563). การพัฒนาผลิตภัณฑ์กะปิจากพืชให้เหมาะสมกับกลุ่มผู้สูงอายุ. สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ, คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

พริมา พิริยางกูร, จันทกานต์ (ศรีสมทรัพย์) พิภพมงคล, ไพบูลย์ ปุญญฤทธิ์, & ภานุวิชญ์ พุ่มหิรัญ. (2556). การศึกษาผลของกระบวนการทางอาหารต่อความเป็นสารก่อภูมิแพ้ในกุ้งแชบ๊วยโดยเทคนิคทางโปรตีโอมิกส์: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.

พัชรพร ศรีชัยนาท, & วันวิสาข์ สกลภาพ. (2561). ผลของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีต่อสมบัติทางรีโอโลยีและทางเนื้อสัมผัสของเนื้อมังสวิรัติที่เตรียมจากถั่วเหลือง (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

รัชนี คงคาฉุยฉาย, & ริญ เจริญศิริ. (2554). *โภชนาการกับผลไม้*. กรุงเทพมหานคร: สารคดี.

รุ่งนภา พงส์สวัสดิ์มานิต. (2547). *กัม (ไฮโดรคอลลอยด์) กับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารและกระบวนแปรรูป: เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ*. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

หทัยชนก กันตรง. (2565). ไข่เทียมจากพืช. *วารสารวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร*, 52(3), 25–32.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อรัชพร ดีประเสริฐ, & สุธีรา วัฒนกุล. (2566). การผลิตผลิตภัณฑ์โจ๊กไข่ขาวผสมข้าวพร้อมบริโภคบรรจุในถุงรีทอร์ทเพาซ์. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 15(29), 249756-1.

ไผ่แดง ขวัญใจ, วันวิสาข์ ดอกคำ, ปิยะ พันธ์แดง, & สุวลี ฟองอินทร์. (2566). ผลของกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนต่อคุณลักษณะทางเคมีกายภาพ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อตุ๋นในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 28(1), 94–113.

Alavi, A. M., Farahnaky, M. M., & Majzoobi, M. (2018). Determination of kinetic and thermodynamic parameters of food hydrocolloids by thermal analysis techniques. Food Research International, 113, 274–282. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.011

AOAC. (2012). Official methods of analysis (19th ed.). The Association of Official Analytical Chemists.

Campo, V. L., Kawano, D. F., da Silva, D. B., & Carvalho, I. (2009). Carrageenans: Biological properties, chemical modifications and structural analysis – A review. Carbohydrate Polymers, 77(2), 167–180. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.01.020

Day, L., Zeng, X. A., & Serventi, L. (2021). Aquafaba: Composition, functionality, and applications in food systems. Trends in Food Science & Technology, 110, 146–157.

Erem, E., Icyer, N. C., Tatlisu, N. B., Kilicli, M., Kaderoglu, G. H., & Toker, Ö. S. (2023). A new trend among plant-based food ingredients in food processing technology: Aquafaba. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63(20), 4467–4484.

European Commission. (2021). Average protein content in g/100 g and % of food energy from protein in animal-derived raw foods. Retrieved from https://knowledge4policy.ec.europa.eu/health-promotion-knowledge-gateway/dietary-protein-animal-1a_en

Gorrasi, G., Pantani, R., Bugatti, V., & Vittoria, V. (2022). Thermorheological behavior of **K**-carrageenan hydrogels modified with xanthan gum. Gels, 8(4), 119. https://doi.org/10.3390/gels8040119

Healthline. (2023). How much protein in an egg? A detailed look. Retrieved from https://www.healthline.com/nutrition/protein-in-egg

Imeson, A. (2009). Food stabilisers, thickeners and gelling agents. Wiley-Blackwell.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jafari, S. M., & Dehghannya, J. (2021). Effect of hydrocolloids on the texture of egg analogs. Food Chemistry, 335, 127628.

Javadi, A., Tavasoli, S., & Azizi, M. H. (2022). Application of aquafaba as an egg replacer in bakery products: A review. Foods, 11(17), 2566. https://doi.org/10.3390/foods11172566

Jeske, S., Arendt, E. K., & Zannini, E. (2021). Sustainable functional ingredients from legumes for food applications. Processes, 9(5), 871. https://doi.org/10.3390/pr9050871

Kohyama, K. (2020). Food texture – Sensory evaluation and instrumental measurement. Retrieved from ResearchGate

Li, M., Zhang, J., & Zhou, Z. (2021). Enhancing gelling ability of egg analogs through hydrocolloid manipulation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 69(6), 1691–1698.

