# การผลิตเต้าหู้โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบทรงกลม

# TOFU PRODUCTION USING SPHERIFICATION TECHNIQUE


**วรรณวิมล พุ่มโพธิ์**

**WANVIMON PUMPHO**


**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร**

**คณะอุตสาหกรรมเกษตร**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ. 2558**


**KMITL-2015-AI-M-053-230**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TOFU PRODUCTION USING SPHERIFICATION TECHNIQUE

**WANVIMON PUMPHO**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF**

**MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE**

**FACULTY OF AGRO-INDUSTRY**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2015**

**KMIT-2015-AI-M-053-230**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**COPYRIGHT 2014**

**AGRO-INDUSTRY**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABAN**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะอุตสาหกรรมเกษตร**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การผลิตเต้าหู้โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบทรงกลม

TOFU PRODUCTION USING SPHERIFICATION TECHNIQUE

**ชื่อนักศึกษา** นางสาววรรณวิมล พุ่มโพธิ์

**รหัสประจำตัว** 56608006

**ปริญญา** วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิทยาศาสตร์การอาหาร

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ผศ.ดร.ยุพร พืชกมุทร

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม** -

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ลายมือชื่อ |
|---|---|
| ผศ.ดร.ยุพร พืชกมุทร | |
| ผศ.ดร.โสรยา เกิดพิบูลย์ | |
| ดร.สิทธิพงศ์ นลินานนท์ | |
| รศ.เยาวลักษณ์ สุรพันธพิศิษฐ์ | |

วัน / เดือน/ ปีที่ 20 กรกฎาคม 2558 เวลา 09.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ ห้อง A 303 อาคารเจ้าคุณทหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตรรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ ปิ่นศิโรดม)

คณบดีคณะอุตสาหกรรมเกษตร

วันที่ 21 เดือน กค. พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การผลิตเต้าหู้โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบทรงกลม |
| **นักศึกษา** | นางสาววรรณวิมล พุ่มโพธิ์ |
| **รหัสนักศึกษา** | 56608006 |
| **ปริญญา** | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | วิทยาศาสตร์การอาหาร |
| **พ.ศ.** | 2558 |
| **อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์** | ผศ.ดร.ยุพร พืชกมุทร |

# บทคัดย่อ

เต้าหู้ทรงกลมเป็นการนำเทคนิคการขึ้นรูปแบบกลมมาใช้ในกระบวนการผลิต โดยอาศัยสารไฮโดรคอลลอยด์อัลจิเนตกับแคลเซียมคลอไรด์ ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีภายในโมเลกุลเกิดโครงสร้างของเจลที่มีลักษณะเป็นแมโครโมเลคูลาร์เจล งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ทรงกลม โดยเริ่มจากการศึกษาผลของระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็น พบว่าระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ ขนาด น้ำหนัก ค่าความสว่าง ($L^*$) และความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) และที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็น 12 ชั่วโมง ลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ทรงกลมเริ่มคงที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับเวลาที่ 14 และ 16 ชั่วโมง ดังนั้นระยะเวลาในการแช่น้ำเย็น 12 ชั่วโมงจึงเป็นระยะเวลาที่เลือกใช้ในการผลิตเต้าหู้ทรงกลม

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเต้าหู้ทรงกลมด้วยการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Responses Surface Methodology) ออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design โดยมี 2 ตัวแปร คือความเข้มข้นของอัลจิเนต ($X_1$: 1 - 2%) และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ ($X_2$: 1 - 2%) พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ทรงกลมอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อกำหนดให้ค่าความแข็งของเต้าหู้เป็นปัจจัยตอบสนองที่มีอิทธิพลมากที่สุด สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ทรงกลมคือ การใช้โซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.96 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 ผลของสมการทำนายพบว่าเต้าหู้ทรงกลมที่สภาวะนี้มีค่าความแข็ง 1140.27 (กรัม·แรง) และเมื่อทำการทดสอบสมการพบว่าค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม 1128.68±12.68 (กรัม·แรง) โดยมีค่าสัมประสิทธิการอธิบาย ($R^2$) เท่ากับ 0.95 จากนั้นนำเต้าหู้ที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมมาทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เต้าหู้ทรงกลมได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ 7.00 ด้านขนาด 6.63 เนื้อสัมผัส 7.57 กลิ่นรส 6.70 และความชอบโดยรวม 7.23 โดยคะแนนความชอบอยู่ในช่วงชอบปานกลาง ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลมโดยเก็บในกล่องพลาสติกโพลีเอทีลีน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ค่า pH มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ปริมาณกรดทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด จะได้ว่าไม่มีการเจริญของจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา 15 วัน สามารถสรุปได้ว่าเต้าหู้ทรงกลมที่เตรียมได้ สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ได้อย่างน้อย 15 วัน ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม พบว่าประกอบด้วยความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้า ร้อยละ 79.48, 12.47, 3.12, 4.43 และ 0.50 ตามลำดับ

จากการศึกษาโครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าโครงสร้างของเต้าหู้ทรงกลมเป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเกาะเกี่ยวกันของโมเลกุล (macromolecule gel) ทำให้ได้โครงสร้างในลักษณะที่เป็นเส้นสายร่างแห และเมื่อความเข้มข้นของอัลจิเนตเพิ่มขึ้น โครงสร้างจะแน่นขึ้น ช่องว่างภายในลดลง เป็นผลให้ค่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมผงบุกจะส่งผลให้ค่าความแข็งของเต้าหู้เพิ่มมากขึ้น โครงสร้างตาข่ายของเจลที่เติมผงบุกจะมีการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **Thesis** | Tofu production using spherification technique |
| **Student** | Miss Wanvimon Pumpho |
| **Student ID.** | 56608006 |
| **Program** | Food Science |
| **Degree** | Master of Science |
| **Year** | 2015 |
| **Thesis Advisor** | Asst. Prof. Dr. Yuporn Puechkamut |

## Abstract

The spherification technique has been widely used in food industry. The principle of this process relies on the gelation of alginate in the presence of calcium. In this study, the tofu sample was prepared by adding sodium alginate and submerging in the bath of calcium alginate in order to form a sphere. To determine the effect of soaking time on the gelation properties, soy milk added with 1.5% sodium alginate (w/v) dropped into 1.5% calcium chloride (w/v) was determine according to the physical properties (weight, size, L-value, a-value, b-value and hardness) for 16 hours. The results showed that increasing the soaking time contributed to increasing of weight, size, L-value, a-value and hardness of sample significantly. The condition at 12 hours was selected for optimization process. The optimum conditions for the preparation of tofu-ball were determined using response surface methodology (RSM). Response surface methodology was used for study on optimization condition of process tofu-ball by central composite design (CCD) of two factors. The two independent variables investigated in this experiment were concentration of alginate ($X_1$:1-2%) and concentration of calcium chloride ($X_2$:1-2%). The optimal production condition using for hardness for hardness were: concentration alginate was 1.97% and 1.59% for calcium chloride concentration. The predicted responses for these production conditions were 1140.27 (g·force). The tofu produced from optimal condition was further studied for sensory evaluation. The result shows that tofu ball had linking score of appearance, size, texture, flavor and overall content were 7.00, 6.63, 7.57, 6.70 and 7.23 respectively. The tofu ball prepared by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

using 1.97% sodium alginate and 1.59% calcium chloride solution were stored in polyethylene plastic box at 4$^{o}$C for 15 days. As the storage time increased, pH value of the sample tended to decrease with the increase of total acidity. However, total plate count was not detected. Therefor, tofu ball could be kept at least 15 days. Tofu-balls prepared from this experiment had moisture content, crude protein, fat, carbohydrate and ash content of 79.48±0.77%, 12.47±0.67%, 3.12±0.44%, 4.43±0.20% and 0.50±0.05% respectively.

According to study the microstructure with Scanning Electron Microstructure, the microstructures of tofu ball were revealed that good developed of network structure of macromolecular gel. If concentration of alginate increased, the network structure became more dense which refered to the increase in hardness. The result also showed that, the addition of glucomannan made tofu ball hardness increased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตากรุณาจาก ผศ.ดร.ยุพร พืชกมุทร ที่ได้ให้เกียรติเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำปรึกษา ความรู้ แนวคิด และข้อเสนอแนะในการดำเนินการ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่การทำวิทยานิพนธ์อย่างใกล้ชิด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.โสรยา เกิดพิบูลย์ และ ดร.สิทธิพงศ์ นลินานนท์ อาจารย์ประจำคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ รศ.เยาวลักษณ์ สุรพันธพิศิษฐ์ เป็นอย่างสูง ที่ให้เกียรติเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจทานแก้ไข ชี้แนะต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมถึงเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดการปฏิบัติงานครั้งนี้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ทั้งกำลังกาย และกำลังใจตลอดการปฏิบัติงานวิทยานิพนธ์เสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด รวมทั้งทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

วรรณวิมล พุ่มโพธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย…… | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ…….. | III |
| กิตติกรรมประกาศ……... | V |
| สารบัญ…… | VI |
| สารบัญตาราง……... | VIII |
| สารบัญภาพ…….. | IX |
| บทที่ 1 บทนำ……... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย…… | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย……... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย…… | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง…….…….... | 3 |
| 2.1 ถั่วเหลือง…… | 3 |
| 2.2 น้ำนมถั่วเหลือง…… | 9 |
| 2.3 เต้าหู้…….. | 10 |
| 2.4 การขึ้นรูปทรงกลม…….... | 13 |
| 2.5 สารไฮโดรคอลลอยด์……... | 15 |
| 2.6 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว…….. | 22 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……..……. | 25 |
| บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง…….…… | 27 |
| 3.1 วัสดุและอุปกรณ์……...……... | 27 |
| 3.2 สารเคมี…….……... | 28 |
| 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์……...……. | 29 |
| 3.4 วิธีการดำเนินการ……..…… | 30 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง…… 38
4.1 ผลการศึกษาผลของระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม 38
4.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์ที่มีผลต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม…… 42
4.3 ผลการศึกษาการยอมรับของเต้าหู้ทรงกลมโดยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส…….... 46
4.4 ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลม..…….…… 48
4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม..…… 49
4.6 ผลการศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม..…... 50
4.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม…… 52

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง……... 59
ข้อเสนอแนะ……..... 60

บรรณานุกรม…… 61

ภาคผนวก……..... 67
ก. การวิเคราะห์ทางกายภาพ……...… 68
ข. การวิเคราะห์ทางเคมี……...…..…… 70
ค. การตรวจวัดปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด..... 77
ง. การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างภายใน..... 79
จ. การเตรียมน้ำซุป และแบบทดสอบทางประสาทสัมผัส……..... 80
ฉ. การศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์..... 82

ประวัติผู้วิจัย……..……..…… 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | ปริมาณสารอาหารในถั่วเหลืองแห้ง 100 กรัม…… | 6 |
| 2.2 | ปริมาณแคลเซียมในอาหารถั่วเหลือง……..……..... | 7 |
| 2.3 | โปรตีนโกลบูลินที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนในถั่วเหลือง…….…… | 8 |
| 2.4 | มาตรฐานของค่า Desirability ที่สัมพันธ์กับระดับความพึงพอใจและคุณภาพของผลิตภัณฑ์……..……..…… | 24 |
| 3.1 | สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยวางแผนการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM)……..…… | 34 |
| 4.1 | ผลของระยะเวลาในการแช่ในน้ำเย็นต่อน้ำหนักและขนาดของเต้าหู้ทรงกลม…..….. | 38 |
| 4.2 | ผลของระยะเวลาในการแช่ในน้ำเย็นต่อค่าสีของเต้าหู้ทรงกลม……..…. | 39 |
| 4.3 | ผลของระยะเวลาในการแช่ในน้ำเย็นต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม…..……...… | 39 |
| 4.4 | การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design และค่าตอบสนองของปัจจัย……..……..…… | 42 |
| 4.5 | ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าสอบสนองปัจจัย…… | 43 |
| 4.6 | สมการที่ทำนายจากการใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนองของแต่ละปัจจัย……... | 44 |
| 4.7 | การทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการทำเต้าหู้ทรงกลม……....….... | 46 |
| 4.8 | ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต ($X_1$) และความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ ($X_2$) ที่ได้จากสมการทำนายเพื่อใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส…….. | 47 |
| 4.9 | ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส (9 - point hedonic scale) ของเต้าหู้ทรงกลม….. | 47 |
| 4.10 | ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ปริมาณกรดทั้งหมด และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาแตกต่างกัน……... | 48 |
| 4.11 | องค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม…….. | 49 |
| 4.12 | คุณลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ทรงกลมที่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์…….. | 51 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปทรงกลมแบบพื้นฐาน (ก) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบย้อนกลับ (ข)…….……...…….... | 14 |
| 2.2 | ลักษณะโครงสร้างของอัลจิเนต : มอโนเมอร์ของอัลจิเนต (ก) โครงรูปสายโซ่ (ข) และ การกระจายของบล็อก (ค)……...…….... | 18 |
| 2.3 | โครงสร้าง egg box ของเจลแคลเซียมอัลจิเนต…….…….... | 20 |
| 3.1 | ขั้นตอนการผลิตน้ำนมถั่วเหลือง…….…… | 31 |
| 4.1 | จุ่มน้ำนมถั่วเหลืองในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์…… | 41 |
| 4.2 | ตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่เตรียมได้……...…… | 41 |
| 4.3 | แผนภาพคอนทัวร์พล็อต (ก) และแผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง 3 มิติ (ข) แสดงผลของโซเดียมอัลจิเนต ($X_1$) และแคลเซียมคลอไรด์ ($X_2$) ต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม..... | 45 |
| 4.4 | ผลของการเติมผงบุกและแซนแทนกัมต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม (soft) ที่เตรียมจากการใช้โซเดียมอัลจิเนตร้อยละ1.36 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ1.00….. | 52 |
| 4.5 | โครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้หลอด ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า …….. | 54 |
| 4.6 | โครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (hard) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.97 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 ถ่ายด้วยกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า ……... | 55 |
| 4.7 | โครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (soft) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.36 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.00 ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า ……... | 56 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.8 โครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (soft) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.36 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.00 ร่วมกับการใช้ผงบุกถ่ายด้วยกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า..... 57

4.9 โครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (soft) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.36 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.00 ร่วมกับการใช้แซนแทนกัมถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า ..... 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มา

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีประโยชน์ในการประกอบอาหารมาก เนื่องจากมีโปรตีนในปริมาณสูง โดยโปรตีนจัดเป็นสารอาหารที่สำคัญต่อร่างกาย ช่วยทำให้ร่างกายเจริญเติบโต ซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ช่วยให้การทำงานของอวัยวะต่างๆ ในร่างกายเป็นไปอย่างปกติ ในทางการผลิตพบว่าถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนที่ลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ รวมไปถึงมีประโยชน์ในการป้องกันและรักษาโรคที่สำคัญในมนุษย์ (Liu, 1997) ถั่วเหลืองจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำนมถั่วเหลืองทั้งในรูปแบบนมผงและของเหลว แป้งถั่วเหลืองทั้งในรูปที่สกัดไขมันออกและแป้งที่ไม่สกัดไขมันออก โปรตีนเข้มข้น (อาณดี และประไพศรี, 2543) และอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่นิยมนำมาแปรรูป คือ เต้าหู้ โดยทั่วไปเต้าหู้จะได้จากการทำให้โปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองเสียสภาพด้วยความร้อน ก่อนเติมสารตกตะกอนลงไป ลักษณะของโปรตีนที่ได้เป็นลักษณะของแข็งกึ่งของเหลวที่เรียกว่า “ เจล” มีลักษณะเป็นร่างแหที่จับน้ำและสารต่างๆไว้ (น้ำทิพย์ และยุพร, 2544)

การขึ้นรูปแบบทรงกลม (Spherification) เริ่มขึ้นครั้งแรกในปี 2003 เป็นเทคนิคที่นำหลักการทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการทำอาหาร ซึ่งจะทำให้เกิดความรู้สึกแปลกใหม่ทั้งรูปลักษณ์และเนื้อสัมผัสส่งผลให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ การขึ้นรูปแบบทรงกลมเป็นกระบวนการห่อหุ้มของเหลวให้เป็นทรงกลม โดยการทำเป็นเม็ดเจลที่มีขนาดเล็กๆ คล้าย ไข่ปลา หรือทรงกลมขนาดใหญ่ที่มีลักษณะคล้ายไข่มุก (Myhrovold และคณะ, 2011) โดยอาศัยการเกิดเจลของสารไฮโดร-คอลลอยด์อัลจิเนต ในสภาพที่มีเกลือแคลเซียม เกิดเป็นแคลเซียมอัลจิเนต เจลที่ได้มีความกรอบและแน่น สามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถเกิดเจลที่สมบูรณ์ได้มากขึ้นเมื่อแช่น้ำแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิเย็น (Nussinovitch, 1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาการผลิตเต้าหู้โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบทรงกลมเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ โดยใช้สารไฮโดรคอลลอยด์อัลจิเนต ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารไฮโดรคอลลอยด์ และปริมาณของแคลเซียมที่ใช้ในการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม ผลของการแช่ในน้ำเย็นที่มีต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ทรงกลม รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีและอายุการเก็บรักษา การใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบทรงกลมนี้ทำให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์เต้าหู้ในรูปแบบใหม่ ที่มีความแตกต่างทั้งลักษณะภายนอกและภายใน สามารถเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปมาจากถั่วเหลือง เพิ่มช่องทางการตลาดเป็นผลให้มีการบริโภคผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองเพิ่มมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการแช่ในน้ำต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม
2. เพื่อศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ที่มีผลต่อคุณภาพของเต้าหู้ทรงกลม
3. เพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลม
4. เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม
5. เพื่อศึกษาผลของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของเต้าหู้ทรงกลม

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะครอบคลุมเนื้อหาที่สำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม ทั้งสภาวะการเตรียม ปริมาณของอัลจิเนต และแคลเซียมที่ใช้ ตลอดจนองค์ประกอบทางเคมี และอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลมที่ผลิตขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ถั่วเหลือง

ถั่วเหลือง (soybean) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Glycine max L. Merrill* มีถิ่นกำเนิดในเขตอบอุ่น เป็นพืชพื้นเมืองของเอเชียตะวันออก (สมชาย, 2535) แต่ปัจจุบันมีการปลูกถั่วเหลืองกันแพร่หลายทั้งในเขตร้อน และเขตอบอุ่น ลักษณะของเมล็ดถั่วเหลืองมีรูปร่างเกือบจะเป็นทรงกลม น้ำหนักของเมล็ดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 120 - 180 มิลลิกรัม โดยองค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลืองจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สายพันธุ์ ฤดูกาลเพาะปลูก สถานที่เพาะปลูก และสภาพอากาศ

ถั่วเหลืองเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลก และของประเทศไทย สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นอาหารของมนุษย์ทั้งในรูปของการบริโภคโดยตรงหรือแปรรูปเป็นอาหารต่างๆ หรือใช้ในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมัน และอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ (อภิพรรณ, 2546)

ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 (Chiangmai 60 : CM.60) เป็นพันธุ์ที่ได้จากการผสมพันธุ์ระหว่างพันธุ์ Williams ซึ่งมีลำต้นแข็งแรง จำนวนฝักต่อต้นมาก กับพันธุ์ สจ.4 ซึ่งเป็นพันธุ์รับรองที่ให้ผลผลิตสูง ทนทานต่อโรคราสนิม ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ลำต้นจะมีลักษณะไม่ทอดยอด โคนต้นอ่อนสีเขียวขนที่ฝักสีน้ำตาล ต้นมีการแตกกิ่งน้อย สูงประมาณ 60 เซนติเมตร ใบสีเขียวเข้ม ใบกว้าง และหนา ดอกสีขาว ออกดอกเมื่ออายุประมาณ 25 วัน เก็บเกี่ยวเมื่ออายุประมาณ 97 วัน ฝักเมื่อแก่จัด มีสีน้ำตาลเข้ม แตกยาก เมล็ดมีลักษณะกลม สีเหลือง ผิวเมล็ดเป็นผิวมัน ขั้วเมล็ดมีสีน้ำตาล ขนาดเมล็ดปานกลาง แต่มีขนาดใหญ่กว่าพันธุ์ สจ. ต่างๆ เล็กน้อย น้ำหนัก 100 เมล็ด 15.5 กรัม โดยมีฤดูปลูกที่เหมาะสมคือ ฤดูฝน เดือนพฤษภาคม และฤดูแล้ง เดือนธันวาคมถึงกลางเดือนมกราคม (ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่, 2530)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 คุณค่าทางอาหารของถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของมนุษย์ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ามีคุณค่าทางโภชนาการสูง ถั่วเหลืองประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 30 - 50 ไขมันร้อยละ 13 - 24 ซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีใยอาหาร รวมทั้งแร่ธาตุชนิดต่างๆ เช่น แคลเซียม เหล็ก และวิตามินบี 1 (อาณดี และประไพศรี, 2543) คุณค่าทางโภชนาการของถั่วเหลืองดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.1.1 โปรตีน

ถั่วเหลืองมีโปรตีนมากกว่าสัตว์ต่างๆ ถึง 2 เท่า แต่คุณภาพของโปรตีนถั่วเหลืองไม่เท่ากับโปรตีนจากสัตว์ ถึงแม้ว่าถั่วเหลืองจะมีกรดอะมิโนที่จำเป็นครบทั้ง 8 ชนิด แต่ก็มีกรดอะมิโนจำเป็นบางตัวไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกายในแต่ละวัน อีกทั้งกระบวนการย่อย และการดูดซึมไปใช้ไม่สามารถเทียบกับโปรตีนจากสัตว์ได้ เพราะฉะนั้นถ้าจะบริโภคโปรตีนจากถั่วเหลืองให้ได้คุณค่าครบถ้วน ก็ควรจะเสริมด้วยพืชชนิดอื่นเข้าไปด้วย เช่น ข้าว งา ข้าวกล้อง หรือข้าวโพด

2.1.1.2 ไขมัน

ถั่วเหลืองมีไขมันน้อยกว่าเนื้อสัตว์ทุกชนิด แต่มีปริมาณของไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (กรดลิโนเลอิก ลิโนเลนิก และโอเลอิก) สูงกว่าธัญพืช เนื้อสัตว์ และถั่วอื่นๆ กรดลิโนเลอิกมีหน้าที่สำคัญคือ ให้ความสดชื่นสมบูรณ์แก่ผิวหนัง ช่วยลดระดับคอลเรสเตอรอลในเลือด และช่วยในการเจริญเติบโตของเด็กทารก

ไขมันในถั่วเหลืองประกอบด้วยสารที่สำคัญ คือ ฟอสโฟลิปิด ซึ่งเป็นสารที่คล้ายไขมันมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ โดยไนโตรเจนอยู่ในรูปของกรดโฟลิกและฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของเลซิติน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 แร่ธาตุ

ในถั่วเหลืองมีแร่ธาตุที่สำคัญ และจำเป็นสำหรับร่างกายไม่น้อยกว่าเนื้อสัตว์ เช่น โพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม กำมะถัน หรือเหล็ก แต่ข้อเสีย คือ ถั่วเหลืองจะมีสารพวกไฟติน (phytin) เป็นส่วนประกอบในปริมาณสูง ซึ่งถ้ารวมกับแร่ธาตุบางชนิด เช่น แคลเซียม เหล็ก และสังกะสี ก็จะกลายเป็นเกลือไฟเตท (phytate) ทำให้ร่างกายได้รับประโยชน์จากแร่ธาตุเหล่านี้ลดลงบ้างเล็กน้อย

ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองหลายชนิดมีปริมาณแคลเซียมสูง ซึ่งการได้รับอาหารที่มีแคลเซียมสูงเป็นประจำ และมีการออกกำลังกายสม่ำเสมอ สามารถช่วยชะลอการสลายของกระดูก และยังทำให้ความหนาแน่นของกระดูกเพิ่มขึ้น (อาณดี และประไพศรี, 2543) ปริมาณแคลเซียมในผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองแสดงในตารางที่ 2.2

2.1.1.4 วิตามิน

ถั่วเหลืองมีวิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และไนอาซินอยู่มาก แต่น้อยกว่าเนื้อสัตว์ ถ้าเปรียบเทียบน้ำนมถั่วเหลือง (น้ำเต้าหู้) น้ำนมวัว และน้ำนมคนในปริมาณ 100 กรัม พบว่ามีโปรตีน วิตามินบี 1 และไนอาซิน ใกล้เคียงกับน้ำนมวัว แต่มีวิตามินเอ และวิตามินบี 2 ต่ำกว่ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.1** ปริมาณสารอาหารในถั่วเหลืองแห้ง 100 กรัม

| สารอาหาร | ปริมาณ | หน่วย |
|---|---|---|
| โปรตีน | 34 - 40 | กรัม |
| ไขมัน | 18.7 | กรัม |
| คาร์โบไฮเดรท | 26.7 | กรัม |
| เหล็ก | 10.0 | มิลลิกรัม |
| แคลเซียม | 245 | มิลลิกรัม |
| ฟอสฟอรัส | 500 | มิลลิกรัม |
| วิตามินเอ | 1751 | หน่วยสากล |
| วิตามินบี 1 | 0.73 | มิลลิกรัม |
| วิตามินบี 2 | 0.31 | มิลลิกรัม |
| วิตามินบี 6 | 0.26 | มิลลิกรัม |
| วิตามินบี 12 | 1.5 | ไมโครกรัม |
| ไนอาซิน | 1.5 | ไมโครกรัม |
| วิตามินซี | 1.42 | ไมโครกรัม |
| วิตามินดี | 176 | หน่วยสากล |
| วิตามินอี | 10.0 | หน่วยสากล |
| เลซิทิน | 2.11 | มิลลิกรัม |

**ที่มา** : (กองโภชนาการ, 2535)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.2** ปริมาณแคลเซียมในอาหารถั่วเหลือง

| อาหารถั่วเหลือง | แคลเซียม (มิลลิกรัม) |
|---|---|
| soybean, mature (1/2 cup) | 80 |
| soy bean, green (1/2 cup) | 30 |
| tempeh (1/2 cup) | 77 |
| tofu (1/2 cup) | 130* |
| textured soy bean (1/2 cup) | 85 |
| soy milk (1 cup) | 82 |
| fortified soymilk (1 cup) | 250-300 |

หมายเหตุ * ขึ้นอยู่กับวิธีการทำเต้าหู้ว่าใช้เกลือชนิดใด เต้าหู้ ½ ถ้วยตวง อาจมีแคลเซียม 120 - 750 มก.

