

การประยุกต์ใช้สมบัติทางไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเต้าหู้อ่อน
APPLICATION OF ELECTRICAL PROPERTIES FOR
SOFT-TOFU PROCESS



T119391

ทิติยา สິงห์สุวรรณ
ปิยาภรณ์ มาตย์วิเศษ
รจนา เนตรน้อย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**119391**.....
วัน,เดือน,ปี.....**๗**.....**๗**.....**๒๕๕๔**

๗๓๖๕๙๑๓๑
b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๓

**APPLICATION OF ELECTRICAL PROPERTIES FOR
SOFT-TOFU PROCESS**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

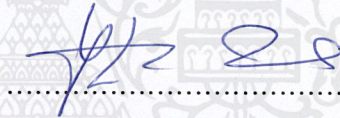
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้สมบัติทางไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเต้าหู้อ่อน

APPLICATION OF ELECTRICAL PROPERTIES FOR SOFT- TOFU PROCESS

ผู้จัดทำ

1. นางสาวทิตยา สิงห์สุวรรณ รหัสประจำตัว 50010414
2. นางสาวปิยาภรณ์ มาตย์วิเศษ รหัสประจำตัว 50010984
3. นางสาวรจนา เนตรน้อย รหัสประจำตัว 49012425



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.นวกัถรา หนูนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	การประยุกต์ใช้สมบัติทางไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเต้าหู้อ่อน
นักศึกษา	นางสาวทิตยา ลิงห์สุวรรณ นางสาวปิยาภรณ์ มาตย์วิเศษ นางสาวรจนา เนตรน้อย
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นวกัศรา หนูนาถ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า (σ) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองและระหว่างการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อน รวมถึงการศึกษาการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกและผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นระหว่างกระบวนการให้ความร้อนทำให้ค่า σ และค่า ϵ' ของนํ้านมถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น และในขณะกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้ พบว่าค่า σ และค่า ϵ' ของนํ้านมถั่วเหลืองมีค่า σ เพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้นการฟอร์มเจลถึงประมาณ 20 นาทีและคงที่หลังจากนั้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ เช่นเดียวกับค่า ϵ' ที่วัดด้วยความถี่ 12 kHz และ 100 kHz ค่า σ และค่า ϵ' ในนํ้านมถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการฟอร์มเจลและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของอิออนในนํ้าเวย์เวย์โปรตีน ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแสดงความสัมพันธ์กับการฟอร์มเจลของเต้าหู้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในส่วนของการปรับปรุงกระบวนการทำเต้าหู้ได้และในส่วนของคุณสมบัติของการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าและความหนืดของนํ้านมถั่วเหลืองตลอดจนเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน พบว่า ที่อัตราการให้ความร้อน 4.95°C/min 16.84°C/min และ 31.02°C/min (จาก 26°C - 90°C) ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของนํ้านมถั่วเหลืองสูงขึ้นตามลำดับ ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ต่อค่าความหนืดของนํ้านมถั่วเหลือง แต่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน โดยที่อัตราการให้ความร้อน 16.84°C/min เต้าหู้อ่อนมีความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) และความหยุ่นตัว (gumminess) มากที่สุด แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการเกาะกัน (cohesiveness) ของเต้าหู้อ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	APPLICATION OF ELECTRICAL PROPERTIES FOR SOFT- TOFU PROCESS
Students	Miss Titaya Singsuwan Miss Piyaphorn Matwiset Miss Rodjana Natnoi
Project Advisor	Asst.Prof. Dr.Navaphattra Nunak
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Food Engineering
Academic Year	2010

ABSTRACT

The objectives of this research are to study on the changes of electrical properties (electrical conductivity (σ) and dielectric constant (ϵ') during the soymilk heating and tofu gel forming processes and the effect of ohmic heating to soymilk on textural properties of soft-tofu. It was found that σ and ϵ' increased with increasing of temperature during soymilk heating. In the first 20 minutes of coagulating process, the σ and ϵ' (frequencies of 12kHz and 100kHz) increased then kept constant until the end of process, with corresponding time and the concentration of whey protein. The change in the σ values was likely caused by ions in whey during protein coagulating. The obtained results were an adequate measurement for monitoring valuable information on the gel forming process of soft-tofu and should be applied to the control part for improvement of the tofu process. In the part of ohmic heating to soymilk from room temperature up to 90°C at various heating rates (4.95 16.84 and 31.02°C/min), σ values of soymilk increased with increasing of heating rate. There were no significant differences of viscosity of soymilk and cohesiveness of tofu among three heating rates. At 16.84°C/min heating rate gave the most hardness, springiness and gumminess of tofu.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงด้วยดีด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนาท และคุณธีระวัฒน์ หนูนาทที่ได้สละเวลาส่วนตัวให้คำปรึกษาแนะนำ คำชี้แนะและแนวทางในการปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆตลอดมาและเอื้อเพื่ออุปกรณ์ RLC ยี่ห้อ FLUKE รุ่น pm 6305 programmable automatic RLC

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสตัย สาขาวิชาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเครื่องให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ให้คำแนะนำทางวิชาการต่างๆสำหรับงานวิจัยและช่วยติดตามผลงานจนกระทั่งสำเร็จลงด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณอำนาจ คูตะคุ (พี่แมน) เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการและคุณวารภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ (พี่นุ้ย) นักวิทยาศาสตร์ ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์วัดไฟฟ้ามัลติมิเตอร์ แคมป์มิเตอร์ และช่วยเตรียมอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สำหรับงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ช่วยกันสร้างสรรค์งานวิจัยเล่มนี้ให้สำเร็จลงด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ และทุกคนในครอบครัวที่ให้โอกาสได้ศึกษาเล่าเรียน และให้กำลังใจ กำลังใจ ความห่วงใยและการสนับสนุนเป็นอย่างดีเสมอมา