McClements, D. J. (2009). Food emulsions: Principles, practices, and techniques. CRC Press.

Meullenet, J.-F., Gross, J., Ressurreccion, A. V. A., & Hussey, K. (1998). Relationship between sensory and instrumental texture profile attributes. Journal of Texture Studies, 29(6), 643–658.

Murayama, A., Ichikawa, Y., & Kawabata, A. (1995). Sensory and rheological properties of **K**-carrageenan gels mixed with locust bean gum, tara gum or guar gum. Journal of Texture Studies, 26(3), 239–254. https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1995.tb00963.x

Mustafa, R., & Reaney, M. J. (2018). Aquafaba, from food waste to a value-added food ingredient: A review. Trends in Food Science & Technology, 80, 114–123. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.025

Nipornram, S., Tochampa, W., & Benjakul, S. (2023). Effect of retort processing on textural and structural properties of egg-based emulsion gels. Foods, 12(19), 3676. https://doi.org/10.3390/foods12193676

Raza, H., Ameer, K., Zaaboul, F., Sharif, H. R., Ali, B., Shoaib, M., Akhtar, W., & Zhang, L. (2019). Effects of ball-milling on physicochemical, thermal and functional properties of extruded chickpea (Cicer arietinum L.) powder. CyTA-Journal of Food, 17(1), 563–573.

Raza, H., Zaaboul, F., Shoaib, M., Ashraf, W., Hussain, A., & Zhang, L. (2019). Physicochemical and structural characterization of microwave-roasted chickpea. Journal of Global Innovations in Agricultural and Social Sciences, 7, 23–28.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sangkharak, K., & Sittiprapaporn, S. (2020). Hydrocolloid addition to improve the texture and shelf life of analog foods. Journal of Food Science, 85(8), 2579–2592.

ScienceDirect. (2016). Impact of conventional sterilization and ohmic heating on the amino acid profile and protein quality of liquid enteral formulae. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146685641600014X

Solano, M. L., Jiménez-Moreno, N., & Hernando, I. (2023). Investigation of aquafaba gels: Microstructure, texture and physicochemical properties. Gels, 9(4), 313. https://doi.org/10.3390/gels9040313

SpringerLink. (2025). Pulses protein concentrates and isolates as stand-alone plant-based egg replacers. Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-025-03810-z

Tarek, M. S., Ibrahim, M. A., & El-Sayed, M. A. (2023). Physicochemical and color properties of chickpea flour from different cultivars. Asian Journal of Biological Sciences, 16(1), 77–84.

Zhou, Y., Fu, X., Li, L., & Xu, B. (2022). The properties and applications of starches from different botanical sources. Food Hydrocolloids, 124, 107252.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์ตาม AOAC (2012)

1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธีซอกเลต (Soxhlet extract method)

1.1 ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบความชื้นออกแล้ว 1 กรัม ใส่ในกระดาษกรองสำหรับการสกัดไขมัน

1.2 พับกระดาษกรองแล้วใส่ในทิมเบอร์ และใส่ทิมเบอร์ในชุดกลั่นซอกเลต

1.3 เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ปริมาณ 160 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ผ่านการอบไล่ความชื้น และชั่งน้ำหนักแล้ว

.1.4 เปิดเครื่องทำน้ำหล่อเย็นที่ 10 องศาเซลเซียส ก่อนเริ่มสกัด อย่างน้อย 30 นาที ให้ความร้อนด้วยเตาหลุมที่ระดับ 4 – 5 ก่อนสกัดไขมันตามเวลาที่เหมาะสมกับปริมาณไขมันในตัวอย่าง

1.5 เมื่อครบเวลาให้ปิดการให้ความร้อน และระเหยปิโตเลียมอีเทอร์ออกจากตัวอย่างในตู้ดูดควัน

1.6 นำขวดก้นกลมที่มีตัวอย่าง อบต่อในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 102±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ก่อนชั่งน้ำหนัก

1.7 คำนวณปริมาณไขมันมันเป็นเปอร์เซ็นต์จากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมันเป็นเปอร์เซ็นต์} = \frac{(W_3 - W_2) \times 100}{W_1}$$

เมื่อ W1 = น้ำหนักของตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

W2 = น้ำหนักของขวดก้นกลมเปล่า หน่วยเป็น กรัม

W3 = น้ำหนักของขวดก้นกลมที่มีไขมัน หน่วยเป็น กรัม

2. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีเจลดาห์ (Kjeldahl method)