**ที่มา** : (กองโภชนาการ, 2547)

2.1.3 องค์ประกอบของโปรตีนถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มพืชตระกูลถั่วด้วยกัน โดยมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยถึงร้อยละ 40.4 ของน้ำหนักแห้ง ดังนั้นถั่วเหลืองจึงจัดเป็นแหล่งสำคัญของโปรตีนจากพืช โปรตีนถั่วเหลืองประกอบไปด้วยโครงสร้างที่เป็น heterogeneous complex quaternary ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โปรตีนส่วนใหญ่เป็นโกลบูลิน (globulin) ซึ่งเป็นโปรตีนสะสมในเมล็ด สามารถจำแนกโปรตีนโกลบูลินตามความสามารถการตกตะกอนได้ 4 ชนิดโดยมีปริมาณแตกต่างกัน ดังตาราง 2.3 ซึ่งหน่วย S ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตกตะกอน (sedimentation coefficient) ใช้แทนอัตราเร็วในการตกตะกอนของโปรตีนที่แยกโดยวิธีอัลทราเซนทริฟิวเกชัน (ultracentrifugation) เป็นค่าที่ขึ้นกับขนาดรูปร่าง และประจุลบของโมเลกุลโปรตีน โดยสัมประสิทธิ์การตกตะกอนจะสูงขึ้นเมื่อโปรตีนมีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.3** โปรตีนโกลบูลินที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนในถั่วเหลือง

| ชนิดของโปรตีน | ปริมาณ (ร้อยละ) | โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบ | น้ำหนักโมเลกุล (kDa.) |
|---|---|---|---|
| 2S ($\alpha$ - conglycinin) | 22 | Trypsin inhibitors | 8.0 - 21.5 |
| | | Cytochrome | 120 |
| 7S ($\beta$ - and $\gamma$ - conglycinin) | 37 | Hemagglutinin | 110 |
| | | Lipoxygenase | 102 |
| | | $\beta$ - amylase | 617 |
| | | 7S - globulin | 180 - 210 |
| 11S (glycinin) | 31 | 11S - globulin | 350 |
| 15S | 11 | ยังไม่มีชื่อ | 600 |

**ที่มา :** Norman (1978)

$\beta$ - conglycinin (7S - globulin) และ glycine (11S - globulin) พบเป็นองค์ประกอบรวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ของโปรตีนทั้งหมดในถั่วเหลือง และมีความสำคัญต่อสมบัติการใช้ประโยชน์ของโปรตีน (functional properties) ซึ่งสมบัติการใช้ประโยชน์ของโปรตีน หมายถึงสมบัติทางเคมีกายภาพที่มีผลต่อพฤติกรรมของโปรตีนในระบบอาหารในระหว่างขั้นตอนการเตรียมการแปรรูป การเก็บรักษาและการบริโภค ได้แก่ การละลาย การเกิดเจล การเกิดอิมัลชัน และการเกิดฟอง เป็นต้น

glycinin (11S globulin) เป็นโปรตีนชนิดโกลบูลิน มีน้ำหนักโมเลกุล 300 - 380 kDa. ประกอบด้วย 12 sununit ซึ่งมี acidic polypeptide และ basic polypeptide อย่างละ 6 subunit รวมตัวกันโดยอาศัยพันธะไดซัลไฟด์ และพันธะไฮโดรเจน มีจุดละลายต่ำสุดที่ pH 4.64 มีความสำคัญต่อคุณสมบัติการเกิดเจลของโปรตีนถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

β - conglycinin (7S globulin) มีน้ำหนักโมเลกุล 150 - 200 kDa. ประกอบด้วย 3 subunit คือ α′, α และ β subunit แต่ละ subunit มีมวลโมเลกุล 72 68 และ 52 kDa. ตามลำดับ จัดเรียงได้ 6 ไอโซ-เมอร์ มีคุณสมบัติเป็น glycoprotein สามารถเกิดพันธะกับคาร์โบไฮเดรตที่ N - terminal ซึ่งเป็นกรดอะมิโนแอสพาร์ติก มีจุดละลายต่ำสุดที่ pH 5.18 มีความสำคัญต่อการเกิดอิมัลชันของโปรตีนถั่วเหลือง (Thanh และ Shibasaki, 1978)

## 2.2 น้ำนมถั่วเหลือง

น้ำนมถั่วเหลือง (soy milk) หรือน้ำเต้าหู้เป็นผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองที่รู้จักกันดี มีคุณค่าทางอาหารสูง และมีราคาถูกนิยมบริโภคกันมาเป็นเวลาช้านาน การผลิตมีหลายระดับ ตั้งแต่ระดับครัวเรือนจนถึงการผลิตระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ นอกจากนี้น้ำนมถั่วเหลืองยังสามารถนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นได้อีก เช่น เต้าฮวย ฟองเต้าหู้ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จัดว่าเป็นอาหารที่มีโปรตีนสูง และบางชนิดยังมีไขมันสูงอีกด้วย จึงมักนิยมนำผลิตภัณฑ์น้ำนมถั่วเหลืองดังกล่าวไปใช้ในการส่งเสริมภาวะโภชนาการของประชาชน

จากนิยามของน้ำนมถั่วเหลือง น้ำนมถั่วเหลือง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสกัดได้จากเมล็ดถั่วเหลืองที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Glycine max* L. Merrill หรือแป้งถั่วเหลือง ด้วยน้ำ และอาจผสมนมและ/หรือสารที่ให้คุณค่าทางอาหาร หรืออาจปรุงแต่งสีกลิ่นและรสด้วยหรือไม่ก็ได้ แล้วนำมาผ่านกรรมวิธีฆ่าเชื้อด้วยความร้อนเพื่อให้ปลอดภัยแก่ผู้บริโภค (มอก. 1018 - 2533)

ลักษณะทั่วไปของน้ำนมถั่วเหลืองจะมีลักษณะเป็นของเหลวข่น ข้นพอเหมาะ หากมีการเติมส่วนประกอบอื่นๆ อาจทำให้เกิดการตกตะกอน เมื่อวางทิ้งไว้ต้องมีสี กลิ่น และรสชาติที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ ปราศจากกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอม เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์ ห้ามใช้วัตถุกันเสียทุกชนิด หากมีการใช้สีให้ใช้ได้ตามชนิดและปริมาณที่กฎหมายกำหนด การบรรจุให้บรรจุน้ำนมถั่วเหลืองลงในภาชนะบรรจุที่สะอาด แห้ง ปิดสนิท และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกภายนอกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ประเภทและชนิดของน้ำนมถั่วเหลือง (มอก. 1018 - 2533)

2.2.1.1 น้ำนมถั่วเหลืองแบ่งตามลักษณะของกรรมวิธีออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1.1.1 น้ำนมถั่วเหลืองสเตอริไลส์ คือ น้ำนมถั่วเหลืองที่นำมาบรรจุในภาชนะปิดสนิท แล้วผ่านกรรมวิธีฆ่าเชื้อด้วยความร้อนไม่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาที่เหมาะสม

2.2.1.1.2 น้ำนมถั่วเหลืองยูเอชที คือ น้ำนมถั่วเหลืองที่ผ่านกรรมวิธีฆ่าเชื้อด้วยความร้อนไม่ต่ำกว่า 133 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาที่เหมาะสม แล้วนำมาบรรจุในภาชนะปิดสนิทในสภาวะที่ปลอดเชื้อ

2.2.1.2 น้ำนมถั่วเหลืองแบ่งตามองค์ประกอบ (Liu, 1997)

2.2.1.2.1 น้ำนมถั่วเหลืองชนิดเข้มข้น (rich)

2.2.1.2.2 น้ำนมถั่วเหลืองชนิดคล้ายนมโค (dailylike)

2.2.1.2.3 น้ำนมถั่วเหลืองที่ผลิตในทางการค้า (economy)

## 2.3 เต้าหู้

เต้าหู้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการบริโภคมานานในประเทศแถบเอเชีย และเป็นที่นิยมมากขึ้นในแถบตะวันตก (Obatolu, 2008) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเจลสามารถที่จะอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้สูง มีสีครีมขาว อ่อนนุ่ม และย่อยง่าย มีปริมาณโปรตีนสูง (ร้อยละ 50 ต่อน้ำหนักแห้ง) สามารถใช้แทนเนื้อสัตว์ต่างๆได้ สามารถผลิตได้โดยนำเอาถั่วเหลืองมาล้างน้ำให้สะอาด แช่น้ำ จากนั้นบดด้วยน้ำจะได้ถั่วเหลืองที่มีลักษณะเหลวข้น นำไปให้ความร้อน จะได้ของเหลวที่มีลักษณะคล้ายน้ำนม ซึ่งเรียกว่า น้ำนมถั่วเหลือง หลังจากที่ได้น้ำนมถั่วเหลืองแล้วจะทำการเติมสารตกตะกอนโปรตีนลงไปน้ำนมถั่วเหลืองจะเกิดการฟอร์มตัวของเคิร์ด (curd) เกิดเป็นเต้าหู้ ในการผลิตเต้าหู้สภาวะต่างๆมีผลต่อคุณภาพ และผลผลิตของเต้าหู้ เช่น อัตราส่วนระหว่างถั่วเหลืองกับน้ำ อุณหภูมิ ชนิด และความเข้มข้นของสารที่ช่วยให้แข็งตัว รวมไปถึงพันธุ์ของถั่วเหลือง (Sun และ Breene, 1991) ซึ่งถั่วเหลืองแต่ละพันธุ์จะให้ปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกัน โดยเต้าหู้ที่มีคุณภาพดีจะต้องมีลักษณะเนื้อสัมผัสนิ่ม เรียบ แน่น เกาะติดกัน ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จะมีผลต่อคุณภาพ และการยอมรับของผู้บริโภค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เต้าหู้สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ตามปริมาณน้ำที่ถูกกำจัดออก และคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ คือ ชนิดอ่อน (soft หรือ silken) ชนิดแข็ง (firm) (จันทร และคณะ, 2546)

เต้าหู้อ่อน (soft หรือ silken หรือ kinugoshi - tofu) ทำจากน้ำนมถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 10 - 12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม แต่ยังคงมีความแข็งพอที่จะคงรูปอยู่ได้เมื่อทำการตัด มีความชื้นประมาณร้อยละ 88 - 90 โดยในการผลิตเต้าหู้อ่อนสารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ กลูโคโนเดลต้าแลคโตน หรือสารละลายแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ขั้นตอนในการผลิตเต้าหู้อ่อนจะผสมสารตกตะกอนกับน้ำนมถั่วเหลืองให้เข้ากัน บรรจุลงภาชนะบรรจุและปิดผนึก หลังจากนั้นแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 - 95 องศาเซลเซียส ประมาณ 50 นาที แล้วนำไปแช่เย็นเพื่อเก็บรักษา เต้าหู้ชนิดนี้จะไม่มีการแยกเอาเวย์ออกจากเคิร์ด ทำให้มีปริมาณสารอาหารอยู่ในเต้าหู้อ่อนสูง และมีลักษณะเนื้อสัมผัสนิ่ม

เต้าหู้ชนิดแข็ง เป็นเต้าหู้ที่ผ่านการบีบอัดเคิร์ด ขั้นตอนในการผลิตจะเริ่มต้นจากการกวนสารตกตะกอนในน้ำนมถั่วเหลืองขณะร้อนอย่างรวดเร็ว และทั่วถึง จากนั้นทำให้เคิร์ดที่เกิดขึ้นแตก และบีบอัดเคิร์ดนั้น แรงกดที่ใช้ในการบีบอัดจะมีผลต่อลักษณะของเต้าหู้ โดยแรงกดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความแน่นเนื้อของเต้าหู้ ซึ่งเต้าหู้ที่มีความแน่นเนื้อสูงจะมีปริมาณน้ำต่ำ มีลักษณะคล้ายเนื้อหรือเนยแข็ง สามารถคงรูปอยู่ได้ในขณะให้ความร้อน ดังนั้นเต้าหู้ที่ผ่านการบีบอัดจึงเป็นเต้าหู้ที่เหมาะสำหรับการทอด

กระบวนการผลิตเต้าหู้จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมน้ำนมถั่วเหลืองสกัดการตกตะกอน และการกดทับให้เป็นก้อน ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีผลต่อลักษณะและคุณภาพของเต้าหู้ที่ผลิตได้ โดยกระบวนการผลิตเต้าหู้มีรายละเอียดดังนี้

(1) การเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง

นำถั่วเหลืองมาทำการแยกเปลือกออก ล้างทำความสะอาด ทำการแช่ถั่วเหลืองให้นิ่มเพื่อช่วยให้การสกัดของแข็งที่ละลายได้ และโปรตีนถั่วเหลืองออกมาได้มากที่สุด แต่การแช่ถั่วเหลืองนานเกินไปจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ โดยพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่ถั่วเหลืองที่ทำให้สามารถสกัดปริมาณของแข็งออกมามากที่สุด คือ 80 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และ 5 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการแช่มาทำการบดกับน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ (น้ำทิพย์ และยุพร, 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การให้ความร้อนต่อน้ำนมถั่วเหลืองที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิในการทำให้ Glycinin เสียสภาพจะสูงกว่าอุณหภูมิในการทำให้ β - conglycinin เสียสภาพ Glycinin และ β - conglycinin เป็นกลุ่มของโปรตีนที่พบมากในถั่วเหลือง ซึ่งมีผลต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ และการให้ความร้อน 2 ขั้นตอน (75 องศาเซลเซียส 5 นาที และให้ความร้อนต่อจนมีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที) จะส่งผลให้ความหนืดของนมถั่วเหลือง และค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น และส่งผลให้อัตราการเกิดการแยกน้ำลดลง เมื่อมีการวัดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเต้าหู้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ พบว่า ในการให้ความร้อนสองขั้นตอนจะให้ลักษณะของเต้าหู้ที่แน่น มีความละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน (Liu และคณะ, 2004)

(2) การตกตะกอนโปรตีน

นำน้ำนมถั่วเหลืองที่เตรียมไว้มาทำการตกตะกอนโปรตีนโดยใช้สารที่ทำปฏิกิริยากับโปรตีน ซึ่งจะทำให้เกิดการจับกันเป็นก้อนด้วยพันธะเคมีในโมเลกุลโปรตีน โดยถ้าน้ำนมถั่วเหลืองมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่สูงจะมีผลทำให้ได้เต้าหู้ที่มีเนื้อสัมผัสแข็ง (Cai และChong, 1997) ชนิด และความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่ใช้มีผลต่อคุณภาพของเต้าหู้แตกต่างกันไป รวมไปถึงกรรมวิธีการผลิต และสภาวะที่ใช้ในการผลิต

(3) การกดทับให้เป็นก้อน

เป็นกระบวนการที่ทำให้ตะกอนโปรตีนจับกันเป็นก้อนแข็ง ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงและมีรูปร่างตามต้องการ โดยทำการตักตะกอนโปรตีนใส่ลงในแบบพิมพ์ แล้วกดทับด้วยตุ้มน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักและระยะเวลาที่ใช้ในการกดทับขึ้นกับลักษณะและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

กลไกการเกิดเจลของโปรตีนจากถั่วเหลืองโดยใช้สารตกตะกอนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลของโปรตีนถั่วเหลืองได้รับความร้อนทำให้เสียสภาพธรรมชาติ (denaturation) เป็นผลให้โมเลกุลที่เคยอัดแน่น (compact) เกิดการคลายตัวออก เป็นผลให้ส่วนของโปรตีนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีโอกาสที่จะกระจายตัวออกมาด้านนอกโมเลกุลเกิดการสร้าง Hydrophobic bonding ระหว่างโมเลกุลของโปรตีน ขั้นตอนที่สอง โมเลกุลของโปรตีนที่เสียสภาพ (denatured protein) มีประจุรวมเป็นลบ เมื่อเติมสารตกตะกอนซึ่งมีประจุบวกลงไป จะทำให้โมเลกุลของโปรตีนมีสภาพเป็นกลาง (neutral) เกิดการเหนี่ยวนำเป็นผลทำให้มีการสร้าง Hydrophobic bonding ระหว่างโมเลกุลที่เป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการฟอร์มตัวของ aggregate เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห (network structure) สามารถกักเก็บน้ำเวย์เอาไว้ได้ (น้ำทิพย์, 2541)

## 2.4 การขึ้นรูปทรงกลม

การขึ้นรูปแบบทรงกลมเป็นหนึ่งเทคนิคของโมเลคิวลาร์แกสโตรมี (molecular gastronomy) ซึ่งเป็นการนำหลักการทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการประกอบอาหารเพื่อให้เกิดเป็นอาหารรูปแบบใหม่ (Navarro และคณะ, 2012) เทคนิคการขึ้นรูปทรงกลม คือ กระบวนการห่อหุ้มของเหลวด้วยเจลให้เป็นทรงกลม เริ่มขึ้นครั้งแรกในปี 2003 จากร้านอาหารเอลบูยี ประเทศสเปน โดยพ่อครัวชาวสเปนชื่อ เฟอราน อาเดรีย จนกลายเป็นต้นแบบให้กับพ่อครัวปัจจุบัน ซึ่งการขึ้นรูปแบบทรงกลมมีพื้นฐานจากการใช้สมบัติของสารไฮโดรคอลลอยด์ สามารถทำได้โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตละลายในอาหารเหลว จากนั้นหยดส่วนผสมอาหารเหลวลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือแคลเซียมแลคเตท เกิดเป็นแคลเซียมอัลจิเนต ซึ่งมีลักษณะเป็นเจลทรงกลมขนาดเล็กๆ ลักษณะทรงกลมที่ได้จะมีความยืดหยุ่น และมีเยื่อหุ้มบางๆรอบๆของอาหารเหลว มีรูปร่าง และเนื้อสัมผัสคล้ายไข่ปลาคาเวียร์ หรือทรงกลมขนาดใหญ่ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายลูกแก้ว การขึ้นรูปทรงกลมสามารถทำให้มีขนาดทรงกลมแตกต่างกันได้ และมีชื่อเรียกแตกต่างกัน ได้แก่ คาเวียร์ (caviar)ไข่ (egg) น็อคซี่ (gnocchi) และราวิโอลี่ (ravioli) เป็นต้น (Myhrovold และคณะ, 2011) การขึ้นรูปทรงกลม มี 2 วิธี ได้แก่

2.4.1 การขึ้นรูปทรงกลมแบบพื้นฐาน (basic spherification)

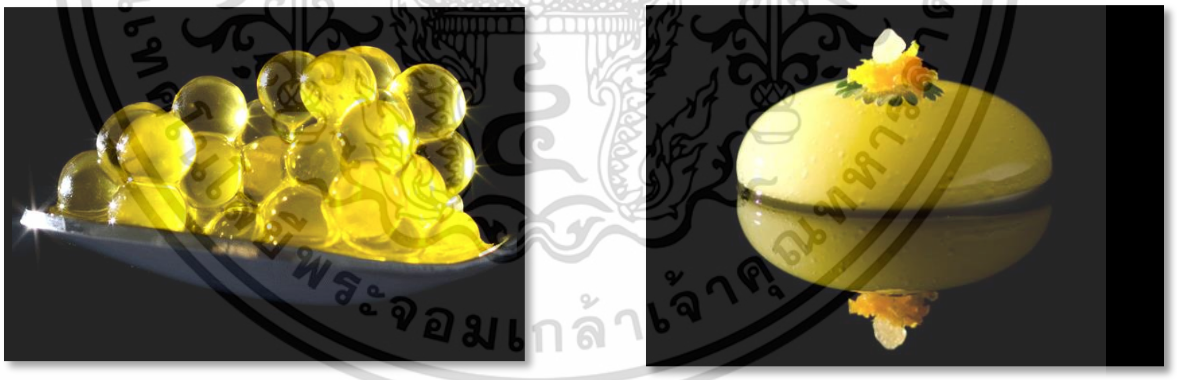
การขึ้นรูปทรงกลมแบบพื้นฐาน เป็นเทคนิคที่ต้องจุ่มของเหลวหรืออาหารเหลวที่มีโซเดียมอัลจิเนตอยู่ลงในสารละลายแคลเซียม กระบวนการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนตเป็นกระบวนการที่เกิดจากการแพร่ของไอออนแคลเซียมเข้าภายในทรงกลม เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายภายในโมเลกุล (รุ่งนภา และMiyawaki, 2541) เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ง่าย เยื่อหุ้มของเซลล์ของทรงกลมที่ได้จะมีความเปราะบาง และเมื่อรับประทานทำให้ทรงกลมแตกได้ง่าย ภาพที่ 2.1 (ก) ข้อเสียของการขึ้นรูปทรงกลมแบบพื้นฐาน คือ การเกิดเจลภายในทรงกลมสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องแม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะนำเม็ดเจลออกจากสารละลายแคลเซียม หรือล้างแล้วก็ตาม ทำให้ต้องเสิร์ฟผลิตภัณฑ์ที่ได้อย่างเร็ว หากไม่ต้องการให้ทรงกลมมีลักษณะเป็นเจลทั้งเม็ด อีกปัญหา คือ การเกิดเจลของทรงกลมไม่สามารถเกิดเจลได้ที่สภาวะความเป็นกรดสูง(pH<5) แต่สามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการเติมโซเดียมซิเตรทในอาหารเหลวเพื่อลดระดับความเป็นกรดลง

2.4.2 การขึ้นรูปทรงกลมแบบย้อนกลับ (reverse spherification)

การขึ้นรูปทรงกลมแบบย้อนกลับ เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้โดยการจุ่มของเหลวที่มีส่วนผสมของแคลเซียมกลูโคเนต และแคลเซียมแลคเตทในสารละลายโซเดียมอัลจิเนต ภาพที่ 2.1 (ข) การขึ้นรูปทรงกลมแบบย้อนกลับ มีความเอนกประสงค์กว่าวิธีการขึ้นรูปทรงกลมแบบพื้นฐาน สามารถขึ้นรูปอาหารเหลวได้หลายชนิด โดยเฉพาะอาหารที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมสูง และอาหารที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์ เยื่อหุ้มเซลล์ของทรงกลมที่ได้มีความหนามากกว่าวิธีแรก และสามารถหยุดการเกิดเจลได้เมื่อนำมาล้างน้ำ วิธีนี้สามารถนำไปใช้ได้หลายแบบ เช่น การทำไส้เค้กไข่ และน้ำมันมะกอก เป็นต้น



(ก) (ข)

**ภาพที่ 2.1** ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปทรงกลมแบบพื้นฐาน (ก)
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบย้อนกลับ (ข)

**ที่มา :** Myhrovold และคณะ, 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.5 สารไฮโดรคอลลอยด์** (ปาริฉัตร, 2545)

ไฮโดรคอลลอยด์หรือไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์ หมายถึง สารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์กัม (polysaccharide gums) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายยาว และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไฮโดรคอลลอยด์ทุกชนิดสามารถให้สารละลายที่มีความหนืด แต่มีไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดที่สามารถเกิดเจลได้ ได้แก่ อะการ์ อัลจิเนต คาร์ราจีแนน เพกทิน และเจลาติน การเกิดเจลของไฮโดรคอลลอยด์จำเป็นต้องใช้ปริมาณสารที่มากกว่าความเข้มข้นต่ำสุดวิกฤต (critical minimum concentration) ซึ่งแตกต่างกันไปในไฮโดร-คอลลอยด์แต่ละชนิด อย่างเช่น อะกาโรส (agarose) สามารถเกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำสุดประมาณร้อยละ 0.2 แต่ถ้าเป็น acid - thinned starch ก็ต้องใช้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 15 จึงจะเกิดเป็นเจลได้ โดยทั่วไปแล้วกัมหรือไฮโดรคอลลอยด์ส่วนใหญ่จะเกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 1 เจลอาจมีความใส หรือขุ่น และมีเนื้อสัมผัสแตกต่างกันไป บางชนิดให้เจลที่มีลักษณะแข็งแต่เปราะ (brittle) เช่น อะการ์ และแคปป้า-คาร์ราจีแนน ในขณะที่บางชนิดให้เจลที่มีลักษณะยืดหยุ่น เช่น ไอโอต้า-คาร์ราจีแนน และเจลาติน เป็นต้น

ไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดให้เจลชนิดผันกลับได้ด้วยความร้อน (thermoreversible gel) ซึ่งการเกิดเจลของไฮโดรคอลลอยด์ และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็สามารถเกิดเจลได้ (การเกิดเจลเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำให้เย็น หรือการให้ความร้อน) ไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดจะให้เจลชนิดไม่ผันกลับด้วยความร้อน (non - thermoreversible or thermoirreversible gel) ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้สารหรือภาวะอื่นๆร่วมด้วย เช่น ใช้แคลเซียมอิออน หรือโพแตสเซียมอิออน หรือใช้น้ำตาล และภาวะที่มีความเป็นกรดสูง เป็นต้น การเกิดเจลชนิดไม่ผันกลับด้วยความร้อนเป็นผลมาจากการเชื่อมข้าม (cross linking) ของโมเลกุลภายในโครงสร้างด้วยไดวาเลนท์แคท อิออน (divalent cation) เช่น แคลเซียมอิออน ไฮโดรคอลลอยด์บางชนิด เช่น กัมทรากาแคนธ์ที่ความเข้มข้นสูงๆจะให้เพสต์ข้นหนืดมาก (thick heavy paste) ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า เจล แต่ไม่ใช่เจลที่แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจล หมายถึง โครงสร้างของระบบคอลลอยด์ที่ไม่แสดงการไหล (no steady - state flow) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยของเหลว และของแข็ง โดยมีส่วนที่เป็นของเหลวทำหน้าที่เป็นตัวกลาง และของแข็งที่มีอยู่ในโครงสร้างทำหน้าที่ประสานกันเป็นร่างแห การเกิดโครงสร้างของเจลขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างแรงดึงดูดกับแรงผลัก ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกันเอง และระหว่างอนุภาคคอลลอยด์และสารที่เป็นของเหลว

การเกิดเจล (gelation) เป็นการเกิดโครงสร้างที่มีระเบียบขององค์ประกอบต่างๆ หากแรงผลักมีมากกว่าแรงดึงดูดจะไม่เกิดโครงสร้างของเจลขึ้น หากแรงดึงดูดภายในโครงสร้างมีมากกว่าแรงผลักโครงสร้างจะไม่อุ้มน้ำ หรือเกิดการสูญเสียของเหลวภายในโครงสร้างได้ง่าย พันธะทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการรักษาโครงสร้างของเจล ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน พันธะโควาเลนต์ พันธะเชิงไอออน และแรงดึงดูดไฮโดรโฟบิก วัตถุดิบ และสารผสมอาหารที่สามารถเกิดเจลได้ หรือมีคุณสมบัติในการเป็นสารที่ทำให้เกิดเจล ได้แก่ โปรตีน (เช่น โปรตีนนม โปรตีนไข่ โปรตีนถั่วเหลือง เป็นต้น) คาร์โบไฮเดรต (เช่น สตาร์ช เพกติน อัลจิเนต คาร์ราจีแนน เป็นต้น) ซึ่งกลไลในการเกิดเจลของสารดังที่กล่าวข้างต้นคือ สารจะต้องถูกทำให้เปียก มีการดูดน้ำ บางชนิดละลายน้ำได้ (water soluble) บางชนิดพองตัว (swelling) สารที่ทำให้เกิดเจลบางชนิดจะต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อน เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับโมเลกุล หลังจากนั้นโมเลกุลที่มีโครงสร้างใหม่จะจัดเรียงตัวประสานกันเป็นร่างแหสามมิติ ซึ่งอาจเป็นแมโครโมเลคูลาร์เจล หรือพาร์ทิเคิลเจล หรือโครงสร้างผสม ซึ่งแมโครโมเลคูลาร์เจล (macromolecular gel) จะเป็นโครงสร้างโดยทั่วไปของเจลจากคาร์โบไฮเดรต เช่น คาราจีแนน อัลจิเนต รวมทั้งเจลจากโปรตีนบางชนิดที่สามารถคลี่เป็นสายยาว เช่น เจลาติน การเกาะเกี่ยวกันของเจลประเภทนี้ มี 2 แบบ คือ อาจจะเกาะกันที่จุดใดจุดหนึ่ง หรือเกาะกันที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง เจลประเภทนี้มักจะใส มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี แม้ที่ความเข้มข้นของสารที่ทำให้เกิดเจลต่ำๆ ขณะที่พาร์ทิเคิลเจล (particle gel) แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของเจลจากโปรตีน เช่น เคซีน และเคซิเนต โปรตีนเวย์ โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนไข่ โปรตีนเนื้อ เป็นต้น การเกาะกันของอนุภาค เกิดได้ 2 แบบ คือ เป็นสายยาว (string of beads) หรือเป็นกลุ่มก้อน (random aggregation) โครงสร้างของเจลแบบที่เกาะกันเป็นสายยาวมักให้เจลใสหรือโปร่งแสง (translucent gel) มีความสามารถในการอุ้มน้ำดี โครงสร้างของเจลแบบที่เกาะเป็นกลุ่มก้อนมักให้เจลขุ่น ทึบแสง (opaque gel) และมีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำกว่าเจลชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 อัลจิเนต (alginate)

อัลจิเนตหรืออัลจิน เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างในผนังเซลล์สาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae) โดยอยู่ในรูปสารประกอบเกลือผสมของแคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียมของกรดอัลจินิก (alginic acid) ซึ่งไม่ละลายน้ำ มีโมเลกุลใหญ่ น้ำหนักโมเลกุล 20,000 - 600,000 Da โครงสร้างเป็นโมเลกุลสายโซ่ยาว ในการผลิตอัลจิเนตเป็นอุตสาหกรรม สาหร่ายที่ใช้ ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีอัลจินประมาณร้อยละ 14 - 19 *Laminaria cloustoni* และ *Laminaria digitata* มีอัลจินประมาณร้อยละ 15 - 40 ปริมาณที่พบจะผันแปรขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต (นิธิยา, 2557)

เนื่องจากอัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายทางการค้ามีหลายอนุพันธ์ มีสมบัติการละลายได้ในน้ำแตกต่างกัน เช่น อนุพันธ์ของเกลือโซเดียม โพแทสเซียม แอมโมเนียม และโพรพิลีนไกลคอลเอสเทอร์ อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุลของอัลจิเนตพอลิเมอร์ และการมีโลหะประจุบวก (polyvalent metal cation) สำหรับค่าความเป็นกรดด่างในช่วง 4 - 10 จะไม่มีผลต่อความหนืดของสารละลายอัลจิเนต แต่ถ้าค่าความเป็นกรดด่างต่ำกว่า 4 จะมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการกระจายตัวลดลง และอาจมีการตกตะกอนของกรดอัลจินิกด้วย

อัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดสายตรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกรดแมนนูโรนิก (1,4-$\beta$-D-mannuronic acid) และกรดกูลูโรนิก ($\alpha$-L-guluronic acid) พอลิเมอร์ของอัลจิเนตจะฟอร์มโดยการเชื่อมระหว่างโมโนเมอร์ที่ตำแหน่ง C1 และ C4 ด้วยพันธะไกลโคซิดิก มี degree of polymerization (DP) อยู่ในช่วง 180 - 930 ในโมเลกุลประกอบด้วยส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ เป็นพอลิเมอร์ของกรดแมนนูโรนิก (M) กรดกูลูโรนิก (G) และทั้งสองชนิดแรกสลับกัน (MG) (ภาพที่ 2.2) อัตราส่วนระหว่าง M/G จะแตกต่างไปตามสายพันธุ์ของสาหร่าย คุณสมบัติการละลาย และความหนืด

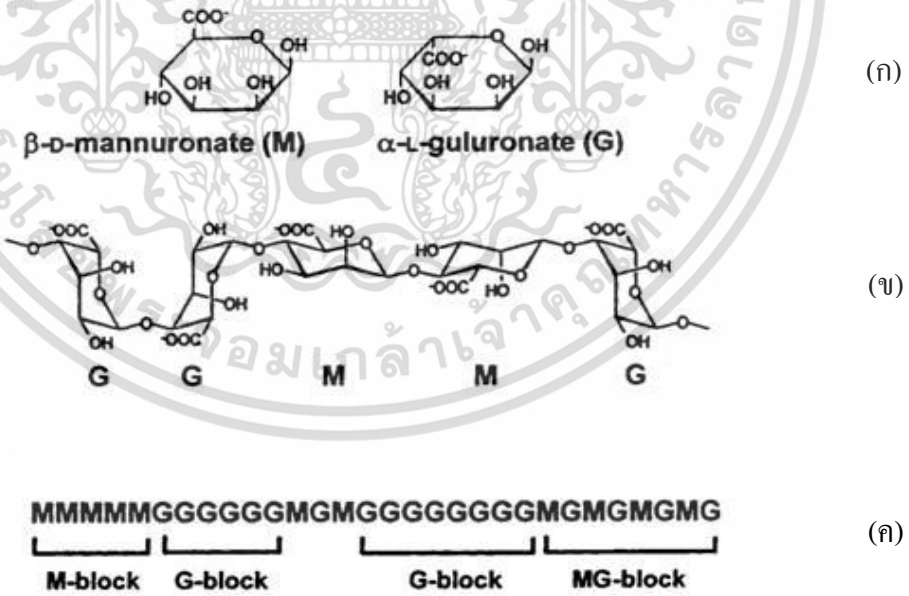
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M block ประกอบด้วย β-D-mannuronic acid จะอยู่ในลักษณะโครงรูปแบบเก้าอี้ $^4C_1$ และการจับกันระหว่างมอโนเมอร์ในบล็อก M จะเป็นพันธะ β - 1,4 ไกลโคซิดิก สายพอลิเมอร์มีลักษณะเส้นตรงคล้ายริบบิ้น

G block ประกอบด้วย α-L-guluronic acid เกิดจาก axial group ทั้ง C1 และ C4 ทำให้สายพอลิเมอร์มีลักษณะคดไปมาเหมือนฟันเลื่อย ลักษณะเช่นนี้มีความสำคัญต่อการเกิดเจล

MG block ประกอบด้วย β-D-mannuronic acid และ α-L-guluronic acid

ในสายโมเลกุลของอัลจิเนตส่วนที่เป็นบล็อค G มีลักษณะโครงรูปแบบริบบิ้นที่ถูกพับให้คงรูปที่มีความแข็งตึง เจลที่เตรียมจากอัลจิเนตที่มีกรดกูลูโรนิกมากจะทำให้ความแข็งแรงของเจลสูง เจลที่ได้มีความแข็ง ไม่มีความยืดหยุ่น แต่ในบล็อก M จะเป็นลักษณะโครงรูปริบบิ้นราบ (flat) มีการบิดงอได้ง่ายกว่าบล็อก G เจลที่เตรียมจากอัลจิเนตที่มีแมนนูโรนิกมากจะให้เจลที่มีความอ่อนนุ่น มีความยืดหยุ่น และในส่วนบล็อก MG จะมีความแข็งตึงปานกลาง โดยอัลจิเนตที่มีปริมาณ MG block มากจะสามารถละลายน้ำได้ดี อัตราส่วนระหว่าง M/G จะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับอิออนโลหะ (วรรณา, 2549)




**ภาพที่ 2.2** ลักษณะโครงสร้างของอัลจิเนต : มอโนเมอร์ของอัลจิเนต (ก) โครงรูปสายโซ่ (ข) และการกระจายของบล็อก (ค)

**ที่มา**: Onsoyen (1997)

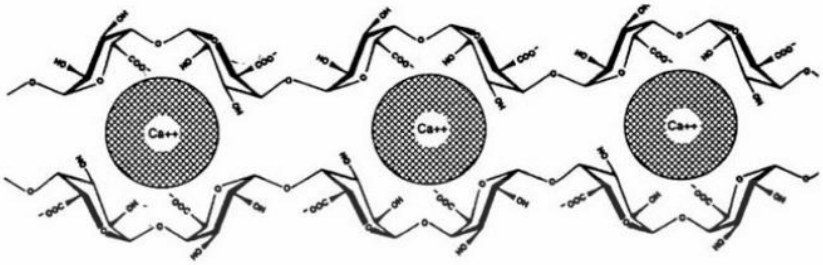
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลจิเนตสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดโดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้อิมัลชั่นคงตัว สารทำให้เกิดเจล และสารยับยั้งการเกิดซินเนอรีซิส (ศิวาพร, 2535) การเกิดเจลของอัลจิเนต เมื่อใช้ในปริมาณน้อย (ร้อยละ 0.5 - 1.0) และมีไอออนของแคลเซียมอยู่ด้วย จะเกิดเจลที่มีความกรอบแน่น และเจลที่ได้จะคงทนต่อความร้อน (วรรณา, 2549) อัลจิเนตสามารถเกิดเป็นเจลได้เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีไอออนของโลหะที่เป็นพอลิวาเลนท์ เช่น $Ca^{2+}$ $Ba^{2+}$ $Cu^{2+}$ และ $Al^{3+}$ ไอออนชนิดประจุบวก (cation) ที่มักใช้สำหรับเตรียมเจลจากอัลจิเนตคือ $Ca^{2+}$ ซึ่งสามารถจับกับบล็อค G ได้ดีโดยเข้าไปแทนที่ $H_3O^+$ ของอัลจิเนตที่สร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ $COO^-$ เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า egg box (ภาพที่ 2.3) อัลจิเนตสามารถเกิดเจลได้ที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 0.1 (โดยน้ำหนัก) และต้องมีแคทไอออนที่มีประจุ +2 เช่น $Ca^{2+}$ อยู่ด้วย (Yalpani, 1988) แคทไอออนจะเกิดการรวมตัวกับส่วนที่มีประจุลบในโครงสร้างอัลจิเนต คือกรดกูลูโรนิกตรงหมู่คาร์บอกซิลิค (carboxylic acid) และหมู่ -OH ที่มีอยู่ในสายพอลิเมอร์ใกล้ๆกันสองสายด้วยพันธะไอออนิค (ionic bond) ทำให้เกิดเป็นร่างแหในลักษณะที่คล้ายกับถาดใส่ไข่ เจลของอัลจิเนตที่ได้จะมีความคงตัวที่อุณหภูมิห้อง ถ้าอัลจิเนตที่มีส่วนของกรดกูลูโรนิกมาก และมีความยาวของสายพอลิเมอร์ของกรดกูลูโรนิกยาวๆ จะสามารถจับกับแคลเซียมได้ดี (high calcium reactivity) การเกิดเจลขึ้นอยู่กับการแพร่ของแคลเซียมไอออนเข้าสู่ชั้นเจล และจะแปรเปลี่ยนไปตามเวลาจนกระทั่งหมดพื้นที่ที่จะทำปฏิกิริยา ทำให้เจลของแคลเซียมอัลจิเนตแข็งตัว (Glicksman, 1982)

การเกิดเจลจะขึ้นกับส่วนของบล็อค G ในสายโซ่ของอัลจิเนต ถ้าความยาวของบล็อคG มีขนาดเหมาะสม บล็อคG ของสายโซ่อัลจิเนตหนึ่งจะประกบกับบล็อค G ของอีกสายโซ่หนึ่ง โดยมีไอออนของ $Ca^{2+}$ เป็นตัวเชื่อมระหว่างสาย ลักษณะคล้ายกล่องวางไข่ที่จับวางซ้อน ทำให้เกิดเป็นขอบเขตรอยต่อหรือ junction zone ที่เชื่อมโครงข่ายไว้ และมีน้ำอยู่ ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงยิ่งขึ้น สามารถเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำ (Nussinovitch, 1997) รูปแบบการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์ได้เป็นแคลเซียมอัลจิเนตแสดงดังสมการ (1) ( Fundueanu และคณะ, 1999)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2Alg\text{-}COONa + CaCl_2 \longrightarrow (Alg\text{-}COO)_2Ca + 2NaCl \quad (1)$$



**ภาพที่ 2.3** โครงสร้าง egg box ของเจลแคลเซียมอัลจิเนต

**ที่มา** : Rousseau และคณะ (2004)

ถ้าไม่มีไอออนของ $Ca^{2+}$ ในสารละลายจะไม่มีการเกิดเจล อัลจิเนตจะทำหน้าที่เป็นเพียงสารช่วยเพิ่มความหนืดให้สารละลายเท่านั้น การผสม $Ca^{2+}$ ลงไปในสารละลายอัลจิเนต จะมีผลต่อลักษณะเจลที่ได้ ถ้าผสมเร็วเกินไป เจลที่ได้จะไม่ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะเกิดเจลเป็นจุด (spot gelation) ขึ้น และเจลที่เกิดจากอัลจิเนตเป็นเจลที่ผันกลับไม่ได้เมื่อได้รับความร้อน (thermoirreversible) นั่นคือทนต่อความร้อน (ไม่ละลาย)

2.5.2 แซนแทนกัม (xanthan gum)

แซนแทนกัมเป็นกัมจากธรรมชาติที่ได้จากการหมักด้วยแบคทีเรียบริสุทธิ์ คือ *Xanthomonas campestris* หลังจากการหมักจะนำสารละลายที่ได้มาตกตะกอนแยกเอาแซนแทนกัมออก ด้วยไฮโซ-โพรพิลแอลกอฮอล์ จากนั้นทำให้แห้งแล้วบดให้เป็นผงละเอียด โครงสร้างของแซนแทนกัมประกอบด้วย กลูโคส แมนโนส และกรดกลูโคโรนิก ในอัตรส่วน 2.8:3.2 มีหมู่แอซีติลประมาณร้อยละ 4.7 และกรดไพรูวิกประมาณร้อยละ 3 องค์ประกอบของแซนแทนกัมจะส่งผลต่อค่าความหนืด คือ ถ้ามีปริมาณของอะซิเตรท และไพรูเวทมากขึ้น จะทำให้สารละลายแซนแทนกัม มีความหนืดสูงขึ้น (Casas และคณะ, 2000) แซนแทนกัมนิยมใช้มากในอาหาร เพื่อเพิ่มความหนืด และความคงตัวในผลิตภัณฑ์ (Mandala และคณะ, 2004) เพราะมีคุณสมบัติพิเศษที่สำคัญ คือ กระจายตัว และสามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำเย็น และน้ำร้อน สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงถึงแม้จะมีความเข้มข้นต่ำ และทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการย่อยด้วยเอมไซม์ มีความคงตัวสูงต่อความร้อน ในสถาวะที่เป็นกรด แซนแทนกัมสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนทำให้เกิดการตกตะกอนทั้งชนิดตะกอนนอนก้น (precipitaton) และ/หรือตะกอนแขวนลอย (flocculation)

โครงสร้างทางเคมีของแซนแทนกัมในสารละลาย จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิที่ทำการละลาย ถ้าละลายที่อุณหภูมิ 25 - 40 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างโมเลกุลแบบเป็นระเบียบ (order structure) สารละลายจะมีความหนืดน้อย ถ้าทำการละลายที่อุณหภูมิ 40 - 60 องศาเซลเซียส แซนแทนกัมจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบไม่ระเบียบ (disordered structure) ซึ่งทำให้สารละลายแซนแทนกัมมีความหนืดสูง (ปาริฉัตตก์, 2548) เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของแซนแทนกัม ความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้น (Tung และ Jones, 1981) และเมื่อมีการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของแซนแทนกัม ทำให้เนื้อสัมผัสมีค่าสูงขึ้น และจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ร่วมกับโลคัสต์บีนกัม แซนแทนกัมไม่มีสมบัติเป็น gelling agent แต่สามารถรวมตัวกับกัมประเภทกาแล็ก-โตแมนแนน เช่น โลคัสต์บีนกัม และกัวร์กัม เกิด thermo - reversible gel ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสยืดหยุ่นเมื่อใช้ร่วมกับ โลคัสต์บีนกัม และเมื่อร่วมกับกัวร์กัมจะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง นอกจากนี้ยังสามารถใช้แซนแทนกัมร่วมกับกลูโคแมนแนน (glucomamnan) หรือคอนยัคแมนแนน (konjac mannan)

2.5.3 กลูโคแมนแนน (glucomamnan)

กลูโคแมนแนนพบมากในหัวบุก *Amorphophallus konjac* K.Koch ในหัวบุกสดจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 80 - 90 และมีส่วนที่เป็นของแข็งประมาณร้อยละ 10 - 20 ในส่วนที่เป็นของแข็งนั้นจะประกอบไปด้วยแป้ง โปรตีน และกลูโคแมนแนน โดยองค์ประกอบหลักของกลูโคแมนแนนจะประกอบด้วยกลูโคสและแมนโนสในอัตราส่วน 3:2 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4 ไกลโคซิดิก นอกจากนี้ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 จะถูกแทนที่ด้วยหมู่อะซิทิล ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดเจลและความเสถียรของเจลต่อความร้อน (Imeson, 1997) กลูโคแมนแนนจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ที่มีลักษณะเป็นใยอาหาร มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีมากมีความหนืดมาก และสามารถทำให้เกิดเจลที่คงตัวต่อความร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลูโคแมนแนนมีคุณสมบัติหลายด้าน เช่น เป็นสารให้ความหนืด โดยเมื่อละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องจะพองตัว และขยายตัวได้ประมาณ 20 - 30 เท่า (บุบผา, 2535) การเกิดเจลของกลูโคแมน-แนนเป็นการเกิดเจลที่ต้องใช้ความร้อนในการทำให้ผงบุก (konjac) ที่ผสมกับน้ำเกิดการละลาย เจลที่ได้จะแตกต่างจากพอลิแซ็กคาไรด์อื่นๆ คือ จะให้เจลที่ทนต่อความร้อน มีความเหนียว และมีความคงตัวสูงมากแม้จะนำไปต้มในน้ำเดือด การให้ความร้อนซ้ำแก่เจล จะทำให้เจลมีความแข็ง และมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้กลูโคแมนแนนร่วมกับแคปป้า - คาราจีแนน ซึ่งจะช่วยให้เจลที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรง และยืดหยุ่นมากกว่าการใช้แคปป้า - คาราจีแนนเพียงอย่างดียว (Charalambous และ Doxastakis, 1989)

## 2.6 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology)

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology; RSM) คิดค้นโดย Box ในปี ค.ศ. 1948 เป็นวิธีการที่ใช้เทคนิคทางสถิติ และคณิตศาสตร์เพื่อพัฒนาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ หรือใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ และพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือปรับปรุงผลิตภัณฑ์เดิม สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆได้ดี เพื่อหาคุณลักษณะของคุณภาพ (quality characteristic) ของผลิตภัณฑ์ ที่เรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (response) หรือผลลัพธ์ โดยในการศึกษาหาความสัมพันธ์กับปัจจัยการทดลอง จะต้องมีการวางแผน และออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลด้วย เทคนิคทางสถิตินี้ใช้แผนภาพคอนทัวร์ (contour plot) (อนุวัตร, 2552)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี full fraction factorial ที่อาศัยค่ากลางของข้อมูลจากระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุด โดยนิยมออกแบบการทดลอง 2 วิธี คือ Central Composite Design (CCD) และ Box - Behnken Design (BBD) โดยใช้การกระจายระดับข้อมูลออกจากศูนย์กลาง เพื่อศึกษาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุด การออกแบบการทดลองแบบ BBD จะเน้นที่จุดรอบๆค่ากลาง โดยไม่รวมค่าการกระจายในระดับแกน (axial point) และค่าที่มุม (factorial point) ทำให้ค่าคงที่ที่ได้ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครอบคลุมปลายสุดของระดับปัจจัย ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบ CCD จึงได้รับความนิยมมากกว่า (Myers และคณะ, 2009)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีการ RSM สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$Y = f(X_1, X_2,\ldots, X_k)+E \qquad (2)$$

โดยที่ Y คือ ค่าตอบสนอง (Response) ซึ่งเป็นตัวแปรตาม และ $X_1$, $X_2$,..., $X_k$ คือ ตัวแปรที่สนใจ ซึ่งเป็นตัวแปรต้น E = error term ของความสัมพันธ์หรือฟังชั่นของตัวแปร ซึ่งมักใช้สมการลำดับที่หนึ่ง (First Order Model) หรือสมการลำดับที่สอง (Second order model) หรือสมการพอลีโนเมียล (Polynomial Model) เป็นตัวอธิบาย โดยวิธีการทางสถิติที่ใช้คือ วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด (The Least Square Method) เพื่อประมาณค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ

การหาค่าจุดหรือพื้นที่ที่เหมาะสม (Optimization) โดยใช้ Desirability function ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นที่คิดค้นโดย Harrington ในปี ค.ศ. 1965 ต่อมา Derringer และ Suich (1990) ได้ทำการพัฒนาการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยค่า Desirability เป็นค่าความพึงพอใจของผลิตภัณฑ์ สามารถคำนวณแยกเป็นส่วนๆ หรือทีละค่าตอบสนอง (Response) ค่า Desirability ของแต่ละค่าตอบสนองจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 - 1 ค่ามาตรฐานของ Desirability ที่สัมพันธ์กับระดับความพึงพอใจ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.4** มาตรฐานของค่า Desirability ที่สัมพันธ์กับระดับความพึงพอใจและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

| Standard estimate | Desires | Quality of product |
|---|---|---|
| 1.00 | Excellent | The ultimate in satisfaction of quality and improvement beyond this point have no appreciable value |
| 1.00 - 0.80 | Very good | Acceptable and excellent. Represent unusual quality, or Performance, well beyond anything commercially available |
| 0.80 - 0.63 | Good | Acceptable and good, represent an improvement over the best commercially quality, the latter having the value of 0.63 |
| 0.63 - 0.37 | Satisfactory | Acceptable but poor quality is acceptable to the specification limits, but improvement is desired |
| 0.37 - 0.20 | Bad | Unacceptable. Materials of this quality would lead of failure of the project. |
| 0.20 - 0.00 | Very bad | Complete unacceptable |