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สมบัติทางไฟฟ้าของอาหาร	3
2.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของอาหาร	3
2.1.2 ความจุทางไฟฟ้าในอาหาร	7
2.2 กระบวนการให้ความร้อนด้วยเทคนิค โอห์มมิก	10
2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารในกระบวนการให้ความร้อนแบบ โอห์มมิก	12
2.3 การแปรรูปผลิตภัณฑ์เต้าหู้	13
2.3.1 เต้าหู้ (Tofu)	13
2.3.2 การผลิตเต้าหู้อ่อน	15
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิต ลักษณะและคุณภาพของเต้าหู้อ่อน	19
2.4.1 องค์ประกอบและความแตกต่างของวัตถุดิบ	19
2.4.2 อุณหภูมิในขั้นตอนการบดตัวเหลือง	19
2.4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดหรือความเข้มข้นของโปรตีนในน้ำนมตัวเหลือง	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.4 การให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลือง	20
2.4.5 ชนิดของสารตกตะกอน	20
2.4.6 ความเข้มข้นของสารตกตะกอน	20
2.4.7 อุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอน	20
2.4.8 ระยะเวลาในการตกตะกอน	21
2.4.9 ปัจจัยอื่นๆ	21
2.5 การตรวจวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเต้าหู้	22
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	25
3.1 วัตถุประสงค์และวัสดุอุปกรณ์	25
3.1.1 วัตถุประสงค์	25
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์	25
3.2 การเตรียมการทดลอง	26
3.2.1 น้ำนมถั่วเหลือง	26
3.2.2 การเตรียมสารละลายไบยูเรท	26
3.2.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์การดูดกลืนแสง	26
3.3 การสร้างชุดอุปกรณ์วัด	26
3.4 การทดลอง	27
3.4.1 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดการทดลอง	27
3.4.2 การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองขณะการให้ความร้อน	28
3.4.3 การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองขณะการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้	28
3.4.4 การให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก	29
3.5 การวิเคราะห์	29
3.5.1 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเวย์โดยวิธีไบยูเรท	29
3.5.2 การวิเคราะห์ความหนืด	30
3.5.3 การวิเคราะห์สมบัติเนื้อสัมผัสเต้าหู้	30
3.5.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
4.1 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า	32
4.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน	34
4.3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำนมถั่วเหลืองในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อน	36
4.3.1 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำนมถั่วเหลือง	36
4.3.2 ค่าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเวย์เต้าหู้อ่อน	39
4.4 ผลของอัตราการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิก	41
4.4.1 ผลของอัตราการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกต่อค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลือง	41
4.4.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกต่อค่าความหนืดของน้ำนมถั่วเหลืองและลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	48
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	54
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	65
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความหนืด	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร	4
2.2 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของอาหาร	9
4.1 ค่าการนำไฟฟ้าของค่าอ้างอิงและค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์วัดที่สร้างขึ้น ที่ความเข้มข้นสารละลาย NaCl ต่างกัน ($T=20^{\circ}\text{C}$)	32
4.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่ อุณหภูมิ 26°C ถึง 92°C	34
4.3 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้	37
4.4 ค่าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเวย์เต้าหู้ ที่เวลาต่างๆในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อน	39
4.5 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการ ให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเทคนิค โอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ คือ $4.95^{\circ}\text{C}/\text{min}$ $16.84^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และ $31.02^{\circ}\text{C}/\text{min}$	42
4.6 ค่าความหนืดของน้ำมันถั่วเหลือง ค่า Hardness ค่า Springiness ค่า Cohesiveness และค่า Gumminess ของเต้าหู้อ่อน โดยการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลือง ด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ	44

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการค่าความนำไฟฟ้าในของเหลว	5
รูปที่ 2.2 วัสดุไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.3 หลักการให้ความร้อนด้วยวิธี โอห์มมิก	11
รูปที่ 2.4 (ก) เต้าหู้แข็ง (ข) เต้าหู้อ่อน และ (ค) เต้าหู้หลอด	14
รูปที่ 2.5 การเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง	15
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดเจล โปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองเมื่อเติม CaSO_4 และ GDL	18
รูปที่ 2.7 การผลิตเต้าหู้อ่อน	18
รูปที่ 2.8 Differential scanning calorimetry ของกระบวนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองดิบ	24
รูปที่ 3.1 (ก) ภาพขณะบรรจุ (ข) วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าการนำไฟฟ้าและการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก	27
รูปที่ 3.2 (ก) ภาพขณะบรรจุ (ข) วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้า	27
รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเวย์โดยวิธีไบยูเรท	29
รูปที่ 3.4 (ก) ลักษณะเต้าหู้ที่ได้จากการทดลอง (ข) ขนาดของเต้าหู้ที่ใช้ทดสอบเนื้อสัมผัส (ค) การวัดเนื้อสัมผัสเต้าหู้ด้วยเครื่อง Texture Analyser ใช้หัวทดสอบ cylindrical plunger ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm	30
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย NaCl กับค่าการนำไฟฟ้า	33
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าอ้างอิง กับค่าการนำไฟฟ้าจากชุดอุปกรณ์วัด	33
รูปที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (26°C) จนถึง 92°C	35
รูปที่ 4.4 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของน้ำนมถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้	37
รูปที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำนมถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้	40
รูปที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อนต่างกัน	43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.7 ค่าความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ ในการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก	44
รูปที่ 4.8 (ก) ค่าความแข็ง (hardness) (ข) ความยืดหยุ่น (springiness) (ค) ความหยุ่นตัว (gumminess) และ (ง) ความสามารถในการเกาะกัน (cohesiveness) ของเต้าหู้อ่อนที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ ในการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก	45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการ เหตุผลและที่มาของปัญหา