2.1 ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 2 กรัม ใส่ในหลอดย่อยโปรตีน

2.2 เติมคะตะลิสต์ผสม 8 กรัม และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร โดยการเติมกรดให้ทำการเอียงหลอด เพื่อชะเอาโปรตีนที่อาจติดอยู่ข้างหลอด จากนั้นเขย่าเบาๆ

2.3 นำไปย่อยในชุดย่อย เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างจะเป็นสีใส ทิ้งให้หลอดตัวอย่างเย็นลงที่อุณหภูมิห้องโดยห้ามนำไปหล่อน้ำเนื่องจากหลอดทดลองอาจแตกได้

2.4 นำสารละลายสีใสที่ได้เข้าเครื่องกลั่นโปรตีน โดยนำขวดรูปชมพู่ที่มีกรดบอริกความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร จำนวน 50 มิลลิลิตร และผสมอินดิเคเตอร์ 6-10 หยด จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ให้มากเกินพอ (สารละลาย จะมีสีดำเมื่อมีปริมาณด่างที่มากเกินพอ)

2.5 เปิดเครื่องทำการกลั่นโดยทำ Blank ก่อนตัวอย่าง นำสารละลายที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกจนได้จุดยุติ คือสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 คำนวณหาปริมาณไนโตรเจนจากสูตร

$$\text{ปริมาณไนโตรเจนเป็นเปอร์เซ็นต์} \quad \frac{(V_a - V_b) \times H_2SO_4\,(\text{นอร์มอล}) \times 1.4007}{W}$$

เมื่อ Va = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง หน่วยเป็น มิลลิลิตร

Vb = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต Blank หน่วยเป็น มิลลิลิตร

H_2SO_4 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (นอร์มอล)

W = น้ำหนักตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

2.7 คำนวณหาปริมาณโปรตีนจากสูตร

ปริมาณโปรตีนเป็นเปอร์เซ็นต์ = ปริมาณไนโตรเจนเป็นเปอร์เซ็นต์ × 6.25

3. การวิเคราห์ปริมาณเส้นใย

3.1 ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันออกแล้ว 1 กรัม บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.2 ตวงสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างอยู่ แล้วนำไปต้มบนเตาไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที โดยปิดปากบีกเกอร์ด้วยขวดแก้วกลมที่บรรจุน้ำกลั่นขนาด 500 มิลลิลิตร เพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย

3.3 จากนั้นนำมากรองทันทีด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 541 ที่รู้น้ำหนักที่แน่นอน

3.4 ฉีดล้างสิ่งที่เหลือบนบีกเกอร์ด้วยน้ำร้อนหลายๆครั้งลงในเครื่องกรอง

3.5 ล้างสิ่งตกค้างบนกระดาษกรองด้วยน้ำร้อนจนหมดความเป็นกรด ทดสอบโดยการใช้กระดาษลิตมัส หากยังมีความเป็นกรดกระดาษลิตมัสจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง

3.6 นำกระดาษกรองวางบนถ้วยกระเบื้อง แล้วนำไปอบที่ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 102±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก

3.7 เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมกระดาษกรองที่อุณหภูมิ 550±25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก

3.8 คำนวณปริมาณเส้นใยเป็นเปอร์เซ็นต์ด้วยสูตร

$$\text{ปริมาณเส้นใยเป็นเปอร์เซ็นต์} = \frac{(W4 - W3 - W2) - (W5 - W3)}{W1} \times 100$$

เมื่อ W1 = น้ำหนักของตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

W2 = น้ำหนักของกระดาษกรอง หน่วยเป็น กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W3 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง หน่วยเป็น กรัม

W4 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง กระดาษกรอง และกากหลังการอบแห้ง หน่วยเป็น กรัม

W5 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง และกากหลังการเผา หน่วยเป็น กรัม

4. การวิเคราะห์เถ้า

4.1 เผาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 525±25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เมื่อครบเวลา ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ก่อนชั่งน้ำหนัก

4.2 ชั่งตัวอย่างใส่ถ้วยกระเบื้องที่เผาแล้ว 2-3 กรัม

4.3 นำไปเผาอุณหภูมิ 525±25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในโภดูดความชื้นก่อนชั่งน้ำหนัก (ถ้าเถ้าที่ได้ไม่เป็นสีขาวให้ทำการหยดน้ำเล็กน้อยพอให้ชุ่มแล้วนำไประเหยให้แห้ง แล้วนำไปเผาซ้ำ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง)