**ที่มา :** Harington (1965)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

George และคณะ (1994) ศึกษาผลของความเข้มข้นของอัลจิเนต และเจลแลนกัมในการเกิดเจล พบว่าทั้งอัลจิเนต และเจลแลนกัมมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับแคลเซียมไอออนในการเกิดเจล ซึ่งอัลจิเนตจะสามารถฟอร์มเจลในที่เย็นโดยไม่ต้องอาศัยความร้อน ขณะที่เจลแลนกัมจะสามารถฟอร์มเจลได้ทั้งร้อนและเย็นในการใช้แคลเซียมไอออนในการฟอร์มเจล จะได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนสูงสุดแล้วหลังจากนั้นจะค่อยๆลดลง ค่ามอดูลัสของยังซึ่งเป็นค่าบอกระดับความแข็งของเจล จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไอออนมากขึ้น และอัตราการปลดปล่อยแคลเซียมจะขึ้นกับความสามารถในการละลายของเกลือแคลเซียมที่ใช้

Ana และคณะ (1999) ศึกษาอิทธิพลของโซเดียมอัลจิเนต และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ในการเกิดเจล พบว่าการเกิดเจลจะอยู่ในรูปของแคลเซียมอัลจิเนต การเพิ่มความเข้มข้นของอัลจิเนตก่อให้เกิดการลดลงของความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์จะทำให้เกิดการก่อตัวของฟิล์มหนาขึ้น

Le Roux และคณะ (1999) ศึกษาผลของโซเดียมไอออน และความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตต่อคุณสมบัติของเจลอัลจิเนต พบว่าคุณสมบัติ และความหนืดของเจลอัลจิเนตเกิดจากการเชื่อมกันระหว่างแคลเซียมไอออน โดยการเกิดเจลจะขึ้นกับความเข้มข้นของอัลจิเนต และระยะเวลาของการสัมผัสกับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นในการทดสอบเจลอัลจิเนตอยู่ระหว่างร้อยละ 1 - 3 โดยแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ 15 ชั่วโมง

Chan และคณะ (2002) ศึกษากลไกการเชื่อมกันระหว่างแคลเซียม และซิงค์ในการผลิตไมโครอัลจิเนต โดยการรวมกันของเกลือทั้งสองแสดงให้เห็นลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน และการปลดปล่อยตัวยาช้าลงเมื่อเทียบกับการเชื่อมโยงด้วยเกลือแคลเซียมเพียงอย่างเดียว และจากการศึกษาความหนืดพบว่าซิงค์ไพเพอร์จะมีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของอัลจิเนตในระดับที่สูงกว่าแคลเซียมไพเพอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Enrique และ Rubiolo (2003) ศึกษาจลศาสตร์การเกิด crosslinking ของเจลไฮโดร-คอลลอยด์ไอออนลบ (cation - hydrocolliod) พบว่าปฏิกิริยาการเกิดเจลของไฮโดรคอลลอยด์เกิดจากคุณสมบัติการเป็นสารทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของตัวมันเอง เมื่อสารละลายไฮโดรคอลลอยด์สัมผัสกับสารละลายไอออนลบ จะทำให้เกิดการสร้างเจลที่หน้าสัมผัส โดยการเกิดเจลจะขึ้นอยู่กับการแพร่ของประจุลบผ่านเข้าสู่ชั้นเจล และแปรเปลี่ยนไปตามเวลาจนกระทั่ง unreacted zone หายไป ไฮโดรคอลลอยด์ไอออนลบจะเกิดปฏิกิริยาการสร้างเป็นโครงสร้างของแข็งด้วยการค่อยๆ เข้าไปทำให้เจลค่อยๆ แข็ง การรวมกันของไอออนลบในการเกิดโครงสร้างเจลจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการแช่ และทำให้ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากการสร้างโครงสร้างการจัดเรียงตัวใหม่โดยการเชื่อมพันธะไฮโดรเจน

Herrera และคณะ (2012) ศึกษาผลของการเพิ่มแคลเซียมคลอไรด์ในทางเคมีกายภาพและคุณสมบัติด้านการไหลของสารผสมโซเดียมเคซีเนตกับโซเดียมอัลจิเนตในอิมัลชันของน้ำมัน พบว่าสารละลายของเคซีเนต และอัลจิเนตจะแสดงประจุลบ เมื่อเพิ่มแคลเซียมไอออนจะส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลง ในขณะที่สารละลายยังคงมีประจุลบอยู่ ผลของแคลเซียมไอออนที่เชื่อมกับโมเลกุลของอัลจิเนตจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงขนาดของโมเลกุลของโซเดียมอัลจิเนตเป็นผลมาจากกลุ่มของกรดแมนนูโรนิก และกรดกลูคูโรนิกในโมเลกุลของอัลจิเนต การเติมแคลเซียมคลอไรด์ลงในสารละลายอัลจิเนตจะทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลแบบ shear - thinning คือเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนจะทำให้ความหนืดของของไหลลดลง เนื่องจากความหนืดของของไหลไม่คงที่ เมื่อมีการเติมแคลเซียมไอออนลงในสารละลายผสมของโซเดียมเคซิเนตกับโซเดียมอัลจิเนตจะสามารถรักษาเสถียรภาพของอิมัลชันได้ โดยกลไกการรักษาเสถียรภาพโครงร่าง 3 มิติเกิดจากอัลจิเนต ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะสามารถจับกับอนุภาคของน้ำมันได้

Lee และ Rogers (2012) ศึกษาผลของแหล่งแคลเซียมและเวลาในการเกิดเจลของคาเวียร์โดยใช้โซเดียมอัลจิเนต ซึ่งพบว่าความเร็วในการเกิดเจลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของแคลเซียม ความแข็งแรงของเจลจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแหล่งที่มาของแคลเซียม แคลเซียมคลอไรด์จะเกิดเจลเร็วที่สุด (~ 100 s) ตามด้วยแคลเซียมแลคเตท (~ 500 s) และแคลเซียมกลูโคเนต (~ 2000) โดยแคลเซียมคลอไรด์นิยมใช้มากที่สุด แต่จะให้รสขมเมื่อใช้ในความเข้มข้นที่มาก ขณะที่การใช้แคลเซียมกลูโคเนตจะมีข้อได้เปรียบคือ เยื่อของเซลล์ของทรงกลมจะหนาและมีความแข็งมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

## 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

### 3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 เก็บเกี่ยวในระหว่างเดือนมีนาคม ถึงเมษายน พ.ศ. 2557 จากศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

### 3.1.2 สารไฮโดรคอลลอยด์

3.1.2.1 โซเดียมอัลจิเนต (Food grade) จากบริษัทดิมิคา คอร์ปอเรชั่น จำกัด ญี่ปุ่น

3.1.2.2 แซนแทนกัม (Food grade) จากไทยฟู้ดแอนด์เคมิคอล จำกัด ไทย

3.1.2.3 กลูโคแมนแนน (Food grade) จากไทยฟู้ดแอนด์เคมิคอล จำกัด ไทย

### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

3.1.3.1 แคลเซียมคลอไรด์ (Food grade) จากบริษัท นิวตริชั่น จำกัด ไทย

### 3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.4.1 กระป๋องอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Aluminium can)

3.1.4.2 โถดูดความชื้น (Desiccator)

3.1.4.3 ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)

3.1.4.4 ที่คีบ (Tong)

3.1.4.5 บีกเกอร์ (Beaker) ปริมาตร 100 ml, 250 ml และ 500 ml

3.1.4.6 กระบอกตวง (Graduate cylinder) ขนาด 10 ml, 100 ml และ 500 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4.7 แท่งแก้วคนสาร

3.1.4.8 ไมโครปิเปต (Gilson, France) ปริมาตร 1ml และ 5ml

3.1.4.9 ขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 500 ml

3.4.1.10 Kjeldahl flask

3.4.1.11 Boiling chip

3.4.1.12 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 ml

3.4.1.13 กรวยแก้ว

3.4.1.14 บิวเรต 50 ml (Buret)

3.4.1.15 ขาตั้งบิวเรต (stand Buret)

3.4.1.16 นาฬิกาจับเวลา (Stop Watch - DX9117-A ; Citizen, Japan)

3.4.1.17 เทอร์โมมิเตอร์ 0 - 100 องศาเซลเซียส

3.4.1.18 แมคเนติก

3.4.1.19 กะละมังสแตนเลส

3.4.1.20 เข็มฉีดยา (syringe) ขนาด 10 ml

3.4.1.21 ผ้าขาวบางตาถี่

3.4.1.22 เครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน

## 3.2 สารเคมี

| | |
|---|---|
| 3.2.1 คอปเปอร์(II)ซัลเฟต ($CuSO_4$) | (Merck, Germany) |
| 3.2.2 โพแทสเซียมซัลเฟส ($K_2SO_4$) | (Merck, Germany) |
| 3.2.3 กรดบอริก 2 % | (Merck, Germany) |
| 3.2.4 สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก | (Merck, Germany) |
| 3.2.5 สารละลายอินดิเคเตอร์ | (Merck, Germany) |
| 3.2.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) | (Carlo Erba Reagenti, Italy) |
| 3.2.7 ปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether 40-60) | (Thailand) |
| 3.2.8 เอธิลแอลกอฮอล์ | (Merck, Germany) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.9 แผ่นเพาะเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป 3M PeterifilmTM Aerobic Count Platea (AC) จาก บริษัท 3M ประเทศไทย จำกัด ไทย

## 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง (Ohaus Balance 2 decimal Ohaus รุ่น ARC120)

3.3.2 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Sartorius รุ่น TE214S, Switzerland)

3.3.3 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) (Memmert รุ่น UNB400, Germany)

3.3.4 เครื่องย่อยโปรตีน Gerhardt (Kjeldatherm Digestion Block รุ่น KB (KB-8S), Germany)

3.3.5 เครื่องกลั่นโปรตีน (Gerhardt Vapodest VAP30, Germany)

3.3.6 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (รุ่น SOX406 SOX406; Soxhlet, China)

3.3.7 เครื่องวัดค่าสี (รุ่น CR400; Minolta, Japan)

3.3.8 เครื่องปั่นมือถือ (Braun, MR320, Poland)

3.3.9 เครื่องวัดค่าสี (รุ่น CR400; Minolta, Japan)

3.3.10 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro Systems Texture Analyzer, TA-XT Plus, UK)

3.3.11 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (Schott Gerate, Germany)

3.3.12 เตาเผา (Muffle furnance) (Nabertherm LT40, Germany)

3.3.13 เวอร์เนียคาลิปเปอร์แบบดิจิตอล (Digital Vernier Caliper, China)

3.3.14 เครื่องตีป่นอาหาร (BagMixer, 400interscience, France)

3.3.15 Vortex mixer (ScientificIndustries, Votex-Genie2, America)

3.3.16 ตู้บ่มเชื้อจุลินทรีย์ (Kendro, Heraeus, Germany)

3.3.17 หม้อนึ่งอัดไอ (Tomy, Es-315, Japan)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4 วิธีการดำเนินงาน

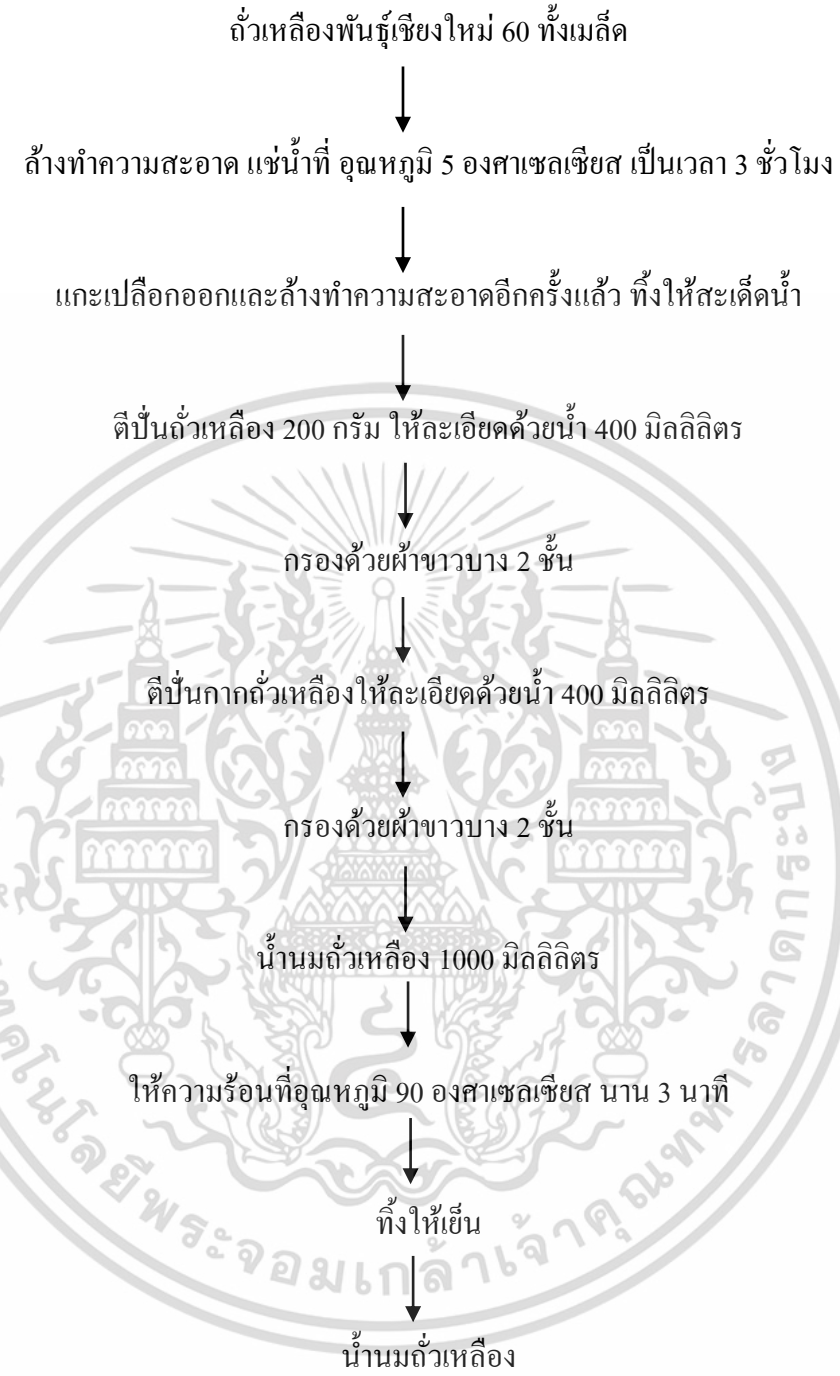
### 3.4.1 การเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง

นำถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 จำนวน 200 กรัม มาล้างทำความสะอาด แช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 3 เท่าของน้ำหนักถั่วแห้ง ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นล้างทำความสะอาดและแยกเอาเปลือกออก ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ นำไปตีปั่นด้วยน้ำปริมาตร 400 มิลลิลิตร ตีปั่นด้วยเครื่องปั่นผสม ความเร็วเบอร์ 2 เป็นเวลา 2 นาที ทำการกรองด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้น และเติมน้ำลงในกากถั่วเหลืองที่เหลือ 400 มิลลิลิตร ตีปั่นอีกครั้ง เป็นเวลา 2 นาที ทำการกรองด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้น ปรับปริมาตรรวมของน้ำนมถั่วเหลืองเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำสะอาด (ดัดแปลงจาก Puechkamutr, 2004) โดยปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำนมถั่วเหลืองเท่ากับ 8.6 ± 0.1 องศาบริกซ์

### 3.4.2 การทำเต้าหู้ทรงกลม

ทดลองเตรียมน้ำนมถั่วเหลืองตามวิธีในข้อ 3.4.1 และทำการเตรียมสารละลายโซเดียม-อัลจิเนตในน้ำปริมาตร 125 มิลลิลิตร จากนั้นทำการผสมกับน้ำนมถั่วเหลืองปริมาณ 250 มิลลิลิตร ใช้เครื่องปั่นแบบมือถือผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทำการเตรียมสารละลายแคลเซียมโดยนำแคลเซียมคลอไรด์ละลายในน้ำปริมาตร 375 มิลลิลิตร ทำบรรจุน้ำนมถั่วเหลืองที่เตรียมได้ในปริมาณ 1.25 มิลลิลิตร ลงในช้อนตวงขนาด ¼ ช้อนชา จุ่มช้อนตวงในสารละลายของเกลือแคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์เข้าล้อมรอบน้ำนมถั่วเหลือง เกิดเป็นเต้าหู้ทรงกลม ก่อนยกช้อนตวงขึ้นจากสารละลาย และแช่เต้าหู้ทรงกลมในสารละลาย 20 นาที ในการทำเต้าหู้ทรงกลม 1 ครั้ง จะได้เต้าหู้ทรงกลมทั้งหมด 7 เม็ด สารละลายแคลเซียมที่ใช้จะสามารถใช้ได้ 3 ครั้ง ซึ่งจะทำให้ได้เต้าหู้ทรงกลมทั้งหมด 21 เม็ด จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและสะเด็ดน้ำให้แห้ง นำไปพาสเจอร์ไรซ์ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำไปใส่ภาชนะที่ผ่านการฆ่าเชื้อ และบรรจุน้ำที่ผ่านการสเตอริไรซ์เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**ภาพที่ 3.1** ขั้นตอนการผลิตน้ำนมถั่วเหลือง

**ที่มา** : ดัดแปลงมาจาก Puechkamut (2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.4.3 การศึกษาผลของระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม**

ทดลองทำเต้าหู้ทรงกลมตามวิธีการในข้อ 3.4.2 โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 1.5 และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 ต่อน้ำหนักน้ำนมถั่วเหลือง นำเต้าหู้ทรงกลมที่ผลิตได้ไปใส่ภาชนะที่ผ่านการฆ่าเชื้อและบรรจุน้ำที่ผ่านการสเตอริไรซ์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยทำการตรวจสอบคุณภาพของเต้าหู้ทรงกลมทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพื่อเลือกเวลาที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ทรงกลมเป็นเจลสมบูรณ์

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้

3.4.3.1 วิเคราะห์น้ำหนักของเต้าหู้ทรงกลม ด้วยเครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง

3.4.3.2 วิเคราะห์ขนาดของเต้าหู้ทรงกลม ด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์แบบดิจิตอล (Digital Vernier Caliper)

3.4.3.3 วิเคราะห์ค่าสีของเต้าหู้ทรงกลมโดยใช้เครื่องวัดสี Minolta CR 400 ซึ่งแสดงผลในรูปของค่าความสว่าง ($L^*$) ค่าสีแดง ($a^*$) และค่าสีเหลือง ($b^*$) รายละเอียดดังภาคผนวก ก-1

3.4.3.4 วิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ทรงกลมด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA - xt.plus) โดยทำการวิเคราะห์ค่าความแข็ง รายละเอียดดังภาคผนวก ก-2

**3.4.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์ที่มีผลต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม**

ทดลองทำเต้าหู้ทรงกลมตามวิธีการในข้อ 3.4.3 โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 1 1.5 และ 2 และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 1.5 และ 2 ต่อน้ำหนักน้ำนมถั่วเหลืองโดยใช้เวลาในการแช่ในน้ำเย็นตามเวลาที่เลือกจากข้อ 3.4.3 และทำการวิเคราะห์คุณภาพของเต้าหู้ที่เตรียมได้ตามวิธีในข้อ 3.4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางแผนการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Method, RSM) สภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 เทคนิคทางสถิติใช้แผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่สนใจ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ของความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวิธีทางสถิติ คือ วิธีการกำลังสองที่น้อยที่สุด (The least square method) เพื่อประมาณค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยฟังก์ชันที่ใช้เรียกว่า Fitted response function: แสดงในสมการที่ (3)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \qquad (3)$$

เมื่อ Y คือค่าการทำนายค่าของตัวแปร (response) คือ น้ำหนัก ขนาด ค่าสี (ค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง) และค่าเนื้อสัมผัสของทรงกลม ในขณะที่ $X_1$ คือ sodium alginate level และ $X_2$ คือ calcium chloride level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยวางแผนการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM)

| Run | Alginate (%) | $CaCl_2$ (%) |
|---|---|---|
| 1 | 1.50 | 1.50 |
| 2 | 1.50 | 1.50 |
| 3 | 1.50 | 1.00 |
| 4 | 1.50 | 1.50 |
| 5 | 1.50 | 2.00 |
| 6 | 1.00 | 1.50 |
| 7 | 2.00 | 2.00 |
| 8 | 2.00 | 1.00 |
| 9 | 1.00 | 2.00 |
| 10 | 1.00 | 1.00 |
| 11 | 1.50 | 1.50 |
| 12 | 2.00 | 1.50 |
| 13 | 1.50 | 1.50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 การทดสอบความชอบของเต้าหู้ทรงกลมโดยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดลองทำเต้าหู้ทรงกลม ตามสภาวะที่เลือกจากข้อ 3.4.4 โดยพิจารณาจากเต้าหู้ทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ มีการฟอร์มเป็นเจลทั้งเม็ดสมบูรณ์ มาทดสอบการยอมรับ โดยวิธีการให้คะแนนแบบ 9 - point hedonic scale scoring test ที่คะแนนความชอบตั้งแต่ 1 - 9 (เมื่อคะแนน 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด 9 คือ ชอบมากที่สุด) ให้คะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส กลิ่นรส และความชอบโดยรวม ทดสอบกับผู้ที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน (n=30) โดยเสริฟเต้าหู้ทรงกลมในน้ำซุป เต้าหู้ทรงกลม 5 กรัมต่อน้ำซุป 20 มิลลิลิตร รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก จ

วางแผนการทดลองแบบ Randomized complete block design (RCBD) ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อเลือกสภาวะของการผลิตเต้าหู้ทรงกลมที่ผู้ชิมให้คะแนนความชอบสูงสุดเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

### 3.4.6 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลม

ทดลองทำเต้าหู้ทรงกลม ตามสภาวะที่เลือกจากข้อ 3.4.5 ที่ได้คะแนนความชอบรวมจากการชิมสูงสุด เก็บรักษาในกล่องพลาสติคที่ทำจากโพลิเอทธิลีน กล่องละ 50 กรัม และน้ำสเตอริไรซ์ 25 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส โดยทำการตรวจสอบ

3.4.6.1 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) รายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อกรัม โดยถ้าตรวจพบเกิน $5 \times 10^{-4}$ โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ทำการสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องจากตรวจพบเกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเต้าหู้หลอด (มอก.1004-2533)

3.4.6.2 ค่าความเป็นกรดด่าง โดยใช้เครื่อง pH-meter

3.4.6.3 ปริมาณกรดทั้งหมด โดยการไทเทรตกับสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตราฐาน (AOAC, 2012) (ภาคผนวก ข-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.4.7 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม**

3.4.7.1 ความชื้น (Moisture) ตามวิธีการของ (AOAC, 2012) รายละเอียดดังภาคผนวก ข-1

3.4.7.2 ปริมาณโปรตีน (Protein) ตามวิธีการของ (AOAC, 2012) รายละเอียดดังภาคผนวก ข-3

3.4.7.3 ไขมัน (Fat) ตามวิธีการของ (AOAC, 2012) รายละเอียดดังภาคผนวก ข-4

3.4.7.4 เถ้า (Ash) ตามวิธีการของ (AOAC, 2012) รายละเอียดดังภาคผนวก ข-2

3.4.7.5 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ตามวิธีการของ (AOAC, 2012)

**3.4.8 ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีผลต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม**

ศึกษาผลของสารไฮโดรคอลลอยด์สองชนิด คือ แซนแทนกัมและผงบุก ทำการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ลงในน้ำนมถั่วเหลือง ในปริมาณร้อยละ 0.025 และ 0.05 ของน้ำหนักน้ำนม นำไปทดลองผลิตเป็นเต้าหู้ทรงกลมตามสภาวะที่ได้รับจากข้อ 3.4.4 นำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพตามวิธีการในข้อ 3.4.3

**3.4.9 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลม**

เพื่อศึกษาโครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลม และเต้าหู้หลอดที่ขายในท้องตลาด (ตราเกษตร ผลิตโดยบริษัท อินเตอร์ แอ็ดว้านซ์ ฟู้ด จำกัด) ในการทดลองนี้เตรียมเต้าหู้ทรงกลมที่เติมและไม่เติมสารไฮโดรคอลลอยด์ นำมาวิเคราะห์โครงสร้างภายใน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแสดงในภาคผนวก ง จากนั้นทำการถ่ายภาพที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.4.10 การวางแผนการทดลอง**

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอดโดยสมบูรณ์ (Complete randomize design, CRD) โดยการนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ RCBD (Randomized Complete Block Design)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

## 4.1 ผลการศึกษาผลของระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม

การศึกษาผลของระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลมที่ ทำโดยการเตรียมเต้าหู้ทรงกลมโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักน้ำนมถั่วเหลือง นำเต้าหู้ทรงกลมที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ลักษณะทางด้านกายภาพในด้านต่างๆ ได้แก่ น้ำหนัก ขนาดของทรงกลม ค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัสโดยทำการทดสอบคุณภาพทุก 2 ชั่วโมง จนครบ 16 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