สมบัติทางไฟฟ้าของอาหารมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมในกระบวนการผลิต การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังเป็นตัวกำหนดและบ่งบอกลักษณะเฉพาะตัวหรือรูปแบบของอาหารชนิดนั้นๆ ได้ โดยเกี่ยวข้องกับประจุไฟฟ้าและความเป็นขั้วทางไฟฟ้าของโมเลกุลของอาหารชนิดนั้นๆ ซึ่งประจุไฟฟ้าและความเป็นขั้วทางไฟฟ้าจะมีผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านอาหาร สมบัติทางไฟฟ้าของอาหารที่สำคัญได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, σ) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant, ϵ') ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss Factor, ϵ'') และค่า loss tangent ($\tan \delta$) (Lewis, 1987)

เต้าหู้อ่อน (Soft Tofu) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกตะกอนน้ำนมถั่วเหลือง ผลิตโดยนำถั่วเหลืองมาล้าง แช่น้ำและบดด้วยน้ำ ได้เป็นถั่วเหลืองบดเหลวข้น กรองด้วยผ้า ของเหลวที่ได้มีลักษณะคล้ายน้ำนม เรียกว่า น้ำนมถั่วเหลือง เมื่อนำไปให้ความร้อน เดิมสารตกตะกอน โปรตีนและให้ความร้อนต่อ น้ำนมถั่วเหลืองจะฟอร์มเจลและตกตะกอนได้เป็นเต้าหู้อ่อน ซึ่งกระบวนการผลิตที่สำคัญ คือ ขั้นตอนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองและขั้นตอนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้ ในขั้นตอนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลือง โมเลกุลโปรตีนที่มีความเกี่ยวข้องกับการฟอร์มเจลจะเกิดการเสียสภาพ ดังนั้นรูปแบบและระยะเวลาในการให้ความร้อนจึงส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ (Liu, 1997) ส่วนในขั้นตอนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้จะเกิดการจับตัวกันระหว่างโปรตีนที่เสียสภาพและสารตกตะกอน โดยทั้งสองขั้นตอนนี้ นอกจากจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางสถานะของน้ำนมถั่วเหลืองแล้วยังมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าและความเป็นขั้วทางไฟฟ้าของโมเลกุลโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลือง กล่าวคือในระหว่างกระบวนการผลิตเต้าหู้อ่อนทั้งการให้ความร้อนและการตกตะกอน โปรตีน มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติภายในโมเลกุลโปรตีนทั้งทางโครงสร้างและทางไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการแปรรูปอาหารได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้ในระบบควบคุมแบบในกระบวนการ กระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนและการตรวจสอบคุณภาพต่างๆของอาหาร เป็นต้น (Figura et al., 2007)

จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตเต้าหู้อ่อนจากถั่วเหลืองดังกล่าวข้างต้น โครงการนี้จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการผลิตเต้าหู้อ่อนจากถั่วเหลืองในขั้นตอนการให้ความร้อนและขั้นตอนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้ เพื่อนำไป

ประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิต รวมถึงศึกษารูปแบบการให้ความร้อน
น้ำนมถั่วเหลืองด้วยการให้ความร้อนแบบโอห์มิก (Ohmic Heating)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลือง
และระหว่างการพอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อน
2. เพื่อศึกษาการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มิกและผลของอัตราการให้ความ
ร้อนที่มีต่อเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองและ
ระหว่างการพอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อนรวมถึงการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มิก
และผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลือง
2. ได้ผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าในระหว่างการพอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติทางไฟฟ้าของอาหาร

สมบัติทางไฟฟ้าของอาหาร มีดังนี้

1. ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, σ) เป็นค่าที่แสดงความสามารถของอาหารในการเป็นสื่อกระแสไฟฟ้า ตัวการที่เป็นสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าในอาหาร คือ อีออน (ion) ของสารประกอบอนินทรีย์ต่างๆ (inorganic substances) ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ ค่าความนำไฟฟ้าของอาหาร ได้แก่ การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (Ohmic Heating) การวัดค่า pH และการวัดค่าความเข้มข้น เป็นต้น (Ludger, 2006)

2. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant, ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของอาหารในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นของอาหาร การประยุกต์ใช้คือ วัดความเข้มข้น และการวัดค่าความชื้น เป็นต้น (Lewis, 1987)

3. ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss Factor, ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

4. ค่า loss tangent ($\tan \delta$) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนซึ่งคิดออกมาในรูปของมุมที่ต่างไป

ค่าไดอิเล็กทริกทั้ง 3 เกี่ยวข้องกับการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟ ดังนั้นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Lewis, 1987)