4.4 คำนวณปริมาณเถ้าทั้งหมดเป็นเปอร์เซ็นต์จากสูตร

$$\text{ปริมาณเถ้าทั้งหมดเป็นเปอร์เซ็นต์} = \frac{(W_3 - W_1) \times 100}{(W_2 - W_1)}$$

เมื่อ W1 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง หน่วยเป็น กรัม

W2 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง และตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

W3 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง และเถ้า หน่วยเป็น กรัม

5. การวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตด้วยการคำนวณ

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นเปอร์เซ็นต์ = 100 – (เปอร์เซ็นต์ของความชื้น + เปอร์เซ็นต์ของโปรตีน + เปอร์เซ็นต์ของไขมัน + เปอร์เซ็นต์ของเถ้า + เปอร์เซ็นต์ของเส้นใย)

6. การวิเคราะห์ค่าสี

วิเคราะห์ค่าสีดัดแปลงจากวิธีของ Pedreschi และคณะ (2560) วัดค่าสีของผลิตภัณฑ์โดยนำตัวอย่าง ใส่ลงในแผ่นเพลท ทำการสุ่มวัด 2 ครั้ง ใน 1 ตัวอย่าง ใช้เครื่องวัดสี Chroma meter ระบบสี CIE วัดค่า L* a* และ b* นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าความเข้มของสี (C*) และค่ามุมที่บ่งบอกเฉดสี (*h) ดังสมการดำนล่าง

ค่าความเข้มของสี (C*) = (a*2+b*2)1/2

ค่ามุมที่บ่งบอกเฉดสี (h*) = tan-1(b*/a*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ดัดแปลงจากวิธีของ Association of official analytical chemists, AOAC (1990) นำถ้วยอะลูมิเนียมอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งตัวอย่างอาหารที่บดแล้วลงในถ้วยอะลูมิเนียมให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนจำนวน 3 กรัม บันทึกน้ำหนักของถ้วยอลูมิเนียมกับตัวอย่าง นำเข้าไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง โดยเปิดฝาถ้วยอะลูมิเนียม เมื่อครบเวลานำออกมาใส่ตู้อบใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ได้ คำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นในอาหาร

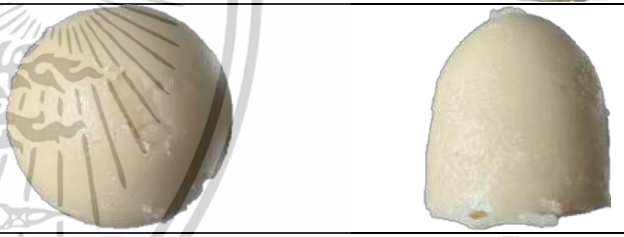
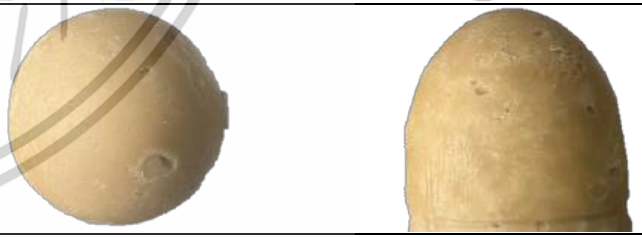
จากสมการ

$$\text{ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{(\text{น้ำหนักอาหารเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักอาหารแห้ง})}{\text{น้ำหนักอาหารเริ่มต้น}} \quad X$$

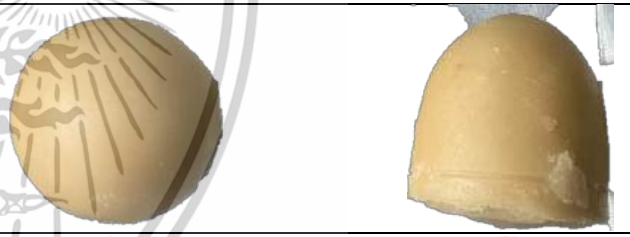
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ภาพลักษณะปรากฏของตัวอย่างที่ทำการทดลองการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่