**ตารางที่ 4.1** ผลของระยะเวลาในการแช่ในน้ำเย็นต่อน้ำหนักและขนาดของเต้าหู้ทรงกลม

| Soaking time (hr.) | Weight (g) | Size (mm) |
|---|---|---|
| 2 | 2.12±0.26[a] | 14.99±0.70[a] |
| 4 | 2.13±0.17[a] | 15.10±0.52[a] |
| 6 | 2.14±0.17[ab] | 15.12±0.17[a] |
| 8 | 2.17±0.11[abc] | 15.16±0.30[ab] |
| 10 | 2.29±0.24[abc] | 15.33±0.27[ab] |
| 12 | 2.30±0.18[abc] | 15.69±0.49[bc] |
| 14 | 2.33±0.19[bc] | 15.73±0.47[bc] |
| 16 | 2.34±0.22[c] | 15.86±0.50[c] |

**หมายเหตุ :** [a-c] หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่าเฉลี่ย ± SD จากการทดลอง 3 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** ผลของระยะเวลาในการแช่ในน้ำเย็นต่อค่าสีของเต้าหู้ทรงกลม

| Soaking time (hr) | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ |
|---|---|---|---|
| 2 | 82.18±0.30$^{a}$ | 0.74±0.19$^{b}$ | 8.21±1.00$^{b}$ |
| 4 | 82.37±0.48$^{ab}$ | 0.77±0.10$^{b}$ | 7.83±1.13$^{ab}$ |
| 6 | 82.48±0.34$^{abc}$ | 0.85±0.13$^{a}$ | 7.72±11.00$^{ab}$ |
| 8 | 82.54±0.32$^{bcd}$ | 0.85±0.14$^{b}$ | 7.54±1.01$^{ab}$ |
| 10 | 82.55±0.35$^{bcd}$ | 0.93±0.12$^{a}$ | 7.42±1.06$^{ab}$ |
| 12 | 82.64±0.41$^{bc}$ | 0.93±0.15$^{a}$ | 7.17±0.58$^{a}$ |
| 14 | 82.74±0.38$^{cd}$ | 0.94±0.10$^{a}$ | 7.08±0.81$^{a}$ |
| 16 | 82.89±0.15$^{d}$ | 0.97±0.20$^{a}$ | 6.94±0.74$^{a}$ |

**หมายเหตุ :** $^{a-c}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
ค่าเฉลี่ย ± SD จากการทดลอง 3 ซ้ำ

**ตารางที่ 4.3** ผลของระยะเวลาในการแช่ในน้ำเย็นต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม

| Soaking time (hr) | Hardness (g·force) |
|---|---|
| 2 | 654.29±135.44$^{a}$ |
| 4 | 786.66±68.83$^{b}$ |
| 6 | 830.90±68.83$^{ab}$ |
| 8 | 831.14±68.83$^{bc}$ |
| 10 | 833.85±139.87$^{bc}$ |
| 12 | 894.33±60.02$^{cd}$ |
| 14 | 929.48±23.21$^{d}$ |
| 16 | 947.71±32.49$^{d}$ |

**หมายเหตุ :** $^{a-d}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
ค่าเฉลี่ย ± SD จากการทดลอง 3 ซ้ำ

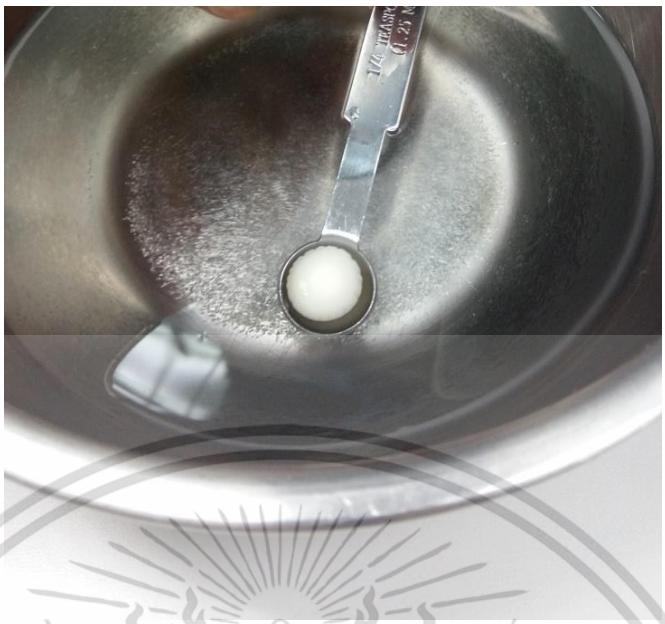
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า หลังจากจุ่มน้ำนมถั่วเหลืองที่ผสมกับโซเดียมอัลจิเนตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เจลจะเริ่มเกิดทันที (ภาพที่ 4.1) และดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว (Lee และ Roger, 2012) เกิดเป็นเยื่อหุ้มของเหลวที่มีลักษณะหนา และก่อตัวขึ้นเรื่อยๆ จากการแพร่ของแคลเซียมไอออนเข้าภายในทรงกลม แคลเซียมไอออนเป็นตัวเชื่อมระหว่างสายของอัลจิเนตทำให้เกิดโครงสร้างลักษณะคล้ายกล่องวางไข่ที่จับวางซ้อนกัน (egg - box model) สามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ และเนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องรสเฝื่อนขมของแคลเซียม ในการทดลองนี้ได้กำหนดการแช่เต้าหู้ทรงกลมในสารละลายแคลเซียมเป็นเวลา 20 นาที (Myhrovold และคณะ, 2011) จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่น และการเกิดเจลจะดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องจากการสร้างโครงสร้างเพิ่มเติมด้วยการเชื่อมข้ามของพันธะไฮโดนเจน (Enrique และ Rubiolo, 2003) จนเกิดเป็นเจลสมบูรณ์ได้ทั้งเม็ด (ภาพที่ 4.2)

จากการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาด และน้ำหนักของเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้นอย่ามีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.1) ที่ระยะเวลาการแช่ 2 ชั่วโมงพบว่า เต้าหู้ทรงกลมมีขนาดเฉลี่ย 14.99 มิลลิเมตร และจะเพิ่มขึ้นเป็น 15.69 มิลลิเมตรเมื่อเวลาการแช่เพิ่มขึ้นเป็น 12 ชั่วโมง และเมื่อระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นเพิ่มขึ้นขนาดของเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่าความสว่างของเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้น ค่าสีเหลืองลดลง (ตารางที่ 4.2) นอกจากนี้การเกิดเจลดำเนินไปอย่างต่อเนื่องในระหว่างการแช่ในน้ำเย็น สามารถสังเกตได้จากค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ระยะเวลาการแช่ 2 ชั่วโมง เต้าหู้ทรงกลมมีค่าความแข็งเฉลี่ย 625.29 กรัม·แรง และจะเพิ่มขึ้นเป็น 894.33 กรัม·แรง เมื่อเวลาการแช่เพิ่มขึ้นเป็น 12 ชั่วโมง

การเลือกระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป พิจารณาจากระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดเป็นเจลสมบูรณ์ทั้งเม็ด จากผลการทดลองการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ (ตารางที่ 4.1 ถึง 4.3) พบว่าเต้าหู้ทรงกลมที่ระยะเวลาในการแช่ในน้ำเย็น 12 ชั่วโมง มีลักษณะทางกายภาพทั้งด้านขนาด น้ำหนัก และค่าความแข็ง ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับเต้าหู้ทรงกลมที่ได้จากการแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 14 และ 16 ชั่วโมง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกระยะเวลาในการแช่ 12 ชั่วโมงเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาพที่ 4.1** จุ่มน้ำนมถั่วเหลืองในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

**ภาพที่ 4.2** ตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์ที่มีผลต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม

การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ในการขึ้นรูปเต้าหู้ทรงกลม โดยใช้การวางแผนการทดลองแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Method, RSM) ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design โดยกำหนดให้ $X_1$ คือความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และ $X_2$ คือ ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ ปัจจัย (response) ที่ทำการตรวจสอบ คือ ขนาด น้ำหนัก ค่าสี และค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม รายละเอียดและค่าตอบสนองของปัจจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design และค่าตอบสนองของปัจจัย

| RUN | Alginate (%) | Calcium (%) | Weight (g) | Size (mm) | Color $L^*$ | Color $a^*$ | Color $b^*$ | Hardness (g·force) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.5 | 1.5 | 2.28 | 14.92 | 83.40 | 1.05 | 6.50 | 932.42 |
| 2 | 1.5 | 1.0 | 2.64 | 16.17 | 81.07 | 1.17 | 5.50 | 260.73 |
| 3 | 1.5 | 1.5 | 2.11 | 14.84 | 83.29 | 1.13 | 7.26 | 931.80 |
| 4 | 1.0 | 2.0 | 1.37 | 13.30 | 83.87 | 0.83 | 8.13 | 641.15 |
| 5 | 1.5 | 1.5 | 2.04 | 15.09 | 83.16 | 1.09 | 7.93 | 785.92 |
| 6 | 1.5 | 2.0 | 1.93 | 14.77 | 83.38 | 0.95 | 8.05 | 896.21 |
| 7 | 2.0 | 1.0 | 1.94 | 14.78 | 83.33 | 0.83 | 6.82 | 496.37 |
| 8 | 1.5 | 1.5 | 1.83 | 14.20 | 83.53 | 1.09 | 7.76 | 889.29 |
| 9 | 2.0 | 1.5 | 1.95 | 14.51 | 83.40 | 0.92 | 7.71 | 1134.88 |
| 10 | 1.5 | 1.5 | 2.24 | 14.80 | 83.30 | 0.95 | 7.41 | 878.38 |
| 11 | 2.0 | 2.0 | 1.78 | 14.36 | 83.11 | 0.90 | 8.22 | 1115.36 |
| 12 | 1.0 | 1.5 | 1.25 | 12.63 | 83.69 | 0.60 | 9.30 | 761.18 |
| 13 | 1.0 | 1.0 | 1.75 | 14.18 | 110.13 | 1.24 | 7.32 | 446.44 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจากข้อมูลของค่าตอบสนองแต่ละปัจจัย พบว่าลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ทรงกลมจะขึ้นกับความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ (Le Roux และคณะ, 1999) โดยภาพรวมพบว่า เมื่อความเข้มข้มของโซเดียมอัลจิเนตคงที่ การเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ ส่งผลให้ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมจะเพิ่มขึ้น แต่ขนาดและน้ำหนักของเต้าหู้ทรงกลมลดลง (ภาพที่ จ-1 และจ-2, ภาคผนวกจ) และเมื่อความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์คงที่ การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตจะทำให้ ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมจะเพิ่มขึ้น แต่ขนาดและน้ำหนักของเต้าหู้ทรงกลมลดลงถ้าใช้ปริมาณโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 2 (ภาพที่ จ-3 และจ-4, ภาคผนวกจ) การที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการใช้ความเข้มข้นของอัลจิเนตหรือแคลเซียมไอออนที่สูง ทำให้การเกิดเจลเกิดได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ปริมาณน้ำที่ซึมเข้าสู่เม็ดในระหว่างการแช่ในน้ำเย็นลดลง จึงทำให้เต้าหู้ทรงกลมมีขนาดเล็ก และน้ำหนักลดลง

**ตารางที่ 4.5** ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าตอบสนองของปัจจัย

| Source | p-value Prob>F | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | df | weight | size | L | a | b | hardness |
| Model | 5 | 0.0096* | 0.0035* | 0.0392* | 0.1268 | 0.0473* | 0.0001* |
| A-alginate | 1 | 0.0267 | 0.0068 | 0.0713 | 0.9564 | 0.2249 | 0.0014 |
| B-calcium | 1 | 0.0314 | 0.0229 | 0.1097 | 0.1320 | 0.0159 | <0.0001 |
| AB | 1 | 0.5907 | 0.5697 | 0.0439 | 0.1173 | 0.6416 | 0.0219 |
| $A^2$ | 1 | 0.0022 | 0.0010 | - | 0.0365 | 0.0309 | 0.1090 |
| $B^2$ | 1 | 0.2438 | 0.0266 | - | 0.3009 | 0.8078 | 0.0003 |
| Lack of Fit | 3 | 0.3992ns | 0.3148ns | <0.0001 | 0.0384 | 0.3408ns | 0.2461ns |
| $R^2$ | - | 0.84 | 0.88 | 0.58 | 0.64 | 0.74 | 0.95 |

**หมายเหตุ :** * Significant at $p<0.05$

ns not significant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.6** สมการที่ทำนายจากการใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนองของแต่ละปัจจัย

| Dependent values | Equation quadratic models | $R^2$ |
|---|---|---|
| weight | $= - 0.96 + 6.55(X_1) - 2.47(X_2) + 0.21(X_1X_2) - 2.15(X_1)^2 + 0.588(X_2)^2$ | 0.84 |
| size | $= 9.90 + 15.52(X_1) - 9.29(X_2) + 0.46(X_1X_2) - 5.01(X_1)^2 + 2.57(X_2)^2$ | 0.88 |
| b* | $= 9.74 - 13.51(X_1) + 9.48(X_2) + 0.60(X_1X_2) + 3.98(X_1)^2 - 2.90(X_2)^2$ | 0.74 |
| hardness | $= - 1059.24 - 1419.65(X_1) + 3198.85(X_2) + 424.28(X_1X_2) + 360.83(X_1)^2 - 1117.41(X_2)^2$ | 0.95 |

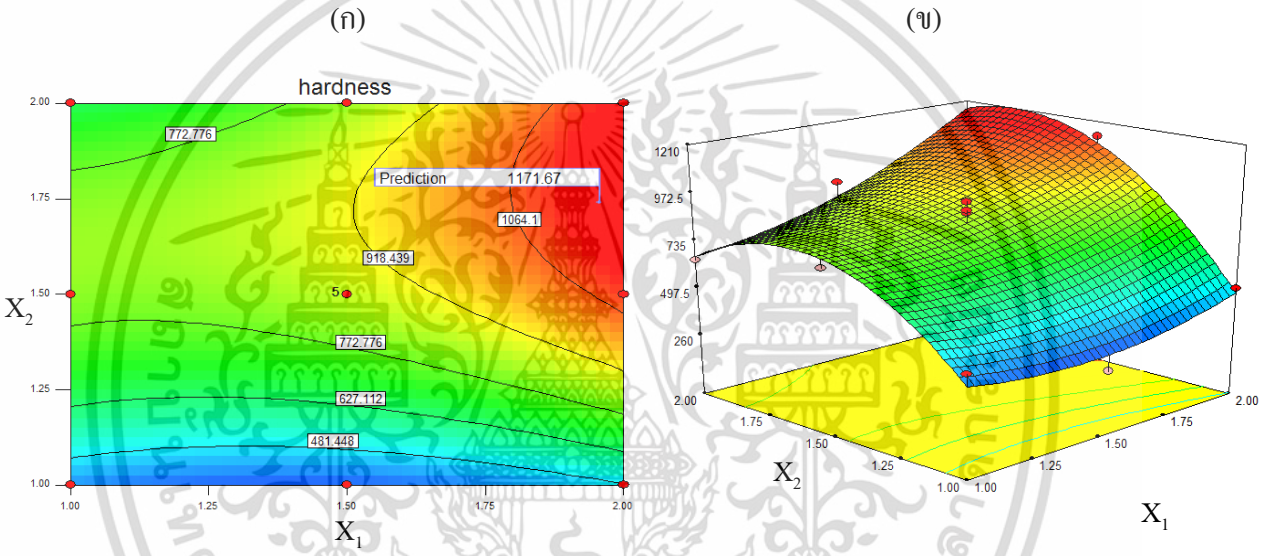
$X_1$ คือ ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต

$X_2$ คือ ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์

เมื่อนำข้อมูลของค่าตอบสนองของปัจจัย มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน เพื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.5 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ พบว่าข้อมูลที่ได้จากค่าน้ำหนัก ขนาด ค่าสีแดง และค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม ให้สมการ (model) ที่สามารถนำมาใช้ทำนายผลได้ เนื่องจากในแต่ละค่าสอบสนองข้างต้นมี lack of fit ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย (Coefficient, $R^2$) ของค่าตอบสนองอยู่ในช่วง 0.74 - 0.95 แสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะนำสมการ ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งเป็นสมการกำลังสอง (Quadratic model) มาใช้เพื่อทำนายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ที่มีผลต่อคุณภาพของเต้าหู้ทรงกลม และเมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นพบว่า ตัวแปรตอบสนองที่มีผลมากที่สุด คือ ค่าความแข็งของเต้าหู้ พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การอธิบายมีค่ามากที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 0.95 ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกสมการกำลังสองของตัวแปรด้านความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมไปใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม แสดงในภาพที่ 4.3 ซึ่งแสดงพื้นที่ผิวตอบสนอง และแผนภาพคอนทัวร์พล็อต พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้น การที่ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการขึ้นรูปทรงกลมมีพื้นฐานจากการอาศัยโซเดียมอัลจิเนต และไอออนของแคลเซียมในการเกิดเจล เมื่อความเข้มข้นของอัลจิเนต และความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้น กระบวนการเกิดเจลมีมากขึ้น (Xie และคณะ, 2003)




**ภาพที่ 4.3** แผนภาพคอนทัวร์พล็อต (ก) และแผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง 3 มิติ (ข) แสดงผลของโซเดียมอัลจิเนต ($X_1$) และแคลเซียมคลอไรด์ ($X_2$) ต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม

การทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ทรงกลม โดยการใช้เทคนิคพื้นที่ผิวตอบสนอง ในการทดลองนี้จะพิจารณาจากค่า Desirability ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นที่นักวิจัยสามารถกำหนดค่าคุณลักษณะตัวแปรตามที่ต้องการได้ เช่น สูงสุด ต่ำสุด หรืออยู่ในช่วงกำหนด (in range) (Derring และ Suich, 1980) โดยในการทดลองนี้กำหนดค่าคุณลักษณะของตัวแปรคือ ค่าความแข็งเท่ากับสูงสุด (maximize) และความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตกับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์อยู่ในช่วงที่กำหนด (ร้อยละ 1 - 2) ซึ่งจากการกำหนดช่วงของค่าตอบสนองสามารถทำนายจุดหรือพื้นที่ที่เหมาะสม (Optimization) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกลม เมื่อพิจารณาจากสภาวะที่ให้ค่าแข็งของเจลเต้าหู้ทรงกลมสูงสุด คือการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.96 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 โดยที่สภาวะนี้จะให้ค่า Desirability เท่ากับ 1 และให้ค่าความแข็งจากการทำนายเท่ากับ 1140.27 กรัม·แรง และเมื่อนำสภาวะนี้ไปทดลองทำเต้าหู้ทรงกลม ก่อนนำไปวิเคราะห์ค่าความแข็งพบว่า ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 1128±12.66 กรัม·แรง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนาย

**ตารางที่ 4.7** การทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการทำเต้าหู้ทรงกลม

| Response variable | Optimization of condition | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Goal | Lower | Upper | Weight | Predicted responses | Desirability |
| alginate | In range | 1 | 2 | 1 | 1.96 | 1 |
| calcium | In range | 1 | 2 | 1 | 1.59 | 1 |
| Hardness | Maximize | 260.73 | 1134.88 | 1 | 1140.27 | 1 |

### 4.3 ผลการศึกษาการยอมรับของเต้าหู้ทรงกลมโดยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส

การศึกษาการยอมรับของเต้าหู้ทรงกลมในการทดลองนี้ ทำโดยการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 1 ถึง 9 คะแนน (9 - point hedonic) จาก 1 (ไม่ชอบมากที่สุด) ถึง 9 (ชอบมากที่สุด) โดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน คุณลักษณะที่ประเมิณ คือ ลักษณะปรากฏ ขนาด เนื้อสัมผัส กลิ่นรส และความชอบโดยรวม และเพื่อทดสอบว่าสภาวะที่คัดเลือกจากสมการทำนายจากตารางที่ 4.7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกเต้าหู้ทรงกลมที่เตรียมจากสมการทำนาย 3 ตัวอย่างคือ ตัวอย่างที่ให้ค่าความแข็งมากที่สุด (hard) มีค่าความแข็ง 1201.40 กรัม·แรง ซึ่งได้จากการเลือกสภาวะที่เหมาะสม ตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่มีค่าความแข็งน้อย (soft) มีค่าความแข็ง 747.70 กรัม·แรง และตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่มีค่าความแข็งอยู่ในช่วงปานกลาง (medium) มีค่าความแข็ง 335.88 กรัม·แรง มาใช้ในการทดสอบทางประสาทสัมผัส ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ได้จากสมการทำนายสำหรับทั้ง 3 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.8** ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต ($X_1$) และความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ ($X_2$) ที่ได้จากสมการทำนายเพื่อใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส

| Sample | Alginate | $CaCl_2$ |
|---|---|---|
| | (%) | (%) |
| Hard | 1.96 | 1.59 |
| Medium | 1.26 | 1.37 |
| Soft | 1.36 | 1.00 |

**ตารางที่ 4.9** ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส (9 - point hedonic scale) ของเต้าหู้ทรงกลม

| Sample | Properties | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Appearance | Size | Texture | Flavor | Overall |
| Hard | 7.00±0.9$^{a}$ | 6.63±1.1$^{a}$ | 7.57±1.1$^{b}$ | 6.70±1.1$^{a}$ | 7.23±0.9$^{b}$ |
| Medium | 6.93±1.2$^{a}$ | 6.93±1.1$^{ab}$ | 7.20±0.6$^{b}$ | 6.70±1.1$^{a}$ | 6.90±1.0$^{ab}$ |
| Soft | 7.20±1.2$^{a}$ | 7.00±1.0$^{b}$ | 6.67±1.0$^{a}$ | 6.77±1.3$^{a}$ | 6.53±1.3$^{a}$ |

**หมายเหตุ :** $^{a-b}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่าเฉลี่ย ± SD (n = 30)

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเต้าหู้ทรงกลมทั้ง 3 ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ และด้านกลิ่นรสของทั้ง 3 ตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) อย่างไรก็ตามคะแนนด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ที่มีค่าความแข็งสูงสุด ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด 7.57 และได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด 7.23 จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่คัดเลือกจากสมการทำนายคือ โซเดียม-อัลจิเนตร้อยละ 1.96 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 ทำให้ได้เต้าหู้ทรงกลมที่ผู้ทดสอบยอมรับมากที่สุด โดยมีคะแนนความชอบรวมอยู่ที่ระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.4 ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลม**

ทดลองเตรียมเต้าหู้ทรงกลมโดยใช้โซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.96 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 บรรจุลงในกล่องพลาสติกที่ทำจากโพลิเอทธิลีน (Polyethylene: PE) กล่องละ 50 กรัม เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วัน วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณกรดทั้งหมด ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ปริมาณกรดทั้งหมด และปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาแตกต่างกัน

| Storage time (day) | pH | Total acidity (%) | Total Plate Count (colony/g) |
|---|---|---|---|
| 0 | 7.07±0.09$^{c}$ | 0.01±0.01$^{a}$ | ND |
| 3 | 7.04±0.01$^{b}$ | 0.01±0.01$^{ab}$ | ND |
| 6 | 7.02±0.02$^{b}$ | 0.02±0.00$^{abc}$ | ND |
| 9 | 6.07±0.03$^{b}$ | 0.02±0.01$^{bc}$ | ND |
| 12 | 6.95±0.04$^{b}$ | 0.03±0.00$^{c}$ | ND |
| 15 | 6.92±0.01$^{a}$ | 0.04±0.01$^{d}$ | ND |

**หมายเหตุ :** $^{a-c}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่าเฉลี่ย ± SD จากการทดลอง 3 ซ้ำ

ND หมายถึง ตรวจพบจำนวนจุลินทรีย์น้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม

จากตารางที่ 4.10 พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของเต้าหู้ทรงกลมมีแนวโน้มลดลงจาก 7.07 เป็น 6.92 สอดคล้องกับปริมาณกรดทั้งหมดที่คำนวณเทียบกับกรดแลคติค พบว่ามีปริมาณกรดเพิ่มขึ้น จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count; TPC) ที่ได้จากการวิเคราะห์ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเต้าหู้ทรงกลมเป็นเวลา 15 วัน ไม่พบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เต้าหู้หลอด (มอก. 1004 - 2533) ซึ่งจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน $5\times10^4$ โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม เพราะฉะนั้นอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลมที่ผ่านการให้ความร้อนแบบพาสเจอไรซ์ในการทดลองนี้สามารถเก็บรักษาได้อย่างน้อย 15 วัน

**4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม**

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีบางประการของเต้าหู้ทรงกลม แสดงในตารางที่ 4.11 เต้าหู้ทรงกลมมีปริมาณความชื้นร้อยละ 79.48 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 12.47 ปริมาณไขมันร้อยละ 3.12 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต 4.43 และปริมาณเถ้าร้อยละ 0.50 เมื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลมกับเต้าหู้แข็งที่ขายทางการค้าที่ได้จากการใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารตกตะกอนโปรตีน พบว่าปริมาณความชื้นของเต้าหู้ทรงกลมมากกว่าเต้าหู้แข็ง ปริมาณโปรตีนของเต้าหู้ทรงกลมจะมีปริมาณน้อยกว่า เนื่องมาจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเต้าหู้ทรงกลมมีน้ำเป็นองค์ประกอบมาก เป็นผลให้สัดส่วนขององค์ประกอบอื่นๆลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับเต้าหู้หลอด ซึ่งเป็นเต้าหู้ที่ไม่มีการเอาน้ำเวย์ออกที่รายงานโดย Vongprateep และPuechkamut (2001) พบว่าเต้าหู้ทรงกลมมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าเต้าหู้หลอด ซึ่งมีปริมาณโปรตีนเท่ากับร้อยละ 5.1