2.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของอาหาร

ค่าการนำไฟฟ้าเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด มีหน่วยเป็นซีเมนต์ต่อเมตร (S/m) ปัจจุบันในกระบวนการอุตสาหกรรมอาหารค่าความนำไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้น โดยเฉพาะระบบการให้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อในอาหารด้วยเทคนิคการให้ความร้อนแบบใช้ไฟฟ้าโดยตรงหรือการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าเป็นปัจจัยวิกฤต (Critical parameter) ที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในอาหาร (วีระชัย, 2544) ตัวอย่างค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแสดงในตารางที่ 2.1

ค่าการนำไฟฟ้าของอาหารขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้ องค์ประกอบของอาหาร อุณหภูมิ ความถี่ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ความเข้มข้นของอีออนและปริมาณอีออนที่แตกตัวในอาหาร ดังนั้นอาหารที่มีอิเล็กตรอนหรืออีออนอิสระอยู่มากก็จะมีค่าการนำไฟฟ้ามากไปด้วย นอกจากนี้พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด แรงดันไฟฟ้า ก็มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นกัน ถ้ากำหนดให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดเท่ากับ A ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ L เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าคงที่แก่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากอิออนที่เคลื่อนที่ไปมาระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายหรืออาหารมากขึ้นเช่นกัน ในสภาวะเดียวกันถ้าเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแต่ขนาดพื้นที่หน้าตัดอิเล็กโทรดเท่าเดิม พบว่าค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายลดลงแสดงว่าปริมาณอิออนที่เคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดน้อยลง (American Public Health, 1981) ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดและระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย และเพื่อให้ระบบการวัดค่าความนำไฟฟ้าเป็นมาตรฐานเดียวกัน คือค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่ระยะทางใดๆ เทียบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้า ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและค่าการนำไฟฟ้า (Palaniappan and Sastry, 1991)

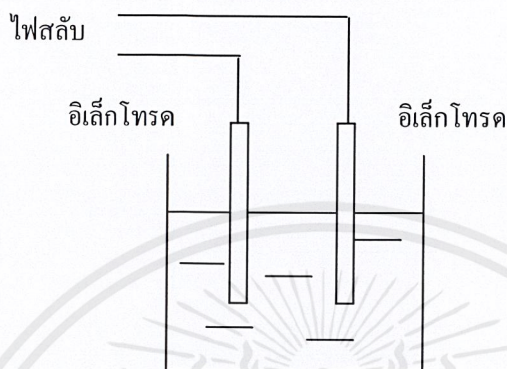
ตารางที่ 2.1 ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร

Food or Material	Electrical Conductivity, σ (S/m)	Temperature, T (°C)
Distilled water ⁵	$0.5-1.7 \times 10^{-6}$	25
Brine 0.5g NaCl	0.42	22
Potatoes Bintje	0.04	40
Carrots	0.13	25
Yam	0.11	25
Chicken	0.37	25
Beef	0.44	25
Cocktail tomatoes (60%vol)		
+ tap water (40%vol)	0.015	22
French beans (70%vol)		
+ tap water(30%vol)	0.013	22
Sodium Phosphate 0.025M	0.189	25
Sodium Phosphate 0.1M	0.676	25

ที่มา : Da-Wen Sun (2005); Paul Singh (2009)

2.1.1.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้า

รูปแบบของการวัดค่าการนำไฟฟ้าประกอบไปด้วยแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่นวางขนานกันต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้างดรูป 2.1 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับแผ่นอิเล็กโทรดจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนที่อยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการค่าการนำไฟฟ้าในของเหลว

$$\sigma = LI / VA$$

(2.1)

โดยที่

σ = ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร (S/m)

A = พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรด (m^2)

I = กระแสไฟฟ้า (ampere)

L = ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (m)

V = แรงดันไฟฟ้า (volt)

การวัดค่าการนำไฟฟ้าในทางปฏิบัตินิยมใช้ไฟฟ้ากระแสสลับมากกว่ากระแสตรงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าตรงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นที่อิเล็กโทรด ขณะเดียวกันจะทำให้ความต้านทานไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่รอบๆอิเล็กโทรดทั้งสองจะเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด Polarization ในเซลล์นั้น อย่างไรก็ตามสามารถทำให้ Polarization ไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยที่สุดได้โดยการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเพราะอิเล็กโทรดทั้งสองจะสลับกันเป็นแคโทดและแอโนดตลอดเวลา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบย้อนกลับทำให้มีโอกาสเกิด Polarization ได้น้อยหรือไม่เกิดเลย (ไพชยา, 2549)

2.1.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าการนำไฟฟ้าและการพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า

Fryer et al. (1993) สร้างอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับอาหารเหลวประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ ระบบไฟฟ้ามาจากระบบไฟฟ้าหลัก (Main power supply) แรงดันไฟฟ้า 240 V ความถี่ 50 Hz หม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดันได้ เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า และเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ที่ปลายสายจะหุ้มปิดด้วยโพลีเมอร์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากการผ่านกระแสไฟฟ้าสลับไปยังอาหารที่มีต่อการวัดอุณหภูมิ เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการบันทึกข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบ ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วทำจากแผ่นเหล็กโรเดียมพื้นที่หน้าตัด 7.5×7.5 cm เซลล์สำหรับการให้ความร้อนแบบโอห์มมิกทำจากกล่องพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนขนาด $7.0 \times 7.77 \times 18.4$ cm