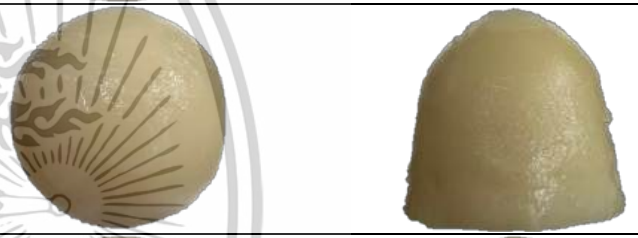
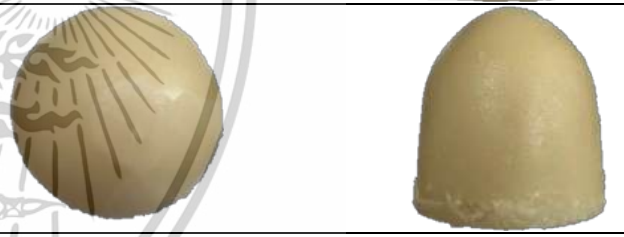
ตารางที่ ข1 ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
1	30	15	7.5	0	45	
2	30	0	7.5	7.5	45	
3	20	30	7.5	15	45	

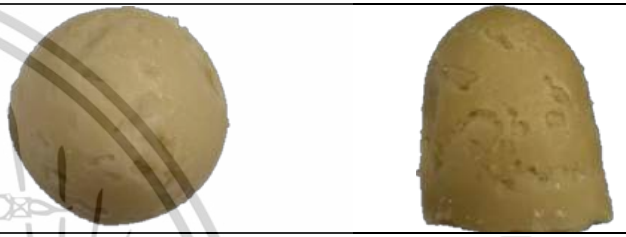
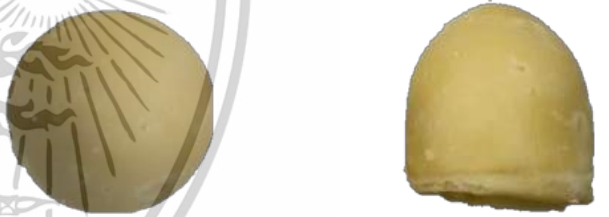
ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
4	10	15	15	7.5	45	
5	20	0	7.5	7.5	40	
6	30	15	7.5	15	45	
7	20	30	7.5	7.5	50	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
8	20	0	0	7.5	45	
9	20	15	7.5	15	40	
10	20	15	7.5	7.5	45	
11	10	0	7.5	7.5	45	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
12	10	15	7.5	7.5	50	
13	20	15	7.5	7.5	45	
14	20	30	15	7.5	45	
15	20	15	0	15	45	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
16	30	15	7.5	7.5	50	
17	10	15	7.5	15	45	
18	10	15	7.5	0	45	
19	20	15	15	0	45	

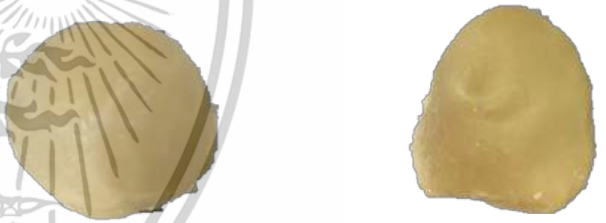
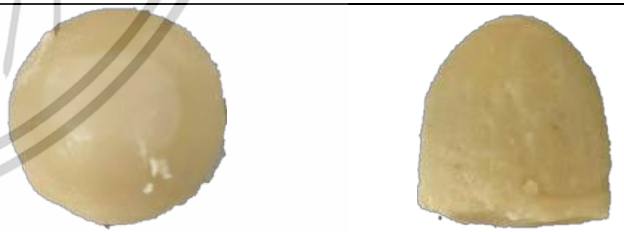
ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
20	20	0	7.5	15	45	
21	20	30	7.5	7.5	40	
22	20	15	15	15	45	
23	20	15	0	7.5	50	

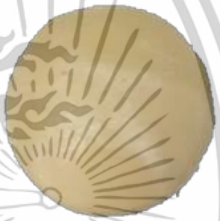
ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
24	30	15	15	7.5	45	
25	20	30	7.5	0	45	
26	30	15	7.5	7.5	40	
27	20	15	7.5	0	40	

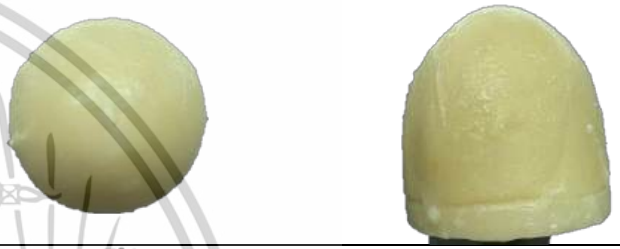
ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
28	20	0	15	7.5	45	
29	30	30	7.5	7.5	45	
30	20	15	15	7.5	40	
31	30	15	0	7.5	45	