**ตารางที่ 4.11** องค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม

| Chemical composition | Tofu-ball | Coagulated tofu* |
|---|---|---|
| | g/100 g | g/100 g |
| moisture | 79.48±0.77 | 73.9±0.3 |
| protein | 12.47±0.05 | 15.2±0.3 |
| fat | 3.12±0.44 | 5.2±0.2 |
| carbohydrate | 4.43±0.20 | 5.1±0.2 |
| ash | 0.50±0.05 | 0.7±0.2 |

*calcium chlorides coagulated tofu (Oboh and Omotosho, 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.6 ผลการศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม**

การศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อการเกิดเจลของเต้าหู้ทรงกลม โดยทำการเติมแซนแทนกัม (xanthan gum) และผงบุก (konjac glucomannan) ลงในน้ำนมถั่วเหลืองในปริมาณร้อยละ 0.025 และ 0.05 ของน้ำหนักน้ำนมถั่วเหลือง ก่อนนำมาทดลองผลิตเป็นเต้าหู้ทรงกลมตามสภาวะเดียวกับที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 4.8) คือตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่มีค่าความแข็งมากที่สุด (hard) เต้าหู้ทรงกลมที่มีค่าความแข็งปานกลาง (medium) และเต้าหู้ที่มีค่าความแข็งน้อย (soft) นำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพแสดงในตารางที่ 4.12

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.12 การเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ลงไปในเต้าหู้ทรงกลม พบว่าเต้าหู้ทรงกลมมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น โดยฉพาะตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่มีค่าความแข็งน้อย (soft) (ภาพที่ 4.4) จากเดิมที่มีค่าความแข็ง 470.99 กรัม·แรง เมื่อเติมผงบุกในปริมาณร้อยละ 0.05 ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเป็น 881.73 กรัม·แรง ตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมที่มีค่าความแข็งมากที่สุด (hard) จากเดิมที่มีค่าความแข็ง 1201.40 กรัม·แรง เมื่อเติมผงบุกในปริมาณร้อยละ 0.05 ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมจะเพิ่มขึ้นเป็น 1366.20 กรัม·แรง การเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงไปในเต้าหู้ทรงกลม แล้วมีผลทำให้ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์โดยเฉพาะผงบุกประกอบด้วยกลูโคส และแมนโนส ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลมีความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำได้ จึงสามารถจับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น เจลจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Amerisen, 1997) (Banerjee และ Bhattacharya, 2011)

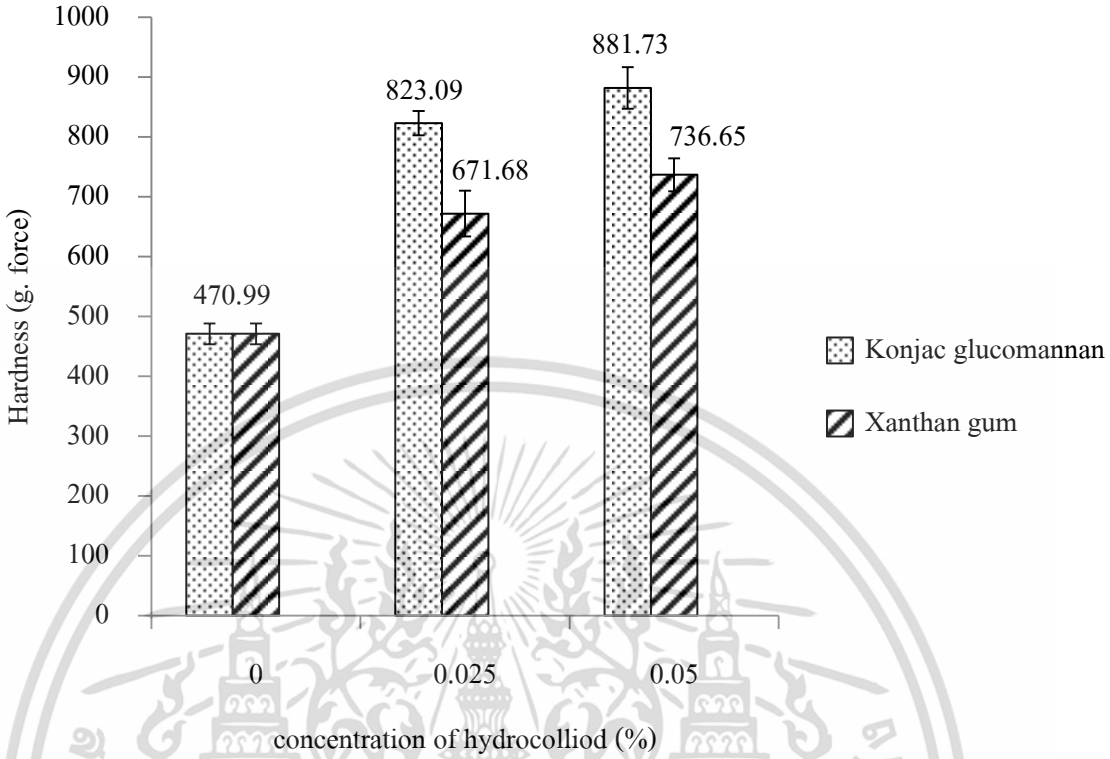
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.12** คุณลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ทรงกลมที่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์

| Condition | Size (mm) | Weight (g) | L | a | b | Hardness (g·force) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| hard | 14.88±0.10$^{f}$ | 2.3418±0.07$^{h}$ | 79.94±0.26$^{b}$ | 0.57±0.05$^{g}$ | 6.97±0.22$^{b}$ | 1201.40±23.69$^{j}$ |
| hard+0.025K | 14.69±0.13$^{e}$ | 2.0567±0.14$^{fg}$ | 79.51±0.26$^{a}$ | 0.74±0.06$^{h}$ | 5.93±0.19$^{a}$ | 1257.50±28.41$^{k}$ |
| hard+0.05K | 14.25±0.09$^{cd}$ | 2.0817±0.06$^{g}$ | 79.68±0.25$^{a}$ | 0.44±0.07$^{f}$ | 6.83±0.26$^{b}$ | 1366.20±27.98$^{l}$ |
| hard+0.025X | 14.13±0.06$^{c}$ | 2.0875±0.04$^{g}$ | 79.55±0.21$^{a}$ | 0.37±0.04$^{e}$ | 7.48±0.22$^{c}$ | 1176.80±20.04$^{j}$ |
| hard+0.05X | 14.64±0.23$^{e}$ | 1.9690±0.14$^{e}$ | 80.41±0.36$^{c}$ | 0.43±0.03$^{ef}$ | 7.28±0.21$^{c}$ | 1115.00±28.76$^{i}$ |
| medium | 14.78±0.19$^{ef}$ | 1.9726±0.08$^{ef}$ | 79.96±0.32$^{b}$ | 0.57±0.06$^{g}$ | 6.96±0.23$^{b}$ | 789.02±53.83$^{d}$ |
| medium+0.025K | 13.67±0.16$^{b}$ | 1.6360±0.05$^{b}$ | 83.40±0.24$^{h}$ | 0.27±0.13$^{cd}$ | 9.17±0.44$^{g}$ | 856.66±28.86$^{fg}$ |
| medium+0.05K | 14.20±0.25$^{cd}$ | 1.6582±0.09$^{b}$ | 83.82±0.19$^{i}$ | 0.31±0.07$^{d}$ | 9.70±0.22$^{h}$ | 900.91±28.79$^{h}$ |
| medium+0.025X | 14.10±0.27$^{c}$ | 1.8392±0.17$^{d}$ | 82.27±0.40$^{h}$ | 0.47±0.13$^{f}$ | 8.79±0.30$^{f}$ | 774.56±40.89$^{d}$ |
| medium+0.05X | 14.34±0.21$^{d}$ | 1.7874±0.10$^{d}$ | 83.46±0.10$^{h}$ | 0.43±0.08$^{ef}$ | 9.13±0.30$^{g}$ | 835.89±33.76$^{ef}$ |
| soft | 13.29±0.19$^{a}$ | 1.4878±0.08$^{a}$ | 81.09±0.19$^{d}$ | 0.14±0.03$^{a}$ | 8.30±0.31$^{e}$ | 470.99±17.35$^{a}$ |
| soft+0.025K | 13.66±0.20$^{b}$ | 1.7920±0.05$^{d}$ | 82.93±0.19$^{g}$ | 0.22±0.04$^{bc}$ | 8.77±0.22$^{g}$ | 823.09±20.29$^{e}$ |
| soft+0.05K | 13.67±0.10$^{b}$ | 1.7641±0.05$^{cd}$ | 82.51±0.19$^{f}$ | 0.20±0.07$^{ab}$ | 9.20±0.20$^{h}$ | 881.73±34.72$^{gh}$ |
| soft+0.025X | 13.69±0.15$^{b}$ | 1.8396±0.07$^{d}$ | 82.27±0.16$^{e}$ | 0.24±0.04$^{bc}$ | 7.93±0.19$^{d}$ | 671.68±38.13$^{b}$ |
| soft+0.05X | 13.60±0.07$^{b}$ | 1.6857±0.08$^{bc}$ | 82.62±0.16$^{f}$ | 0.20±0.06$^{ab}$ | 8.72±0.22$^{f}$ | 736.65±27.44$^{c}$ |

**หมายเหตุ :** $^{a\text{-}m}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าเฉลี่ย ± SD จากการทดลอง 3 ซ้ำ

X = xanthan gum, K = konjac glucumannan




**ภาพที่ 4.4** ผลของการเติมผงบุกและแซนแทนกัมต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม (soft) ที่เตรียมจากการใช้โซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.36 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.00

**4.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม**

การวิเคราะห์โครงสร้างภายใน (Microstructure) ของเต้าหู้ทรงกลมเพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของเต้าหู้หลอดทางการค้า ทำโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ ภาพที่ 4.5 แสดงโครงสร้างภายในของเต้าหู้หลอดทางการค้า ในขณะที่ภาพที่ 4.6 และ 4.7 แสดงโครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลมที่มีเนื้อสัมผัสแข็งและนิ่ม ตามลำดับ

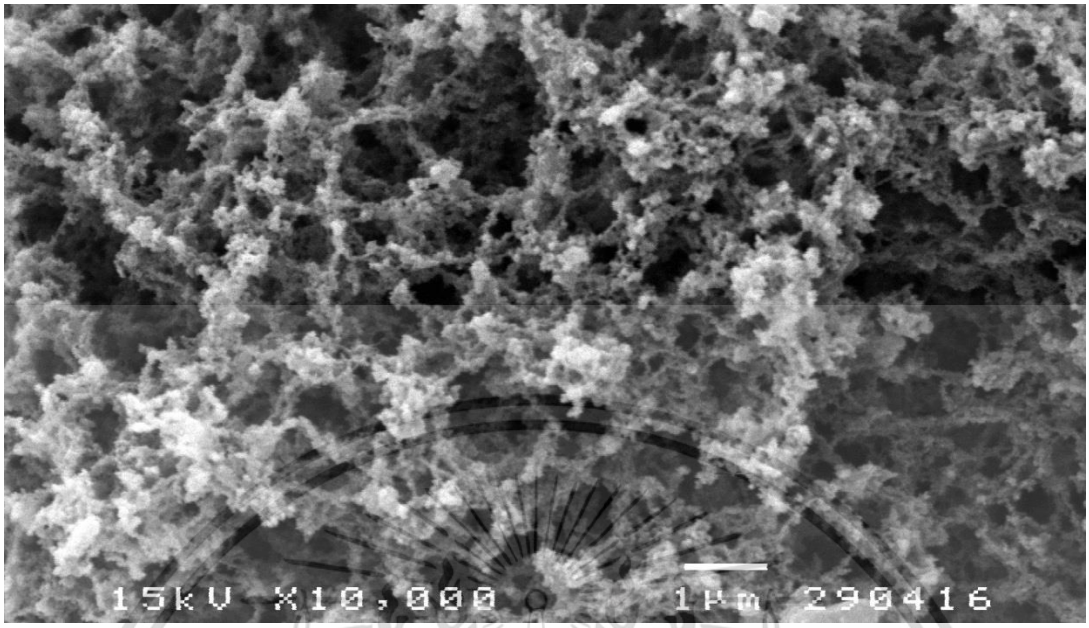
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.5 เจลของเต้าหู้หลอดมีลักษณะที่เกิดจากการเกี่ยวกันของอนุภาค (particle gel) เป็นการเกาะเกี่ยวกันของอนุภาคที่เป็นแบบกลุ่มก้อนของ random aggregate โดย aggregate เหล่านี้เกิดจากการให้ความร้อนเพื่อทำให้โปรตีนเสียสภาพบางส่วนก่อนเติมสารกลูโคโนเดลต้าแลคโตน ที่ช่วยทำให้ aggregate ของโปรตีนเกาะกลุ่มกัน ประสานจับกันเป็นโครงสร้างสามมิติที่สามารถกักเก็บโมเลกุลของน้ำไว้ภายใน (Fligner และ Mangino, 1989) ในขณะที่เจลของเต้าหู้ทรงกลม (ภาพที่ 4.6) จะเป็นโครงสร้างของเจลจากคาร์โบไฮเดรตเป็นหลัก โครงสร้างของเจลจะเกิดจากการเกาะเกี่ยวกันของโมเลกุล (macromolecular gel) ทำให้ได้โครงสร้างในลักษณะที่เป็นเส้นสายร่างแห (ปาริฉัตร, 2545) แคลเซียมไอออนที่เติมลงไปในน้ำนมถั่วเหลืองที่มีโซเดียมอัลจิเนต จะเข้าจับกับประจุลบในโครงสร้างของอัลจิเนตที่หมู่คาร์บอกซิลิคของกรดกลูโคนิค และหมู่ไฮดรอกซิลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กัน ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห (Yalpani, 1988)

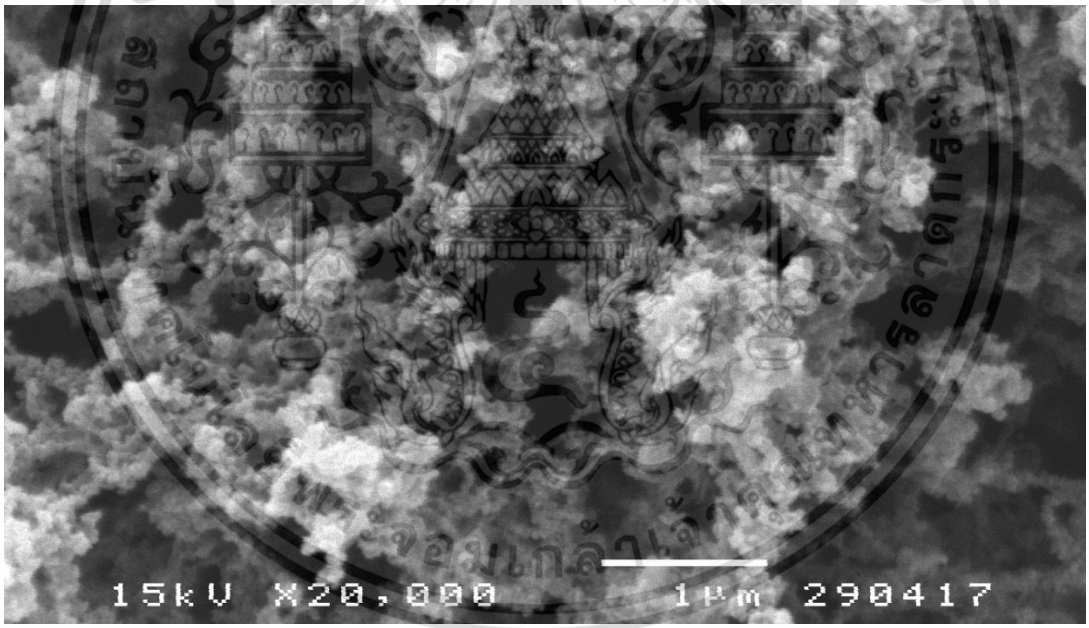
เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลมที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสต่างกัน พบว่าโครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลมที่มีเนื้อสัมผัสแข็ง (ภาพที่ 4.6) ที่เตรียมจากการใช้ปริมาณของอัลจิเนตที่สูง มีลักษณะเส้นสายที่จัดเรียงตัวกันแน่นมีช่องว่างระหว่างเส้นสายน้อย เกิดโครงสร้างเชื่อมต่อกันเป็นตาข่ายที่แน่นหนา ในขณะที่โครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลมที่มีเนื้อสัมผัสนิ่ม เมื่อดูที่กำลังขยาย 20,000 เท่า (ภาพที่ 4.7) จะพบว่าช่องว่างระหว่างเส้นสายมีขนาดใหญ่ การเกาะกันของเส้นสายพอลิแซ็กคาไรด์เป็นแบบหลวมๆ การเพิ่มความเข้มข้นของอัลจิเนต ทำให้อนุภาคจับกันได้มากขึ้น เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่แน่นกว่า จึงส่งผลให้ค่าความแข็งของเจลเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของเต้าหู้ทรงกลมที่ใช้โซเดียมอัลจิเนตอย่างเดียวกับที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นคือ ผงบุกร้อยละ 0.05 และแซนแทนกัมร้อยละ 0.05 พบว่า การเติมไฮโดร-คอลลอยด์โดยเฉพาะผงบุก ทำให้โครงสร้างร่างแหของเจลมีความหนาแน่นมากขึ้น ภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่าขนาดช่องว่างระหว่างเส้นใยของตัวอย่างเจลเต้าหู้ทรงกลมที่เติมผงบุก มีขนาดเล็กกว่าเจลเต้าหู่ทรงกลมที่ไม่ได้เติมผงบุก เป็นผลให้เมื่อเติมผงบุกลงในเต้าหู้ทรงกลม โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีเนื้อสัมผัสนิ่มเกิดโครงสร้างที่เกาะกันแน่นขึ้น เป็นผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(A)

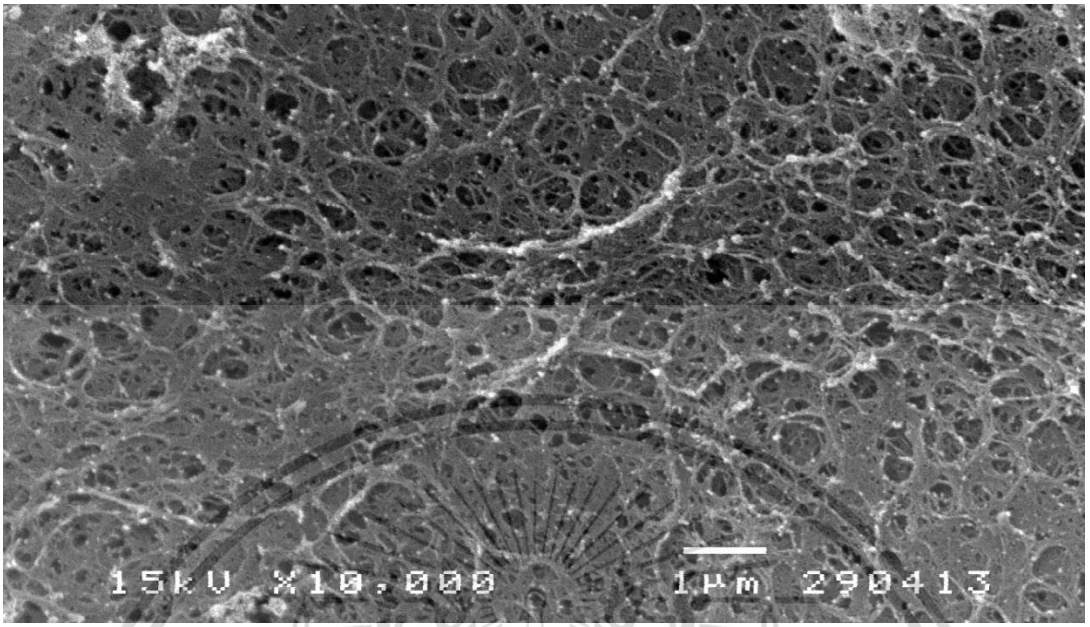



(B)

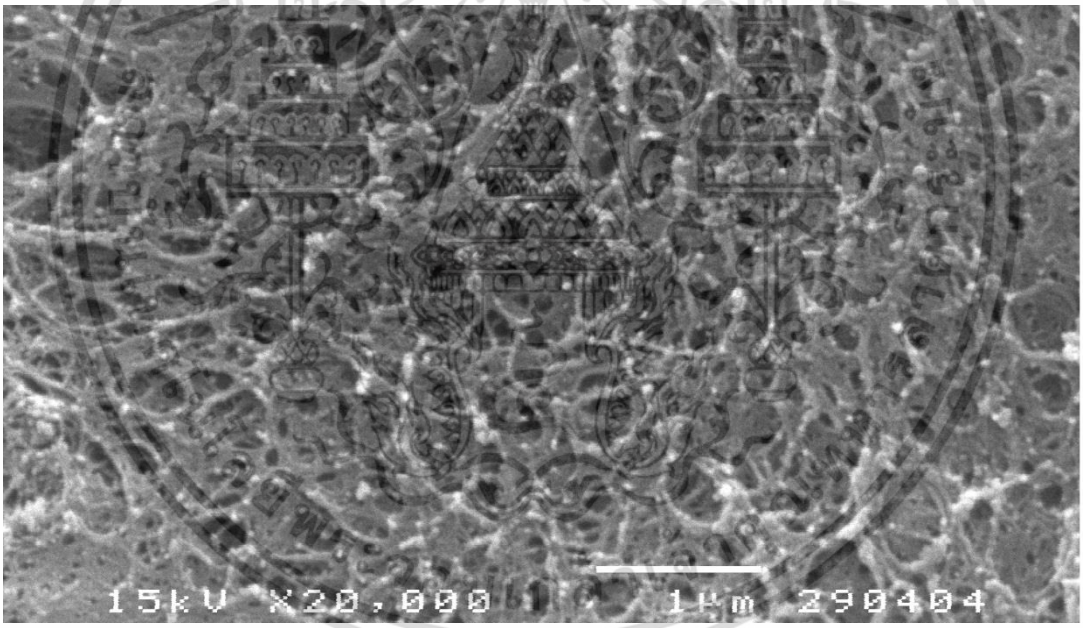
**ภาพที่ 4.5** แสดงโครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้หลอด ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(A)

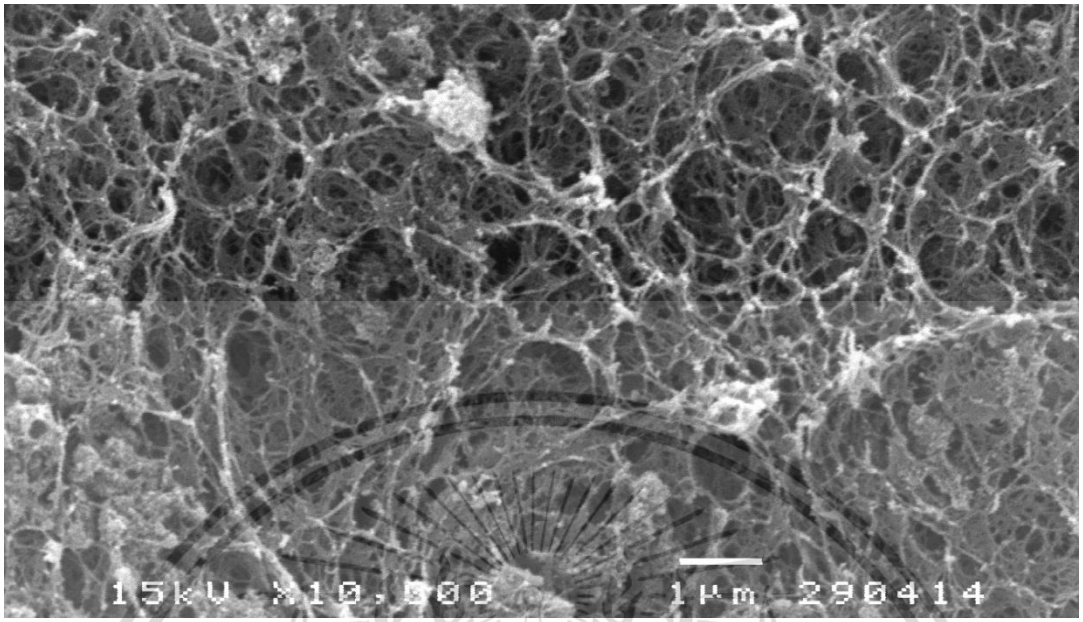



(B)