Palaniappan และ Sastry (1991) พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าของอาหารเหลวซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าปรับแรงดันได้ เครื่องมือวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เครื่องคอมพิวเตอร์ และเซลล์สำหรับให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ซึ่งทำจากท่อสแตนเลสความยาว 12.5 in ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15/16 in ด้านในท่อสแตนเลสมีปลอกเทฟรอนทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าสวมอยู่ ตรงกลางท่อติดตั้งท่อขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/16 in สำหรับบรรจุตัวอย่างอาหารและเสียบสายเทอร์โมคัปเปิล ที่ปลายท่อทั้งสองด้านมีขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำจากแผ่นโลหะโรเดียม (Rhodium plated steel electrodes)

Kolbe (1999) ทำการวิจัยเพื่อหาค่าการนำไฟฟ้าและคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของซูริมิ ที่มีความชื้น 78% ฐานเปียกและส่วนผสมของปริมาณเกลือ 1 2 และ 3%w/w กับเนื้อพลาสติกที่มีความชื้น 77% ฐานเปียกและส่วนผสมของเกลือ 0.74%w/w ในช่วงอุณหภูมิ 293.15 ถึง 340.15K ที่ระดับความถี่ของคลื่นไฟฟ้าในช่วง 30 Hz – 1 MHz และนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือและความชื้น

Mitchell et al. (1989) พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าสำหรับชิ้นอาหารที่ความถี่ 50 Hz อุณหภูมิ 25°C เซลล์สำหรับสร้างความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิกทำจากท่อที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 cm วางในแนวตั้งมีตัวยึดทั้งด้านบนและด้านล่าง ปลายท่อด้านล่างมีขั้วอิเล็กโทรดยึดติดอยู่ ส่วนปลายท่อด้านบนขั้วอิเล็กโทรดถูกยึดติดไว้ที่ปลายหัวกดที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ เพื่อให้ขั้วอิเล็กโทรดสัมผัสผิวหน้าของชิ้นอาหารที่มีความยาวต่างๆกัน

Zhuang et al. (1997) ใช้ค่าการนำไฟฟ้าในการตรวจสอบปริมาณโปรตีนของแป้งเวย์ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถระบุส่วนประกอบที่เป็นโปรตีนและไม่ใช่โปรตีนได้ โดยวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีการของเจดาล (Kjeldahl) และวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการของเจดาลและวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) เท่ากับ 0.96 และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง

สองวิธีนี้ ($P > 0.05$) ผลลัพธ์นี้พิสูจน์ให้เห็นว่าส่วนประกอบ โปรตีนในแป้งเวย์สามารถตรวจสอบโดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าได้

St-Gelais and Champagne (1995) ตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าในนมคั้นรูปพร่องมันเนยระหว่างการเติมกรด โดยศึกษาผลของ pH ความเข้มข้นของโปรตีน ไขมัน กรดแลกติกและแคลเซียมที่เป็นส่วนประกอบในนมต่อค่าการนำไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าการนำไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กันแบบเส้นโค้ง อย่างไรก็ตามในนมที่เกิดจากการหมักพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอื่นต่าง ๆ พบว่าสารละลายแคลเซียมดูเหมือนว่ามีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าโพแทสเซียม แมงกานีส ฟอสฟอรัสและโซเดียม ผลิตภัณฑ์กรดแลกติกและ โปรตีน ในขณะที่ไขมัน ไม่มีผล

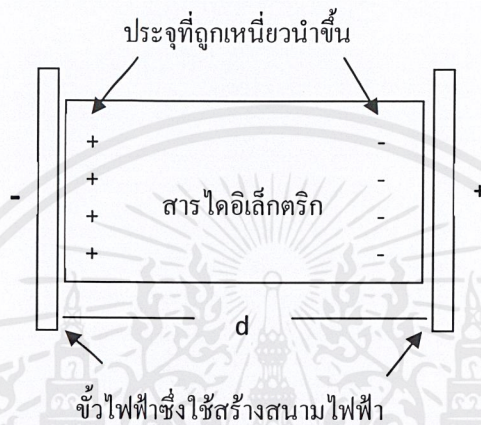
2.1.2 ความจุทางไฟฟ้าในอาหาร

ค่าความจุไฟฟ้า คือ ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัตถุใดๆ ที่สามารถเก็บประจุอิสระไว้ได้ โดยมีความสัมพันธ์กับวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) (วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีหรือเป็นฉนวน) อาหารส่วนใหญ่จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ถ้าวางวัสดุไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้า เช่น ระหว่างแนวขนานของแผ่นเก็บประจุ (capacitor) จะเกิดประจุขึ้นที่ขอบของสารนั้นดังรูปที่ 2.2 ประจุนี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น โดยสนามไฟฟ้าและจะหายไปทันทีที่สนามไฟฟ้านั้นหมดไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า polarization และวัสดุที่ประพฤติตัวลักษณะนี้ คือ วัสดุไดอิเล็กทริก (Lewis, 1987) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.2

สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) คือสมบัติของฉนวนที่มีการจัดขั้วไฟฟ้า โดยสภาพปกติแล้ววัสดุจะประกอบไปด้วยกลุ่มของโปรตอนและกลุ่มของอิเล็กตรอน โดยทั้งสองกลุ่มนี้จะมีจุดศูนย์กลางมวลซ้อนทับกันอยู่และอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม กรณีที่มีแรงยึดเหนี่ยวเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำต่อโมเลกุลจะทำให้กลุ่มของโปรตอนและกลุ่มของอิเล็กตรอนได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าโดยกลุ่มของโปรตอนจะถูกผลักไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและกลุ่มของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในลักษณะที่สวนทางกับสนามไฟฟ้าทำให้โมเลกุลทุกโมเลกุลของสารเกิดเป็นไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ขึ้นมา สมบัติทางไดอิเล็กทริกของอาหารบางชนิด แสดงดังตารางที่ 2.2

น้ำและเกลือเป็นองค์ประกอบในอาหารที่มีความสำคัญหลักต่อสมบัติไดอิเล็กทริก นอกจากนี้สนามไฟฟ้า ความถี่ และอุณหภูมิของตัวอย่างก็มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกมากเช่นเดียวกัน โดยที่น้ำและเกลือ ความถี่ และอุณหภูมิของอาหารทำให้สามารถทำนายสมการเกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กทริกได้เช่นเดียวกัน (Sun et al., 1991)

รูปแบบที่สามารถพบเห็นทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบเปลี่ยนแปลงค่าได้ที่ใช้สำหรับวัดการกระจัด คือ มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นแผ่น (plate) เก็บประจุสองแผ่นวางขนานกัน โดยสามารถปรับระยะระหว่างแผ่นและขนาดพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำทั้งสองได้ การเปลี่ยนแปลงค่าความจุจากแผ่นเก็บประจุคู่ขนานสามารถทำได้โดยการปรับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) การปรับพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ (A) หรือการเปลี่ยนค่าความเป็นฉนวนหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant, ϵ)



รูปที่ 2.2 วัสดุไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้า

ที่มา : อัมพวัน ตันสกุล (2540)

$$C = \epsilon' \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

โดยที่

C = ความจุไฟฟ้า (Farad)

A = พื้นที่ของแผ่นโลหะ (m^2)

d = ระยะระหว่างแผ่นโลหะ (m)

ϵ_0 = Permittivity Constant = 8.85×10^{-12} (Farad/m)

ϵ' = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของอาหาร

Food or Material	Dielectric Constant	Dielectric Loss	Temperature
	(ϵ')	Factor (ϵ'')	($^{\circ}\text{C}$)
Distilled water	77.4	9.2	24.0
Water + 5%NaCl	67.5	71.1	24.0
Ice	3.2	0.003	0.0
Potatoes (raw)	62.0	16.7	25.0
Peas (cooked)	63.2	15.8	25.0
Carrots (cooked)	71.5	17.9	25.0
Vegetable soup	70.0	17.5	25.0
Fish (cooked)	46.5	12.0	25.0
Banana	61.8	16.7	25.0
Peach	71.3	12.7	25.0
Beef (raw)	50.8	16.0	25.0
Beef (cooked)	35.4	11.6	60.0
Cooking oil	2.5	0.1	25.0
butter	4.4	0.5	25.0
Gravy	73.4	26.4	25.0
Mustard	56.0	28.0	25.0

ที่มา : Buffler (1995)

2.1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าความจุไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหาร

Bircan et al. (2002) ทำการตรวจวัดค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกโดยวิเคราะห์ด้วย Differential scanning calorimetry (DSC) ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเว็ปโรตีน พบว่าค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงจากอุณหภูมิห้อง (25°C) จนกระทั่ง 65°C และเริ่มเพิ่มขึ้นจาก 65°C ไปจนถึง 75°C และลดลงอีกที่อุณหภูมิ $75-80^{\circ}\text{C}$ ที่ค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลงและเพิ่มขึ้นที่ 75°C เนื่องมาจากการแตกตัวของอออนในโปรตีนเพราะในขณะที่โปรตีนเกิดการเสียดสภาพจะเกิดการแตกตัวออกมาของประจุ ดังนั้นค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

Kato (1987) ศึกษาการวัดค่าความจุไฟฟ้า ความต้านทานและค่า Impedance เพื่อคัดแยกผลไม้ที่เน่า ช้ำและสุกเกินไปออกจากผลคุณภาพดี โดยใช้ช่วงความถี่ไฟฟ้า $10\text{ Hz} - 13\text{ MHz}$ พบว่าค่าความ

จุไฟฟ้า ของผลเน่าจะมีค่าสูงกว่าผลปกติและค่าความต้านทานผลปกติมีค่าสูงกว่าผลเน่า โดยเมื่อความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสมบัติทางไฟฟ้าจะลดลง

Lawrence et al. (1992) ทำการทดลองเกี่ยวกับอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเมล็ด Pecan พบว่า ทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิทั้งอุณหภูมิของเมล็ดและอุณหภูมิของตัววัด ส่วนความถี่ไฟฟ้านั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่า มีการลดลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้า เนื่องจากความถี่ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้ทำให้การทะลุผ่านเนื้อเยื่อและเซลล์ต่างๆ ได้ดีขึ้น (Harker and Dunlop, 1994)

Fritsch et al. (1979) ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันที่ผ่านการทอด พบว่าน้ำมันที่ผ่านการทอดอาหารจะเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากความร้อน และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้โมเลกุลที่มีขั้วในน้ำมันเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของน้ำมันนั้นจึงเกิดเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารมีขั้วที่เกิดเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารมีขั้วในน้ำมันทอดโดยตรง