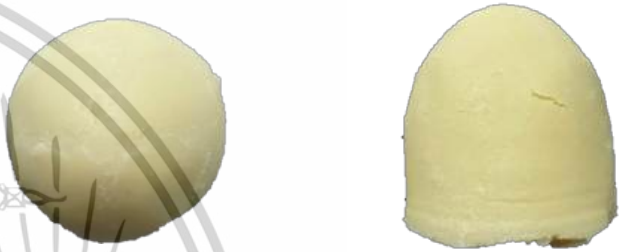
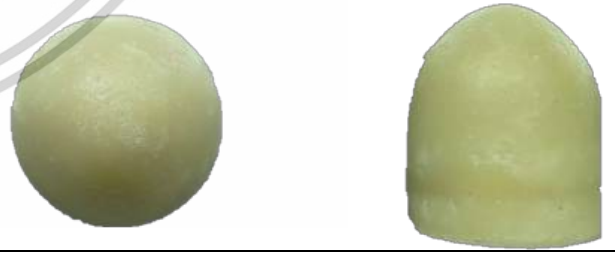
ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
32	10	15	7.5	7.5	40	
33	20	15	7.5	0	50	
34	20	0	7.5	7.5	50	
35	20	15	7.5	7.5	45	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
36	10	15	0	7.5	45	
37	20	30	0	7.5	45	
38	20	0	7.5	0	45	
39	20	15	0	7.5	40	

ตารางที่ ข1 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ ในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์

สูตรที่	ผงถั่วลูกไก่	Aquafaba	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	น้ำกรอง	ภาพ
40	10	30	7.5	7.5	45	
41	20	15	15	7.5	50	
42	20	15	0	0	45	
43	20	15	7.5	15	50	

2. ภาพลักษณะปรากฏของตัวอย่างที่ทำการทดลองการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ด้วยสารไฮโดรคอลลอยด์

ตารางที่ ข2 ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
การศึกษาไฮโดรคอลลอยด์ชนิดเดียว				
1	1	0	0	
2	0	1	0	
3	0	0	1	
4	3	0	0	
5	0	3	0	

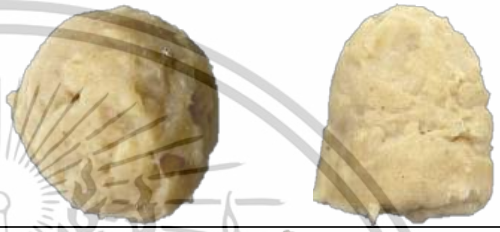
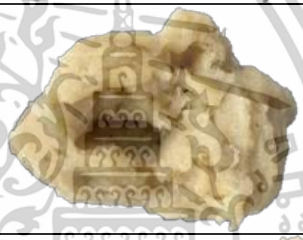
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
6	0	0	3	
7	5	0	0	
8	0	5	0	
9	0	0	5	
การศึกษาการใช้กัวร์กัม ร่วมกับ แซนแทนกัม				
10	5	1	0	
11	1	3	0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
12	3	1	0	
13	5	5	0	
14	3	3	0	
15	3	5	0	
16	1	1	0	
17	1	5	0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
18	5	3	0	
การศึกษาการใช้กัวร์กัม ร่วมกับ คาราจีแนน				
19	3	0	5	
20	3	0	1	
21	5	0	3	
22	3	0	3	
23	1	0	1	

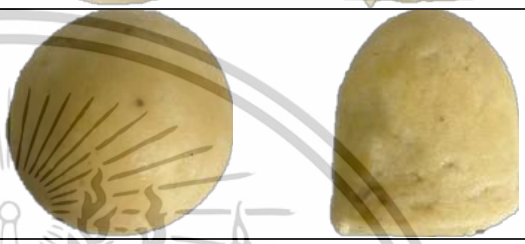
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
24	5	0	1	
25	5	0	5	
26	1	0	3	
27	1	0	5	
การศึกษาการใช้แซนแทนกัม ร่วมกับ คาราจีแนน				
28	0	1	3	
29	0	1	1	

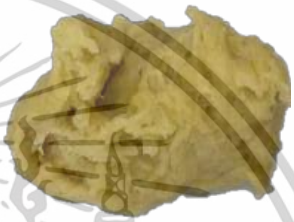
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
30	0	3	3	
31	0	5	3	
32	0	3	5	
33	0	5	1	
34	0	5	5	
35	0	3	1	
36	0	1	5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
การศึกษาการใช้ กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ร่วมกัน				
37	1	3	3	
38	3	1	3	
39	5	1	5	
40	3	5	1	
41	3	1	1	
42	3	5	3	