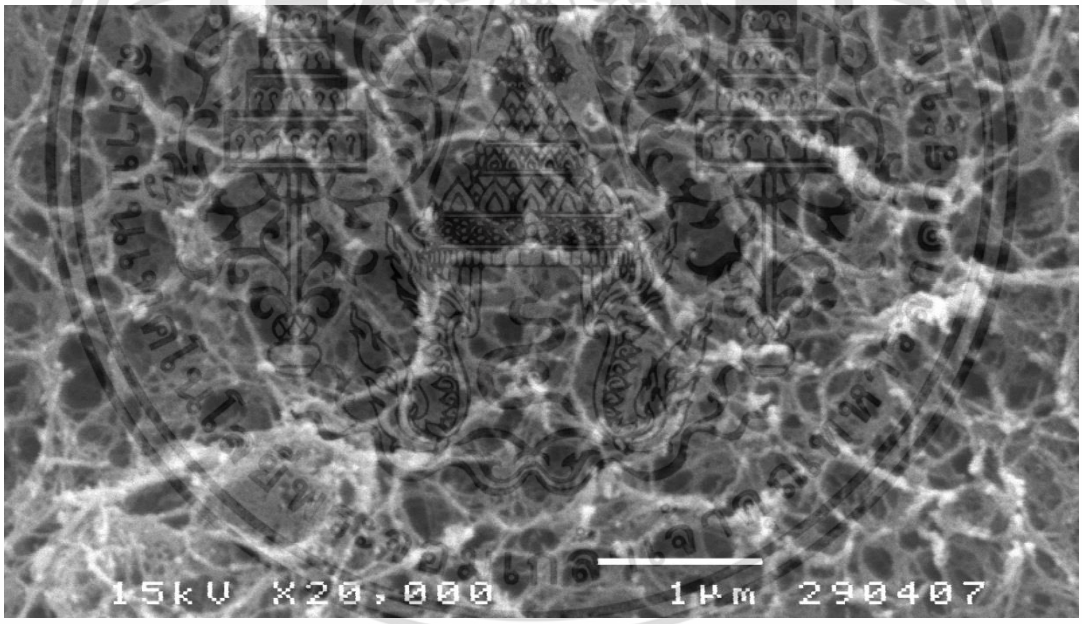
**ภาพที่ 4.6** แสดงโครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (hard) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.96 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(A)

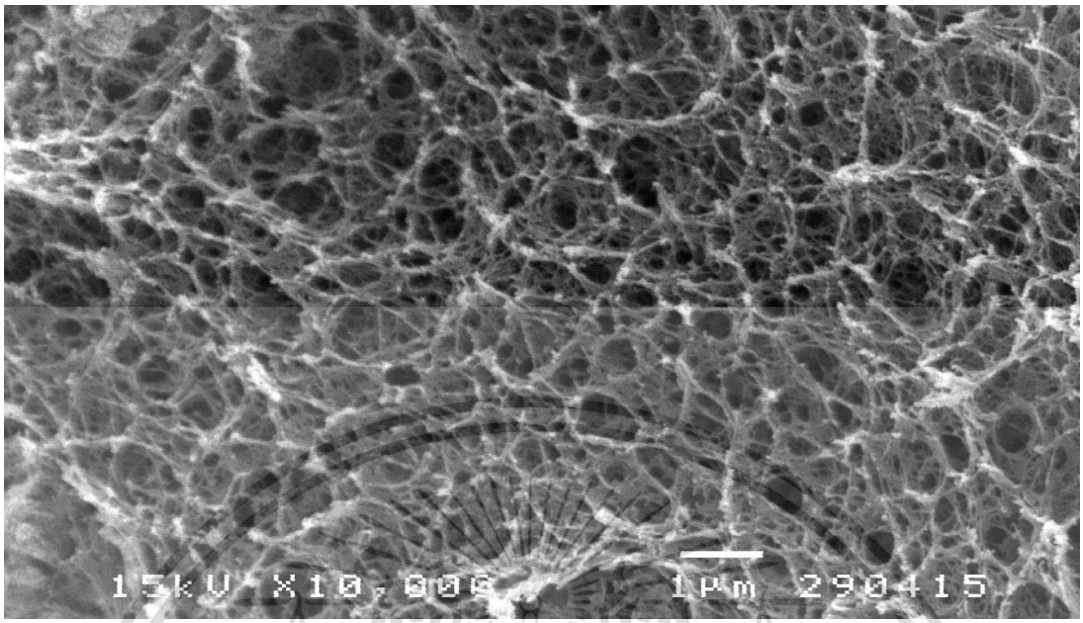



(B)

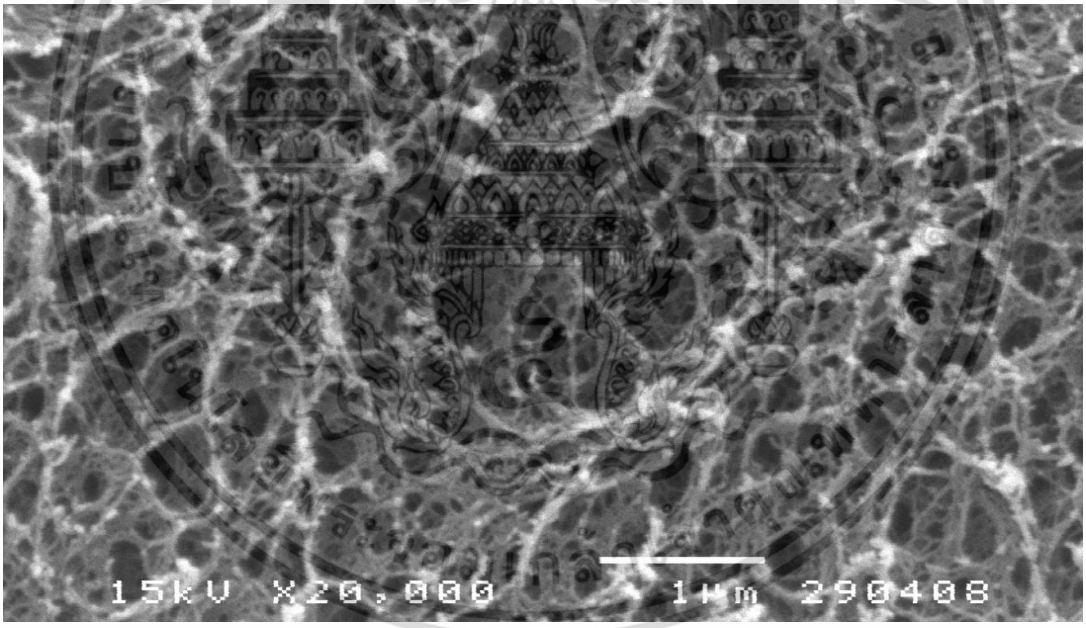
**ภาพที่ 4.7** แสดงโครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (soft) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต ร้อยละ 1.36 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.00 ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



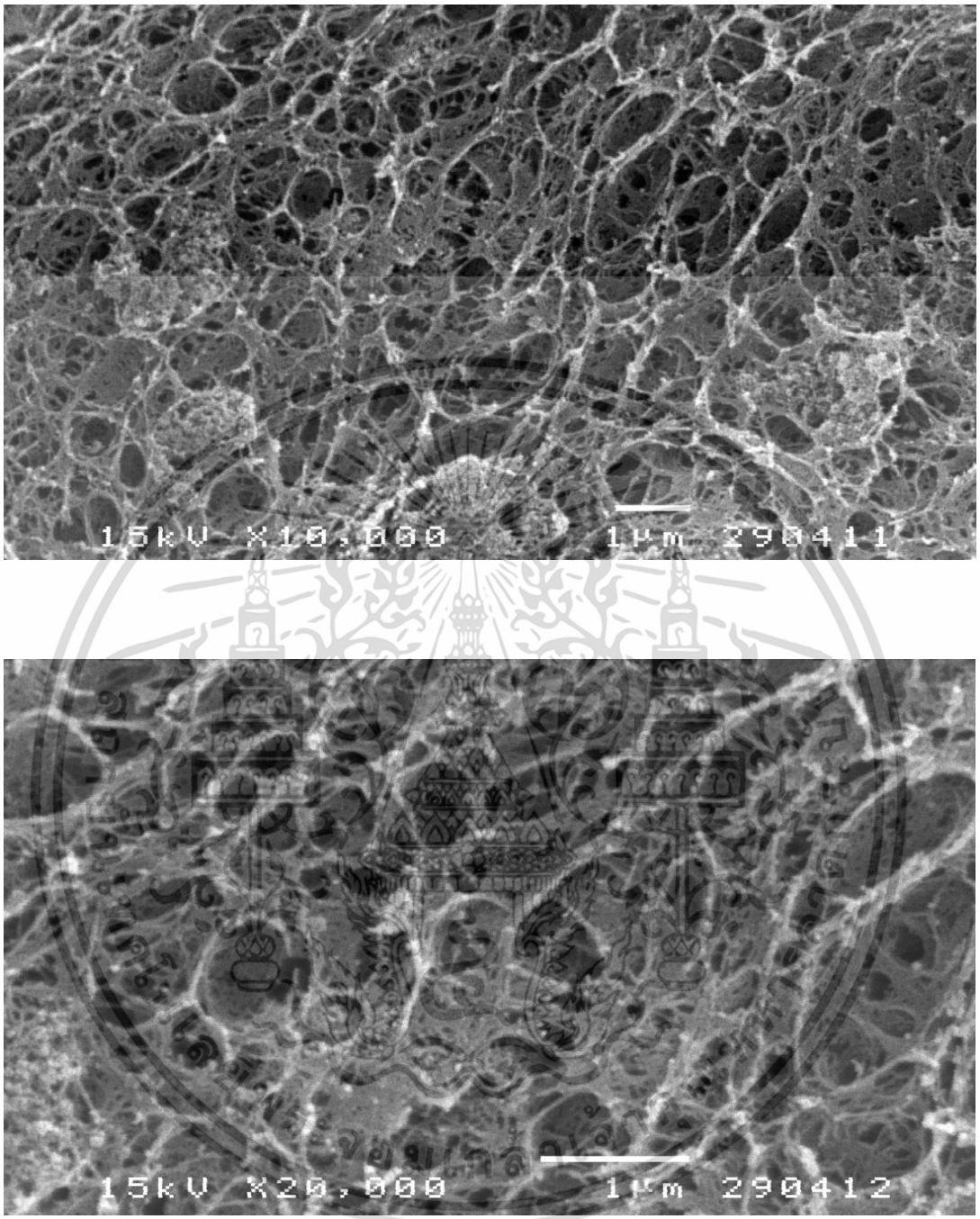

(A)




(B)

**ภาพที่ 4.8** แสดงโครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (soft) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.36 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.00 ร่วมกับการใช้ผงบุกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(A)

(B)

**ภาพที่ 4.9** แสดงโครงสร้างภายในของเจลเต้าหู้ทรงกลม (soft) เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.36 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.00 ร่วมกับการใช้แซนแทนกัม ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(A) กำลังขยาย 10,000 เท่า (B) กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง

1. ระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาด น้ำหนัก ค่าความสว่าง และค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการแช่ในน้ำเย็นเท่ากับ 12 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพที่วิเคราะห์เริ่มคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเวลาการแช่เพิ่มขึ้น

2. ความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ที่ระดับต่างกัน จะส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ทรงกลมแตกต่างกัน โดยภาพรวมเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียม-อัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ จะทำให้ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมเพิ่มขึ้น จากการศึกษาด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง พิจารณาจากค่าความแข็งของเจลที่สูงสุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้โซเดียมอัลจิเนตที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.96 และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 โดยที่ค่า desirability เท่ากับ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การอธิบาย ($R^2$) เท่ากับ 0.95 โมเดลนี้ได้ทำนายค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมเท่ากับ 1140.27 (กรัม·แรง) และเมื่อทำการทดสอบสมการตามสภาวะ ดังกล่าวข้างต้น จะได้ค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลมเท่ากับ 1128.68 (กรัม·แรง)

3. ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเต้าหู้ทรงกลม พบว่าเต้าหู้ทรงกลมได้รับคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ 7.00 ด้านขนาด 6.63 ลักษณะเนื้อสัมผัส 7.57 กลิ่นรส 6.70 และคะแนนความชอบโดยรวม 7.23 อยู่ในช่วงชอบปานกลาง

4. ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลม โดยทำการเก็บรักษาในกล่องพลาสติกที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลา 15 วัน พบว่าไม่พบการเจริญของจุลินทรีย์ ดังนั้นเต้าหู้ทรงกลมสามารถเก็บรักษาได้อย่างน้อย 15 วัน

5. ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้ทรงกลม พบว่าเต้าหู้ทรงกลมมีปริมาณความชื้นร้อยละ 79.48 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 12.47 ปริมาณไขมันร้อยละ 3.12 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 4.43 และปริมาณเถ้าร้อยละ 0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การเติมผงบุก และแซนแทนกัม ทำให้ลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ทรงกลมเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะผงบุก เมื่อเติมลงในเต้าหู้ทรงกลมทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โครงสร้างมีความแน่นขึ้น และทำให้ช่องว่างของโครงสร้างภายในเล็กลง

7. ผลการศึกษาโครงสร้างภายในของเต้าหู้หลอดทางการค้ากับเต้าหู้ทรงกลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด พบว่าโครงสร้างของเจลเต้าหู้หลอด เป็นโครงสร้างที่ได้จากการเกาะเกี่ยวกันของอนุภาค (particle) เกิดจากการเกาะเกี่ยวกันของอนุภาคเป็นแบบกลุ่มก้อนของโปรตีน (random aggregation) ขณะที่โครงสร้างเจลของเต้าหู้ทรงกลม จะเกิดจากการเกาะเกี่ยวกันของโมเลกุลคาร์โบไฮเดรต (macromolecule gel) ทำให้เห็นโครงสร้างในลักษณะที่เป็นเส้นสายยาวๆ จับกันเป็นร่างแห

**ข้อเสนอแนะ**

1. ศึกษาผลของการให้ความร้อนแบบสเตอริไรซ์ต่อคุณภาพของเต้าหู้ทรงกลม เพื่อเป็นการเพิ่มอายุการเก็บรักษาของเต้าหู้ทรงกลม
2. ทำการทดสอบผู้บริโภค (consumer test) เพื่อศึกษาการยอมรับของผู้ชิมว่ายอมรับผลิตภัณฑ์เต้าหู้ที่มีรูปแบบใหม่ และลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างไปจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม


กองโภชนาการ. 2544. **คุณค่าทางโภชนาการของอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กองโภชนาการ. กรมอนามัย. กระทรวงสาธาณสุข. กรุงทพฯ. 103 หน้า.

กองโภชนาการ. 2547. **ปริมาณแคลเซียมในอาหารไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กองโภชนาการ. กรมอนามัย. กระทรวงสาธาณสุข. กรุงทพฯ. 44 หน้า.

จันทร วรากุลเทพ, อัจฉรา กลีบงาม, วัชระ การไกล, ฉัตรแก้ว เกล้ารัตนา, ปทุมรัตน์ บัวแย้ม, และ วันทา ยิ้มสุข. 2546. **เต้าหู้อาหารเพื่อสุขภาพ** เพชรกะรัตสติวดิโอ. กรุงเทพฯ.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2557. **เคมีอาหาร**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ. 487 หน้า.

น้ำทิพย์ วงษ์ประทีป. 2541. **การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตและคุณภาพของเจลโปรตีนถั่วเหลือง**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

น้ำทิพย์ วงษ์ประทีป และยุพร พืชกมุทร. 2544. **ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเจลโปรตีนของเจลเต้าหู้หลอด**. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงทพฯ. 9(2): 7-12.

บุบผา เตชุภัทรพร. 2535. **การสกัดผงบุกจากหัวบุกและการเตรียมผลิตภัณฑ์เจล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 105 หน้า.

ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. **เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 121 หน้า.

ปาริฉัตตก์ ใจคำ. 2548. **ผลของวิธีการเตรียมต่อคุณภาพของน้ำนมถั่วเหลือง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ. 76 หน้า.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รุ่งนภา วิสิฐอุดมการ และ Miyawaki, O. 2541. **ผลของความเข้มข้น อุณหภูมิ และซูโครสต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกระแสวิทยาของสารละลายแอลจิเนต**. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. หน้า 1-13.

วรรณา ตุลยธัญ. 2549. **เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต.** พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 166 หน้า.

ศิวาพร ศิวเวชช. 2546. **วัตถุเจือปนอาหาร (เล่ม 1)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ, นครปฐม. 380 หน้า.

สมชาย ประภาวัต. 2535. **เทคโนโลยีการทำแป้งถั่วเหลืองจากถั่วเหลือง**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 61 หน้า.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2533. **เต้าหู้หลอด**. มอก. 1004-2533.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2533. **น้ำนมถั่วเหลือง**. มอก. 1018-2533.

สุมาลี ทองแก้ว และ วลัยทิพย์ สายชลวิจารณ์. 2541. **ถั่วเหลือง พืชมหัศจรรย์ของแผ่นดิน**. สำนักพิมพ์หมอชาวบ้าน. กรุงเทพฯ. 45 หน้า.

ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่ สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมส่งเสริมการเกษตร. 2530. **ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60**

อนุวัตร แจ้งชัด. 2552. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 136 หน้า.

อภิพรรณ พุกภักดี. 2546. **ถั่วเหลือง:พืชทองของไทย**. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

อาณดี นิติธรรมยง และประไพศรี ศิริจักรวาล. 2543. **ถั่วเหลืองกับสุขภาพ**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 13 หน้า.

Ana, B., Manuel, M. and Domingo, C.1999. **Formation of calcium alginate gel capsules: Influence of sodium alginate and $CaCl_2$ concentration on gelation kinetics**. Journal of Bioscience and Bioengineering. 88:686-689

AOAC. 2012. Official Method of Analysis of AOAC International. 19th ed. Washington, D.C., U.S.A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Armisen, R. 1997. **Agar**. In Imeson A. (Ed.) Thickening and Gelling Agents for Food. Great Britain : St Edmundsbury Press, Bury St Edmunds, Suffolk: 1-20.

Banerjee, S. and Bhattacharya, S. (2011). **Compressive textural attributes, opacity and syneresis of gels prepared from gellan, agar and their mixtures**. Journal of Food Engineering. 102 : 287-292.

Cai, T.D. and Chong, K.C. 1997. **Dry tofu characteristics affecting by soymilk solid content and coagulation time.** Journal of Food Quality. 20:391-402.

Casas, J.A., Santos, V. and García-Ochoa., F. 2000. **Xanthan gum production under several operational conditions: molecular structure and rheological properties**. Enzyme and Microbial Technology. 26: 282-291.

Chan.L.W., Jin.Y., Heng.P.W.S. 2002. **Cross-linking mechanisms of calcium and zinc in production of alginate microspheres.** International Journal of Pharmaceutics. 242:255-258.

Charalambous, G. and Doxastakis, G. 1989. **Food Emulsifier : Chemistry, Technology, Functional Properties and Application**. Elsevier, Amsterdam. 570 pages.

Derringer, G. and R. Suich, 1980. **Simultaneous Optimization of Several Response Variables**. Journal of Quality Technology. 12: 214-219.

Enrique, J.M. and Rubiolo, A.C. 2003. **Crosslinking kinetic of cation - hydrocolliod gels**. Chemical Engineering Journal. 94: 73-77.

Fundueanu, G., C. Nastruzzi, A. Carpov, J. Desbrieres and M. Rinaudo. 1999. **Physico - chemical characterization of Ca-alginate microparticles produced with different methods**. Biomaterials. 20: 1427-1435.

Fligner, K.L. and Mangino, M.E. 1989. **Relationship of Composition to Protein Functionality In Parris, N. and Barford, R. (Eds.). Interactions of Food Protein**. Washington, D.C.: American Chemical Society: 1-12.

George.R.S.,David.O. 1994. **Alginates and gellan gum: Complementary gelling agents**. Food Hydrocolloids.83-89.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Glicksman, S. 1983. **Food Hydrocolloids**. volume . 2. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Harington, J. 1965. **The Desirability Function. Industrial Quality Control**. 21: 494-498.

Herrera M.G, Lozano-Esquivel I.E, Ponce de León-Ramírez Y.R, Martínez-Padilla L.P. 2012. **Effect of added calcium chloride on the physicochemical and rheological properties of aqueous mixtures of sodium caseinate/sodium alginate and respective oil-in-water emulsions**. Food Hydrocolloids. 29: 175-184.

Imeson, A. 1997. **Thickening and Gelling Agents for Food**. 2nd edition. Blackie Academic & Professional, London, UK. 320 pages.

Lazic, Z. R. 2004. **Design of Experiments in Chemical Engineeing-A Practical Guide**. 1st edition. WILEY-VCH, Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim.

Lee P., Rogers M.A. 2012. **Effect of calcium source and exposure-time on basic caviar spherification using sodium alginate.** International Journal of Gastronomy and Food Science. 1: 96-100.

LeRoux M. A., Farshid G., and Lori A. S. 1999. **Compressive and shear properties of alginate gel: effects of sodium ions and alginate concentration.** Journal of biomedical materials research. 47: 46-53.

Liu, K. 1997. **Soybean : Chemistry, Technology, and Utilization**. New York : Chapman & Hall.

Liu, Z., Chang S.K.C., and Tatsumi E. (2004). **Effect of selective thermal denaturation of soybean protein on soymilk viscosity and tofu's physical properties**. Food Research International. 37 : 815-822.

Mandala, I.G., Savvas, T.P and Kostaropoulos, A.E. 2004. **Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce.** Journal of Food Engineering. 64: 335-342.

Myers, R., Montgomery, D.C. and Cook, C.M.A. 2009. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 3rd edition. John Wiley & Sons, New Jersey. 704 pages.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Myhrovold, N., Chris, Y., and Maxime, B. 2011. **Modernist cuisine: The art and science of cooking, volume 4 ingredients and preparation.** Bellevue: The cooking lab. USA. 2439 pages.

Navarro, V., Gema, S., Dani, L., Andoni, L.A., and Josune, A. 2012. **Cooking and nutritional science: Gastronomy goes further.** International Journal of Gastronomy and Food Science. 1: 37-45. 262 pages.

Norman, A.G. 1978. **In Soybean Physiology, Agronomy and Utilization.** Academic Press. New York.

Nussinovitch, A. 1997. **Hydrocolloid Application; Gum technology in the food and other industries**. 1st edition. Blackie academic & professional. United Kingdom. 354 pages.

Oboh, G. and Omotosho, O. E. 2005. **Effect of types of coagulant on the nutritive value and in vitro multienzyme protein digestibility of tofu**. Journal of Food Technology. 3:182-187.

Obatolu, V.A. 2008. **Effect of different coagulants on yield and quality of tofu from soymilk**. European Food Research and Technology. 226: 467-472.

Onsoyen, E. 1997. **Alginates**. In Thickenning and Gelling Agent for Food. 2nd edition. Blackie Academic & Professional. 22-44.

Puechkhamut, Y. 2004. **Effect of salts that minimized beany flavor on the gelation of soy protein**. Proceedings of the 1st KMITL international conference: Integration science and technology for sustainable development. 2: 371-374. Bangkok.

Rousseau, I., Cerf, D.L., Picton, L., Argillier, J.F. and Muller, G. 2004. **Entrapment and release of sodium polystyrene sulfonate (SPS) from calcium alginate gel beads.** European Polymer Journal. 40: 2709-2715.

Sun, N. and Breene, W. 1991. **Calcium Sulfate Concentration influence on yield and quality of tofu from five Soybean Varities**. Journal of Food science. 56 : 1604-1607.

Thanh, V.H. and Shibasaki, K. 1978. **Major or Protein of Soybean Seeds: Subunit Stracture of β-conglycinin**. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 26(3): 692-695.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tung, M.A. and Jones, L.J. 1981. **Microstructure of mayonnaise and salad dressing**. Scanning Electron Microscopy. 3: 523-530.

Vongprateep, N. and Puechkamut, Y. 2001. **Factors affecting the quality of packaged tofu: Part I Bean varieties, soaking method and gelling temperature.** Journal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 9:1 18-24.

Xie, Z.P., Wang Jia, X.Y. and Huang, Y. 2003. **Ceramic forming based on gelation principle and process of sodium alginate**. Materials Letters. 57: 1635-1641.