Bircan และ Barringer (2002) ตรวจสอบการเสียดสภาพของโปรตีนในกล้ามเนื้ออาหารโดยใช้สมบัติไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิการเสียดสภาพของอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิเสียดสภาพที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC ของคอลลาเจนในเนื้อวัว อกไก่ ขาไก่ ปลาน้ำจืด ปลาสด และแซลมอน โดยเมื่อคอลลาเจนและแอกโตไมโอซินเสียดสภาพกล้ามเนื้อจะหด ทำให้มีการขับน้ำและแร่ธาตุออกมา สิ่งเหล่านี้อาจทำให้น้ำและไอออนเคลื่อนที่มากขึ้น ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำและไอออน จึงทำให้สามารถตรวจสอบอุณหภูมิที่โปรตีนเสียดสภาพได้ แต่เมื่อนำตัวอย่างไปให้ความร้อนอีกครั้งพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสมบัติไดอิเล็กทริกวัดการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับไม่ได้

2.2 กระบวนการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก

ในอาหารส่วนใหญ่มีน้ำเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากและมีไอออนของเกลือหรือกรดละลายอยู่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Palaniappan and Sastry, 1991) อาหารจึงมีสมบัตินำไฟฟ้าได้เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังอาหาร (รูปที่ 2.3) ซึ่งอาหารจะยอมให้มีการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในเนื้อของอาหารโดยประจุไฟฟ้าจะชนกับอะตอมภายในอาหารเกิดการถ่ายเทพลังงานจำนวนหนึ่งให้กับอะตอม พลังงานที่อะตอมได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนตามปรากฏการณ์ของจูล (Joule effect) ดังสมการที่ (2.3) ถึง (2.6) (มงคล, 2522; Parrott, 1992; Quarini, 1995) อาหารจะร้อนขึ้นเองโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางให้ความร้อน (Hui, 1992) หลักการนี้เป็นเทคนิคการให้ความร้อนโดยตรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้อาหารวิธีหนึ่ง เรียกว่า การให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก (Ohmic heating) การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วสม่ำเสมอ และสามารถใช้ได้กับอาหารที่ประกอบด้วยอนุภาคชื้นอาหารขนาดใหญ่ได้ถึง 25mm (Larkin and Spinak, 1996) โดยอาหารที่ผ่านกระบวนการนี้ยังรักษาคุณภาพทั้งทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสได้ดีอีกด้วย (Hui, 1992)



รูปที่ 2.3 หลักการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิก

เมื่อ

$$W = Q \quad (2.3)$$

$$W = P\Delta t \quad (2.4)$$

$$Q = mC_p\Delta T \quad (2.5)$$

$$P = I^2R = IV = V^2/R \quad (2.6)$$

โดยที่

W = พลังงานไฟฟ้า (J)

P = กำลังงาน (W)

Q = ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น (J)

m = มวลของอาหาร (g)

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของอาหาร ($Jg^{-1}K^{-1}$)

t = ระยะเวลา (s)

T = อุณหภูมิของอาหาร (K)

R = ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

V = แรงดันไฟฟ้า (V)

วิธีการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก นั้นจะผ่านไฟฟ้าไปยังอาหารโดยตรง ทำให้ภายในเนื้ออาหารร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วและพร้อมกันทุกจุด (Ayappa et al., 1991) กระบวนการนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาอาหารได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงและลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการและทางประสาทสัมผัสของอาหาร นอกจากนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตอาหารด้านต่างๆ เช่น การเอกซสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายอาหารแช่เยือกแข็ง การลวก พาสเจอร์ไรซ์และสเตอริไลซ์ เป็นต้น (Ayappa et al., 1991) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการฆ่าเชื้อแบบใช้อุณหภูมิสูงเวลาสั้น (High temperature Short time)

จากหลักการพื้นฐานการให้ความร้อนด้วยวิธีโอห์มมิกจะถือว่าอาหารมีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทางเพียงอย่างเดียว (Palaniappan and Sastry, 1991) ค่าความต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ (2.7) ถ้ากำหนดให้อาหารอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าให้ความร้อนหรือสามารถหาได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) ในสมการที่ (2.8) ถ้าทราบค่าของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ค่าความต้านทานจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าไฟฟ้าจึงมีความสำคัญมากโดยเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดอัตราการให้ความร้อน ($\Delta T/\Delta t$) ดังสมการที่ (2.9) โดยส่วนใหญ่สภาพนำไฟฟ้ามักจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะเส้นตรง ดังสมการที่ (2.10) (Palaniappan and Sastry, 1991)

$$R = L / (A \sigma) = (1/\sigma) K_c \quad (2.7)$$

$$V = IR \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.2) (2.3) (2.4) (2.5) และ (2.6) จะได้

$$\Delta T/\Delta t = (v^2 \sigma) / (K_c m C_p) \quad (2.9)$$

ซึ่ง
$$\sigma = aT + b \quad (2.10)$$

โดยที่ σ = ค่าความนำไฟฟ้า (S/m)
 T = อุณหภูมิใดๆ ($^{\circ}\text{C}$)
 a = ค่าคงที่ (S/m)
 b = ค่าคงที่ ($\text{S}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก

1) ค่าการนำไฟฟ้าของอาหาร อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้รับ (De Alwis et. al., 1990) ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของอาหารจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้มากหรือน้อย กล่าวคือ ถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารสูง กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้มากเช่นกัน ส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันถ้าค่าการนำไฟฟ้าของอาหารต่ำ กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านอาหารได้น้อยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Palaniappan and Sastry, 1991)