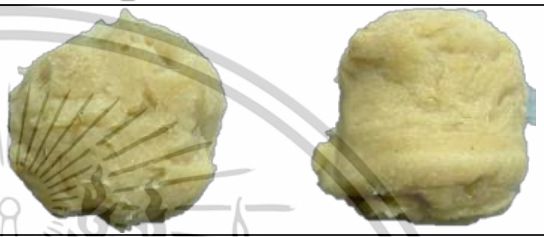
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
43	1	3	5	
44	1	3	1	
45	5	5	5	
46	1	1	5	
47	1	1	3	
48	5	5	3	
49	1	5	5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
50	3	3	5	
51	1	5	1	
52	5	3	1	
53	1	5	3	
54	3	1	5	
55	5	3	3	
56	5	5	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ลักษณะปรากฏของไข่เทียมทรงเครื่องไร้สารก่อภูมิแพ้จากถั่วลูกไก่ในขั้นตอนการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

สูตรที่	กัวร์กัม	แซนแทนกัม	คาราจีแนน	ภาพ
57	3	3	3	
58	3	3	1	
59	1	1	1	
60	5	1	3	
61	3	5	5	
62	5	1	1	
63	5	3	5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่พิจารณาจากปริมาณของ Hardness โดยใช้ตัวแปรที่ใส่รหัส

Term	Coef	P
Constant	+684.27	< 0.0001
A-ผงถั่วลูกไก่	+78.79	0.0074
B-อคาฟาบา	-312.28	< 0.0001
C-แป้งมันสำปะหลัง	+237.64	< 0.0001
D-แป้งข้าวเจ้า	+459.35	< 0.0001
E-น้ำกรอง	-52.95	0.0601
AB	+6.05	0.9108
AC	-201.56	0.0010
AD	-153.16	0.0090
AE	-13.74	0.7995
BC	+6.80	0.8998
BD	-149.56	0.0104
BE	+60.90	0.2666
CD	+18.96	0.7261
CE	+6.93	0.8979
DE	+17.76	0.7427
A^2	+125.32	0.0071
B^2	+137.01	0.0037
C^2	+22.75	0.5956
D^2	+112.14	0.0145
E^2	+18.31	0.6689

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่พิจารณาจากปริมาณของ Springiness โดยใช้ตัวแปรที่ใส่รหัส

Term	Coef	P
Constant	+0.9893	< 0.0001
A-ผงถั่วลูกไก่	+0.0044	0.0005
B-อคาฟาบา	+0.0021	0.0625
C-แป้งมันสำปะหลัง	-0.0080	< 0.0001
D-แป้งข้าวเจ้า	+0.0011	0.3343
E-น้ำกรอง	-0.0017	0.1291
AB	+0.0022	0.3151
AC	+0.0077	0.0016
AD	+0.0072	0.0027
AE	+0.0120	< 0.0001
BC	-0.0036	0.1067
BD	+0.0081	0.0010
BE	+0.0044	0.0531
CD	+0.0148	< 0.0001
CE	-0.0050	0.0297
DE	+0.0040	0.0784
A^2	-0.0031	0.0805
B^2	-0.0016	0.3546
C^2	-0.0029	0.0997
D^2	-0.0007	0.7009
E^2	+0.0018	0.3122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่พิจารณาจากปริมาณของ Cohesiveness โดยใช้ตัวแปรที่ใส่รหัส

Term	Coef	P
Constant	+0.7048	< 0.0001
A-ผงถั่วลูกไก่	-0.0046	0.1149
B-อคาฟาบา	+0.0139	< 0.0001
C-แป้งมันสำปะหลัง	-0.0178	< 0.0001
D-แป้งข้าวเจ้า	+0.0116	0.0004
E-น้ำกรอง	+0.0024	0.3979
AB	+0.0076	0.1868
AC	+0.0041	0.4689
AD	+0.0258	0.0001
AE	+0.0060	0.2953
BC	+0.0003	0.9613
BD	-0.0027	0.6342
BE	-0.0159	0.0096
CD	-0.0438	< 0.0001
CE	+0.0065	0.2597
DE	+0.0088	0.1301
A^2	-0.0156	0.0019
B^2	-0.0066	0.1507
C^2	-0.0221	< 0.0001
D^2	-0.0004	0.9221
E^2	+0.0039	0.3891

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่พิจารณาจากปริมาณของ Gumminess โดยใช้ตัวแปรที่ใส่รหัส