Yalpani, M. 1988. **Polysaccharides: Systheses, Modifications and Structure/Property Relations (Studies in Organic Chemistry)**. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, the Netherlands. 427 pages.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก**

# การวิเคราะห์ทางกายภาพ

## ก-1 การวัดสี (Chroma meter; Minolta CR - 400, Japan)

1.1) นำเต้าหู้ทรงกลม มาผ่าครึ่งเป็น 2 ส่วน

1.2) ปรับมาตรฐานเครื่อง (Calibration) โดยใช้แผ่นสีขาวมาตรฐาน (White blank; L = 97, $a^*$ = -0.18, $b^*$ = 1.84)

1.3) นำเครื่องวัดค่าสีมาแนบกับตัวอย่างและวัดค่า ทั้งหมด 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของการวัด

1.4) บันทึกค่าสีในค่า $L^*$ $a^*$ และ $b^*$ โดยค่า

| | |
|---|---|
| $L^*$ คือ ค่าความสว่าง | มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 |
| $a^*$ คือ ค่าสีแดงและสีเขียว | เมื่อ $a^*$ มีค่าเป็นบวกเป็นสีแดง |
| | เมื่อ $a^*$ มีค่าเป็นลบเป็นสีเขียว |
| $b^*$ คือ ค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน | เมื่อ $b^*$ มีค่าเป็นบวกเป็นสีเหลือง |
| | เมื่อ $b^*$ เป็นค่าลบเป็นสีน้ำเงิน |

ก่อนการวัดสีทุกครั้งต้องปรับมาตรฐานเครื่อง (Calibration) โดยใช้แผ่นสีขาวมาตรฐาน (White blank; $L^*$ = 97, $a^*$ = -0.18, $b^*$ = 1.84) แล้วจึงวัดสีของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก-2 การวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer

นำตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลม จำนวน 10 ชิ้นมาวัดลักษณะเนื้อสัมผัสโดยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA-xt.plus โดยใช้หัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร (P/35R) เป็นระยะ (stain) ร้อยละ 50 วิเคราะห์ค่าที่วัดได้ด้วยโปรแกรม Texture profile analysis ปรับความเร็วการเคลื่อนที่ของ Load cell ดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| Pre-Test Speed | : | 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที |
| Test Speed | : | 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที |
| Post-Test Speed | : | 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที |

**ภาพที่ ก-2** แสดงการวัดลักษณะเนื้อสัมผัส

รายงานผลค่าความแข็งแรง (hardness) ของเต้าหู้ทรงกลมในหน่วยกรัม.แรง ทดสอบในรูปแบบ compression กำหนดการเคลื่อนที่ของหัววัดเป็น return to start

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข**

# การวิเคราะห์ทางเคมี

## ข-1 การวิเคราะห์หาความชื้น (AOAC, 2012)

**อุปกรณ์**

1) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2) อลูมิเนียม แคน (aluminium can)

3) ตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้

4) โถดูดความชื้น (desiccator)

5) ที่คีบ (Tong)

**วิธีการทดลอง**

1) นำ aluminium can อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง นำ aluminium can ใส่โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (4 ตำแหน่ง)

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลม 3 - 5 กรัม (ทำ 3 ซ้ำ) โดยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง โดยเปิดฝา aluminium can ไว้ เมื่อครบเวลาปิดฝาทำให้เย็นใน desiccator

3) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่อบ คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น ดังสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักสด} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักสด}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข-2 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2012)

**อุปกรณ์**

1) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2) ถ้วยกระเบื้อง (crucible)

3) เตาเผาไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิได้ (furnace muffle)

4) Hot plate

5) ที่คีบ (Tong)

**วิธีการทดลอง**

1) เผาถ้วยกระเบื้องที่แห้งและสะอาดในเตาเผาที่ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักละเอียด บันทึก

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3 - 5 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง

3) เผาตัวอย่างบน hot plate (ทำในตู้ดูดควัน) จนหมดควัน

4) นำไปเผาที่ 600 องศาเซลเซียส 8 ชั่วโมง จนกระทั่งตัวอย่างกลายเป็นสีขาวหรือสีเทา

5) คีบถ้วยกระเบื้องจากเตาเผา ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักของถ้วยกระเบื้องหลังเผา

<u>การคำนวณ</u>

$$\text{เปอร์เซ็นต์เถ้า} = \frac{b-a}{w} \times 100$$

$b$ = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องกับน้ำหนักเถ้าหลังเผา

a = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง

w = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข-3 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (AOAC, 2012)

**อุปกรณ์**

1) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2) Kjeldahl flask

3) เครื่องย่อยและเครื่องกลั่นไนโตรเจน

4) บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

5) Erlenmeyer flask ขนาด 250-500 มิลลิลิตร

6) Boiling chip ขนาด 2 เม็ด

**สารเคมี**

1) กรดซัลฟูริกเข้มข้น

2) กรดบอริกร้อยละ 2

3) สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.1 หรือ 0.01 N

4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 32

5) ตัวเร่ง (catalyst) (เตรียมจาก 1:8 ของ $CuSO_4/K_2SO_4$)

6) สารละลายอินดิเคเตอร์

เตรียมร้อยละ 0.1 Bromocresol green ใน alcohol ร้อยละ 95

เตรียมร้อยละ 0.1 Methyl red ใน alcohol ร้อยละ 95

นำร้อยละ 1 Bromocresol green จำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับร้อยละ 0.1 Methyl red จำนวน 1 มิลลิลิตร

**วิธีการทดลอง**

1) ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม เติมตัวเร่ง 10 กรัม เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 25 มิลลิลิตร ใส่ boiling chip 2-3 ลูก ใส่ในหลอดย่อยโปรตีน

2) นำหลอดย่อยโปรตีนไปประกอบเข้ากับเครื่องย่อย จนได้สารละลายใสหรือสีฟ้าใส โดยปล่อยให้เครื่องดูดควันจนหมด ทิ้งไว้ให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) นำหลอดตัวอย่างที่ย่อยแล้วมาต่อเข้ากับเครื่องกลั่นโปรตีน จากนั่นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 32 กับน้ำกลั่น ใช้กรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นตัวจับแอมโมเนีย ตวงกรดบอริก ร้อยละ 2 ปริมาณ 60 มิลลิลิตร ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร หยด mixed indicator 2-3 หยด จะได้สารสีส้มแดงใส รอจนกลั่นเสร็จ

4) นำ Erlenmeyer flask หลังจากกลั่นเสร็จที่มีสารละลายกรดบอริกกับแอมโมเนียซึ่งมีสีฟ้าใสมาไตเตรทกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 หรือ 0.01 N จนสารละลายเปลี่ยนไปเป็นใสไม่มีสี บันทึกปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้

5) การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในตัวอย่าง

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน} = \frac{(A-B)\times N\ HCL\ \times 14}{Wt.sample\ \times 1000} \times 100$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน} = \text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน} \times 6.25$$

เมื่อ A = ปริมาณของสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตรเตรทกับตัวอย่าง

B = ปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไตรเตรทกับ Blank

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข-4 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2012)

**อุปกรณ์**

1) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

2) เครื่องสกัดซอกซ์เล็ต (Soxhlet apparatus) พร้อมทิมเบิล (thimble) และบีกเกอร์ไขมัน

3) ตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้

4) โถดูดความชื้น (desiccator)

5) ที่คีบ (Tong)

6) Boiling chip ขนาด 2 เม็ด

**สารเคมี**

1) ปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือด 40 - 60 องศาเซลเซียส

**วิธีการทดลอง**

1) อบบีกเกอร์ไขมันพร้อมกับ boiling chip ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

2) ชั่งตัวอย่างที่อบไล่ความชื้นแล้วประมาณ 2 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ทำการห่อด้วยกระดาษกรอง ใส่ในทิมเบิล (extraction thimble) ตวงตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์จำนวน 180 มิลลิลิตร ใส่ในบิกเกอร์ไขมัน ต่อทิมเบิลที่ใส่ตัวอย่างและบีกเกอร์ไขมันเข้ากับเครื่องสกัดไขมัน ทำการสกัดไขมันตามโปรแกรมของเครื่อง เมื่อครบเวลานำบีกเกอร์ไขมันไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยปิโตรเลียมอีเทอร์ออก ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักบิกเกอร์ คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไขมันในตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักของบีกเกอร์หลังสกัด} - \text{น้ำหนักของบีกเกอร์ก่อนสกัด}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข-5 การวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมด (AOAC, 2012)

**1. การเตรียมสารเคมี**

1.1 สารละลาย NaOH มาตรฐาน การเตรียมสารลาย NaOH 0.1 นอร์มอล (โดยประมาณ) ชั่ง NaOH 2 กรัม ละลายในน้ำ กลั่น 500 มิลลิลิตร นำ ไป standardize ด้วยสารละลายมาตรฐาน potassium phathalate ($KHC_8H_4O_4$)

วิธี standardize สารละลาย NaoH ทำโดยละลาย $KHC_8H_4O_4$ ที่ผ่านการอบแห้งที่ 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และทำให้เย็นใน Desiccator ปริมาณ 0.6000-0.7000 กรัมในน้ำกลั่น 50 - 70 มิลลิลิตร หยดสารละลาย phenolphthalein 1% ในสารละลาย $KHC_8H_4O_4$ จำนวน 2 หยด นำไปไตเตรตกับสารละลาย NaOH ที่บรรจุในบิวเรต จนกระทั่งสารละลายมีปฏิกิริยาเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพูอ่อนที่คงตัว โดยทำการไตเตรต 3 ครั้ง บันทึกปริมาตรของสารละลาย NaOH ที่ใช้

$$\text{Normality ของ NaOH} = \frac{\text{จำนวนกรัม } KHC_8H_4O_4 \times 1000}{\text{มิลลิลิตร NaOH} \times 204.229}$$

1.2 สารละลาย phenolphthalein 1%

ละลาย phenolphthalein 1 กรัม ใน เอทานอล 95% จำนวน 100 มิลลิลิตร

**2. วิธีวิเคราะห์**

2.1 ตวงน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 350 มิลลิลิตร เติมสาระลาย phenolphthalein 2-3 หยด

2.2 ไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH จนได้สีชมพูจางๆ บันทึกปริมาตรของสารละลาย NaOH ที่ใช้ซึ่งเป็นค่า blank

2.3 ชั่งตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมด้วยเครื่องชั่งละเอียดน้ำหนักประมาณ 5 กรัมลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นประมาณ 30 มิลลิลิตร ปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียดประมาณ 1 นาที เพื่อให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน ล้างเครื่องปั่นด้วยน้ำกลั่นอีก 20 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ใบเดิม หยดสารละลาย phenolphthalein 2-3 หยด

2.4 ไตเตรตด้วยสารละลาย NaOH จนได้สีชมพูจางๆ บันทึกปริมาตรของสารละลาย NaOH ที่ใช้โดยทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

2.5 คำนวณการปริมาณกรดทั้งหมดในตัวอย่างอาหารดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดแลคติก (ร้อยละ)} = \frac{(V)(N)(eq.wt)(100)}{(1000)(v)}$$

เมื่อ V = ปริมาณของสารละลายมาตรฐาน NaOH

N = Normality ของสารละลายมาตรฐาน NaOH

v = ปริมาณของตัวอย่าง (5 กรัม)

eq.wt = น้ำหนักสมมูลของกรดเป็นกรัม (กรดแลคติกเท่ากับ 90 กรัม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค**

# การตรวจวัดปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด

## 1. การเตรียมตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

เตรียมตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลม จากนั้นใช้ช้อนสแตนเลสที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ตักเต้าหู้ทรงกลมลงในถุงพลาสติกที่ใช้สำหรับเข้าเครื่องตีปั่น ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 25 กรัม เติมน้ำยาเจือจาง 225 มิลลิลิตร ตีปั่นด้วยเครื่อง stomacher นาน 1 นาที ตัวอย่างที่ได้จะมีระดับการเจือจาง 1:10 ($10^{-1}$) จากนั้นทำ dilution ต่อเป็น $10^{-2}$, $10^{-3}$

## 2. การเตรียมน้ำยาสำหรับเจือจาง Buttlefield's phosphate buffered

### 2.1 การเตรียมน้ำยาสต๊อก

ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($KH_2PO_4$) 34 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้ได้ 7.2 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1N และปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร แล้วนำมาฆ่าเชื้อใน autoclave อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

### 2.2 การเตรียม Dilution blank

ตวงสารละลายสต๊อก 1.25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น ตวงใส่ขวดที่มีปริมาตร 225 มิลลิลิตร (สำหรับเจือจางตัวอย่าง 25 กรัม) จากนั้นดูดปริมาตร 9 มิลลิลิตรใส่หลอดทดลองขนาด 12×150 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ด้วยเครื่อง autoclave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3. การวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด**

ปิเปตตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร แต่ละระดับการเจือจาง โดยใช้ระดับความเจือจางอย่างละ 2 ซ้ำ ลงในแผ่นเพาะเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูป 3M Petrifilm™ Aerobic count place (AC) ที่ศูนย์กลางของแผ่นเพาะเชื้อ จากนั้นค่อยๆ ปล่อยแผ่นฟิล์มลงมา ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศ วางตัวกด (spreader) ลงบนแผ่นฟิล์มในบริเวณที่หยดตัวอย่าง ใช้นิ้วกดด้วยแรงพอประมาณจนตัวอย่างกระจายเต็มวงกลม รอประมาณ 1 - 2 นาที เพื่อให้เจลแข็งตัวก่อนเคลื่อนย้ายแผ่นฟิล์มไปบ่มที่อุณหภูมิ 35±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตามวิธี AOAC official method 986.33 และ989.10 โดยให้ด้านใส่อยู่บน ตรวจนับจำนวนจุลินทรีย์รายงานผลเป็นจำนวนโคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ง

## การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างภายใน

### ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

1. ตัดชิ้นเต้าหู้ให้เป็นแท่งมีขนาดไม่เกิน 5x8 มม. และหนาไม่เกิน 3 มม.
2. แช่ตัวอย่างในน้ำยา 2.5% glutaraldehyde ใน 0.1 M phosphate buffer pH 7.2 ข้ามคืนในตู้เย็น 4 °C
3. ล้างน้ำยาออกด้วย phosphate buffer 1 ครั้ง แล้วตามด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที
4. Dehydrate ด้วย ethanol ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 30%, 50%, 70%  95% และ 100% ขั้นตอนละ 30 นาที แต่ที่ 100% ให้เปลี่ยน 3 ครั้ง
5. นำไปทำแห้ง ณ จุดวิกฤตด้วยเครื่อง critical point dryer (Quorum model K850, UK)
6. หักแท่งเต้าหู้ตามขวางแล้วติดบนแท่นวาง (stub) ด้วยเทปกาวสองหน้าแล้วนำไปฉาบทอง (sputter coater, Balzers model SCD 040, Liechtenstein).
7. ส่องดูด้วยกล้อง SEM (JEOL, model JSM-5410LV, JAPAN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก จ**

# จ-1 การเตรียมน้ำซุป

**ส่วนผสม**

| | | |
|---|---|---|
| 1) หอมหัวใหญ่ | 670 | กรัม |
| 2) แครอท | 350 | กรัม |
| 3) เซเลอรี่ | 460 | กรัม |
| 4) น้ำกรอง | 2 | ลิตร |
| 5) กระดูกหมูสับหยาบ | 500 | กรัม |
| 6) เกลือ | 3 | กรัม |
| 7) น้ำตาลกรวด | 50 | กรัม |

**วิธีทำ**

1) เตรียมส่วนผสม นำหอมหัวใหญ่ เซเลอรี่ และแครอท มาล้างทำความสะอาด จากนั้นหั่นหอมหัวใหญ่ออกเป็น 4 ส่วน นำแครอทมาปอกเปลือก หั่นตามขวาง หนาประมาณ 1 นิ้ว นำเซเลอรี่มาหั่นตามขวาง
2) นำกระดูกหมูไปล้างให้สะอาด จากนั้นนำไปลวกในน้ำเดือด 5 นาที ตักขึ้นพักให้สะเด็ดน้ำ
3) นำหอมหัวใหญ่ไปย่างบนกระทะด้วยไฟกลาง เป็นเวลา 5 นาที จนหอมหัวใหญ่มีสีน้ำตาลเข้มทั้งสองด้าน
4) นำหอมหัวใหญ่ในข้อ 3 แครอท เซเลอรี่ และกระดูกหมูในข้อ 1ใส่ลงในหม้อ จากนั้นเติมน้ำกรองปริมาตร 2 ลิตรลงไป ยกขึ้นตั้งไฟกลาง ต้มจนส่วนผสมเดือด
5) ปรุงรสด้วยเกลือ และน้ำตาลกรวด จากนั้นลดระดับไฟลงเป็นไฟระดับอ่อน ทำการเคี่ยวน้ำซุปต่อไปจนครบ 2 ชั่วโมง
6) ทำการกรองน้ำซุปที่ได้ด้วยผ้าขาวบาง เพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งออก
7) นำน้ำซุปที่ได้ไปใช้ในการทดสอบทางประสาทสัมผัส ตามภาคผนวก ง-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# จ-2 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

**แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส 9-Point Hedonic Scale Test**

**ผลิตภัณฑ์ “ เต้าหู้ทรงกลม”**

ชื่อ ..... วันที่ .....

**<u>คำชี้แจง</u>** 1. ผู้รับการประเมินได้รับตัวอย่างผลิตภัณฑ์เต้าหู้ทรงกลม 3 ตัวอย่าง

2. กรุณาชิมตัวอย่างเต้าหู้ทรงกลมแล้วทำการประเมินโดยกรอกคะแนนลงในช่องว่าง

3. กำหนดให้ระดับคะแนนมีดังนี้

| | |
|---|---|
| 1 = ไม่ชอบมากที่สุด | 6 = ชอบเล็กน้อย |
| 2 = ไม่ชอบมาก | 7 = ชอบปานกลาง |
| 3 = ไม่ชอบปานกลาง | 8 = ชอบมาก |
| 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย | 9 = ชอบมากที่สุด |
| 5 = บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **รหัสตัวอย่าง** | | ..... | ..... | ..... |
| **คุณลักษณะ** | ลักษณะปรากฏ | ..... | ..... | ..... |
| | ขนาด | ..... | ..... | ..... |
| | เนื้อสัมผัส | ..... | ..... | ..... |
| | กลิ่นรส (เต้าหู้) | ..... | ..... | ..... |
| | ความชอบโดยรวม | ..... | ..... | ..... |

**ข้อเสนอแนะ**

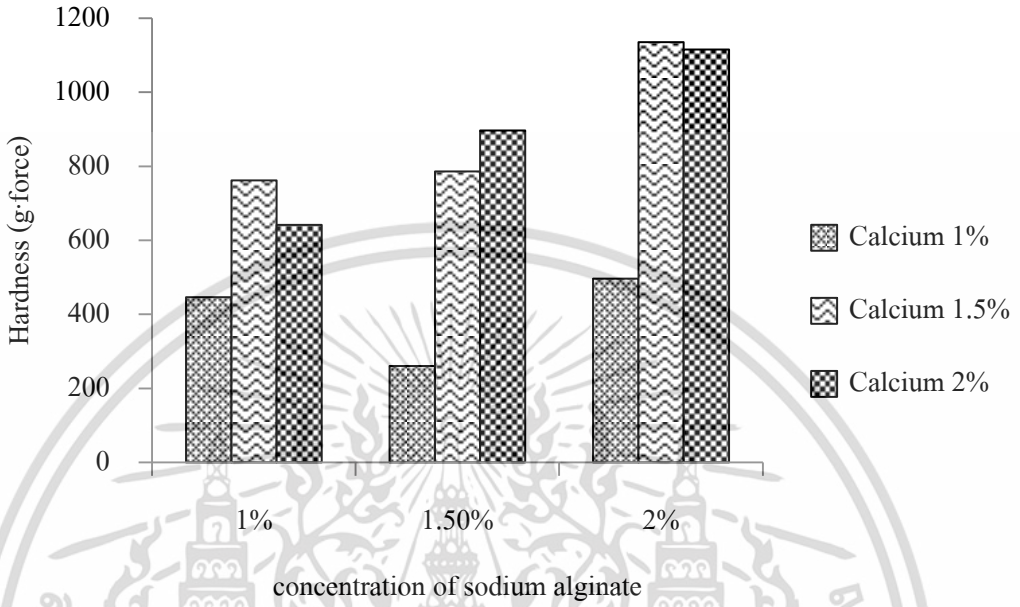
.....

.....

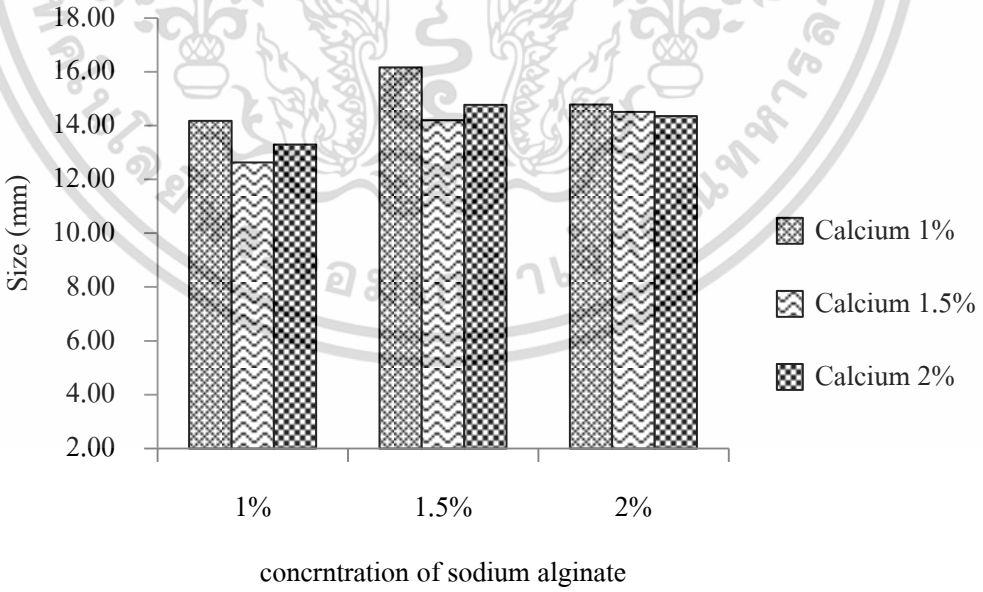
.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ฉ**

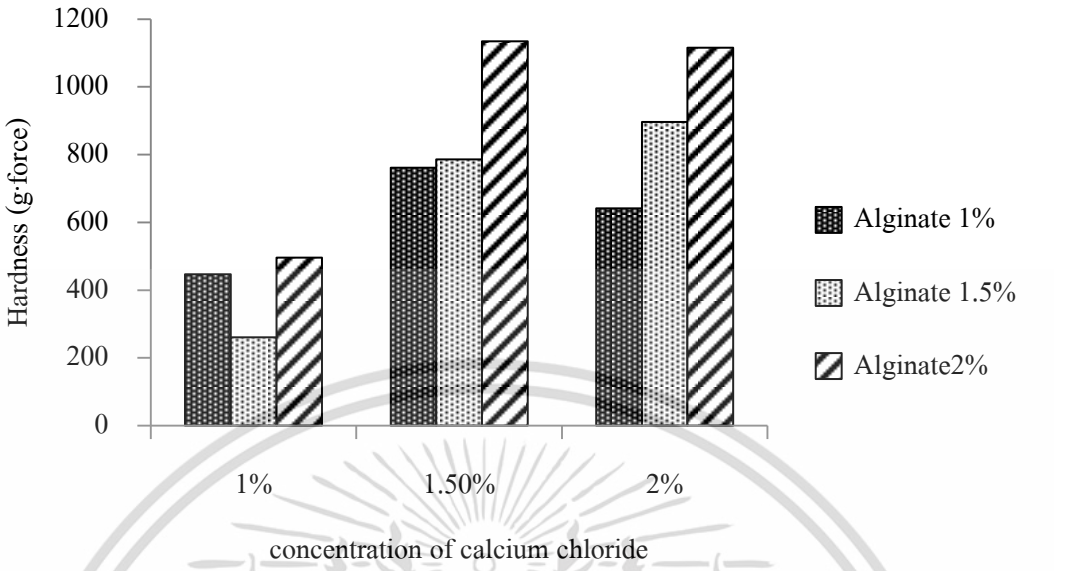



**ภาพที่ ฉ-1** ผลของการเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อค่าความแข็งของเต้าหู้ทรงกลม

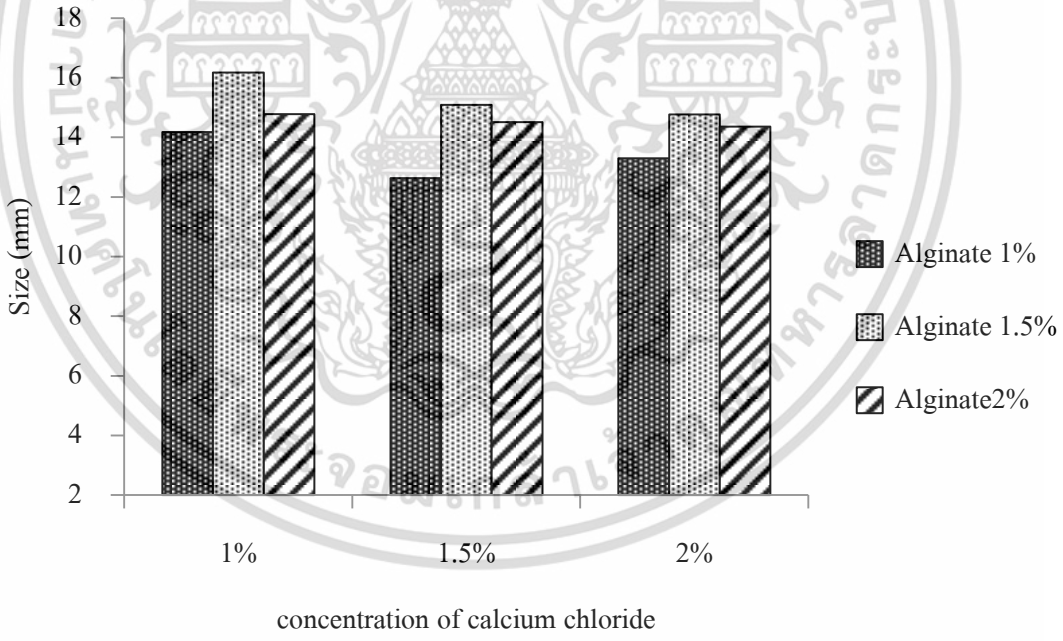



**ภาพที่ ฉ-2** ผลของการเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อขนาดของเต้าหู้ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**ภาพที่ ฉ-3** ผลของการเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อขนาดของเต้าหู้ทรงกลม




**ภาพที่ ฉ-4** ผลของการเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่อขนาดของเต้าหู้ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้วิจัย

| | |
|---|---|
| **ชื่อ - นามสกุล** | นางสาววรรณวิมล พุ่มโพธิ์ |
| **วัน เดือน ปี เกิด** | วันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2534 |
| **ที่อยู่** | 76/16 ม.6 ต.นครสวรรค์ออก อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000 |
| **ประวัติการศึกษา** | สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา พ.ศ. 2555 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา พ.ศ. 2555 และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2558 |
| **การนำเสนอผลงาน** | Pumpho, W. and Puechkamutr, Y. 2015. “Tofu - ball production from spherification technique using sodium alginate.”The 53nd Kasetsart University Annual Conference. Bangkok : Kasetsart University |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้