Term	Coef	P
Constant	+480.83	< 0.0001
A-ผงถั่วลูกไก่	+59.88	0.0021
B-อคาฟาบา	-185.21	< 0.0001
C-แป้งมันสำปะหลัง	+135.61	< 0.0001
D-แป้งข้าวเจ้า	+327.94	< 0.0001
E-น้ำกรอง	-23.51	0.1860
AB	+49.14	0.1677
AC	-140.69	0.0005
AD	-100.48	0.0080
AE	-36.79	0.2971
BC	+38.24	0.2788
BD	-109.41	0.0044
BE	+67.83	0.0616
CD	-20.60	0.5558
CE	+21.72	0.5348
DE	+28.33	0.4196
A^2	+83.42	0.0057
B^2	+68.77	0.0192
C^2	-5.06	0.8543
D^2	+89.65	0.0033
E^2	+23.34	0.4005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่พิจารณาจากปริมาณของ Chewiness โดยใช้ตัวแปรที่ใส่รหัส

Term	Coef	P
Constant	+471.96	< 0.0001
A-ผงถั่วลูกไก่	+75.54	0.0020
B-อคาฟาบา	-192.00	< 0.0001
C-แป้งมันสำปะหลัง	+118.06	< 0.0001
D-แป้งข้าวเจ้า	+330.61	< 0.0001
E-น้ำกรอง	-0.2317	0.9915
AB	+82.09	0.0704
AC	-120.42	0.0107
AD	-89.35	0.0504
AE	+18.24	0.6768
BC	+63.36	0.1564
BD	-108.51	0.0198
BE	+58.70	0.1877
CD	-8.23	0.8506
CE	+8.54	0.8450
DE	+84.68	0.0626
A^2	+85.06	0.0207
B^2	+85.58	0.0200
C^2	-3.97	0.9085
D^2	+79.83	0.0288
E^2	+31.57	0.3650

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าความแข็ง

Term	Coef	P
Constant	+275.47	< 0.0001
A-กัวร์กัม	+107.93	< 0.0001
B-แซนแทนกัม	-72.34	< 0.0001
C-คาราจีแนน	+33.66	0.0203
AB	-54.25	0.0005
AC	+15.00	0.3737
BC	-10.86	0.3763
A^2	+18.48	0.2915
B^2	+88.77	0.0001
C^2	-12.93	0.4732

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าการคืนตัว

Term	Coef	P
Constant	+1.00	< 0.0001
A-กัวร์กัม	+0.0034	0.1282
B-แซนแทนกัม	-0.0053	0.0067
C-คาราจีแนน	+0.0027	0.2583
AB	+0.0182	< 0.0001
AC	-0.0120	0.0011
BC	+0.0084	0.0015
A^2	-0.0115	0.0019
B^2	-0.0084	0.0131
C^2	-0.0059	0.0776

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าความสามารถในการยึดเกาะกันภายในอาหาร

Term	Coef	P
Constant	+0.6681	< 0.0001
A-กัวร์กัม	+0.0204	< 0.0001
B-แซนแทนกัม	-0.0161	< 0.0001
C-คาราจีแนน	+0.0099	0.0189
AB	-0.0016	0.6452
AC	-0.0364	< 0.0001
BC	+0.0160	0.0005
A^2	-0.0154	0.0077
B^2	+0.0047	0.3432
C^2	-0.0379	< 0.0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารกึ่งเหลว

Term	Coef	P
Constant	+176.27	< 0.0001
A-กัวร์กัม	+73.28	< 0.0001
B-แซนแทนกัม	-52.11	< 0.0001
C-คาราจีแนน	+16.95	0.0525
AB	-31.60	0.0009
AC	+5.48	0.5988
BC	+2.96	0.6955
A^2	+6.47	0.5480
B^2	+59.59	< 0.0001
C^2	-7.13	0.5253

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของการใช้กัวร์กัม แซนแทนกัม และคาราจีแนน ที่พิจารณาจากปริมาณของค่าพลังงานในการเคี้ยวอาหารแข็ง

Term	Coef	P
Constant	+184.12	< 0.0001
A-กัวร์กัม	+71.56	< 0.0001
B-แซนแทนกัม	-59.82	< 0.0001
C-คาราจีแนน	+22.35	0.0075
AB	-22.07	0.0051
AC	-4.44	0.6312
BC	-8.41	0.2232
A^2	-15.56	0.1190
B^2	+59.80	< 0.0001
C^2	-6.06	0.5432

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้