2) ความเข้มข้นไฟฟ้า ผลของความเข้มข้นไฟฟ้ามีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหาร คือ เมื่อให้ความเข้มข้นไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในอาหารสูงขึ้นเช่นกัน สาเหตุอาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าเปรียบเสมือนการเพิ่มพลังงานให้กับระบบทำให้อาหารสามารถสร้างความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

3) ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหาร ขนาดและรูปร่างชิ้นอาหารมีผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้า ในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (De Alwis et al., 1989) ซึ่งมีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารและอาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ คือเมื่อขนาดชิ้นอาหารใหญ่ขึ้นทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของอาหารลดลง เนื่องจากอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดเล็กแขวนลอยอยู่อาจช่วยให้การกระจายของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาหารมีมากกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่แขวนลอยอยู่ ซึ่งมีลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าผิดปกติไป (palaniappan and Sastry, 1991)

4) ทิศทางการจัดเรียงของชิ้นอาหาร ชิ้นอาหารที่วางในแนวตั้งฉากกับทิศทางกระแสไฟฟ้า ไหลของกระแสไฟฟ้าวิ่งเร็วกว่าชิ้นอาหารที่วางในแนวขนานกับทิศทางกระแสไฟฟ้า (Sastry et al., 1992) สำหรับชิ้นอาหารที่มีรูปร่างทรงกลมและทรงลูกบาศก์ พบว่าทิศทาง การจัดเรียงไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหาร (palaniappan and Sastry, 1991) อาจเป็นเพราะว่าค่า L/A ของชิ้นอาหารทั้งสองรูปร่างนี้ไม่ขึ้นกับทิศทางการจัดเรียง

5) ปริมาณชิ้นอาหาร ปริมาณชิ้นอาหารที่แขวนลอยในอาหารเหลวมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ แต่มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหาร (Sastry and S.K, 1993) สำหรับอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารแขวนลอยในปริมาณมาก มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในชิ้นอาหารต่ออาหารเหลวที่อยู่รอบ ๆ สูงกว่าอาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารแขวนลอยในปริมาณที่น้อยกว่า (Palaniappan and Sastry, 1991)

2.3 การแปรรูปผลิตภัณฑ์เต้าหู้

2.3.1 เต้าหู้ (Tofu)

เต้าหู้เป็นอาหารชนิดหนึ่งที่ทำจากถั่วเหลือง มีลักษณะเป็นก้อน นุ่มนิ่ม สีขาวอ่อน โดยตัวของเต้าหู้จะไม่มีรสชาติแต่สามารถปรุงแต่งรสได้ทำให้มีรสชาติต่างกันไป เต้าหู้เป็นแหล่งโปรตีนที่ดี มีราคาถูก ย่อยง่ายและมีโปรตีนสูง ซึ่งสามารถใช้แทนเนื้อสัตว์ได้ เต้าหู้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากคอเรสเตอรอล (Hidei and Kawassaki, 1990) และเป็นอาหารที่มีพลังงานต่ำโดยเฉพาะพวกไขมันอิ่มตัว อย่างไรก็ตามคุณภาพของโปรตีนในเต้าหู้ยังด้อยกว่าเนื้อสัตว์อยู่บ้าง โดยพบกรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบได้แก่ Methionine ในปริมาณน้อย องค์ประกอบทางเคมีของเต้าหู้สุดประกอบด้วย ความชื้น 88% โปรตีน 60% ไขมัน 3.5 % Soluble carbohydrate 1.9 % เถ้า 0.6 %

เส้นใย 0 % และวิตามินบี 10.02 % ให้พลังงาน 63.1Cal ต่อ 100g (Standard Composition of Food in Japan, Agency of Science and Technology, 1993)

การแบ่งชนิดของเต้าหู้ตามลักษณะของเนื้อสัมผัสสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด (รูปที่ 2.4) ดังนี้

1) เต้าหู้แข็ง (hard or extra firm tofu) มีลักษณะเป็นเต้าหู้ที่มีเนื้อแข็ง มีสีขาวนวล นิยมใช้คั่วเกลือหรือเกลือแมกนีเซียมซัลเฟตช่วยในการตกตะกอน เมื่อตกตะกอนแล้วนำมาใส่ผ้าขาวบางที่ปูในแม่พิมพ์ ห่อให้เป็นก้อนและกดเอาน้ำออกก็จะได้เต้าหู้แข็งสีขาว

2) เต้าหู้อ่อน (soft or firm tofu) มีลักษณะเป็นเต้าหู้ที่มีสีขาวนวล มีวิธีทำเช่นเดียวกับเต้าหู้แข็งแต่นิยมใช้เจียะกอหรือแคลเซียมซัลเฟตช่วยในการตกตะกอนและในขั้นตอนการกดทับจะใช้น้ำหนักกดที่น้อยกว่าเต้าหู้แข็ง จึงได้ลักษณะเนื้อที่เนียนและอ่อนนุ่มกว่าเต้าหู้แข็ง นอกจากนี้ เต้าหู้อ่อนยังสามารถทำได้โดยไม่ต้องทำการกดน้ำออกคือเมื่อตกตะกอนเสร็จแล้วจะทำการบรรจุลงถุงพลาสติกหรือกล่องบรรจุได้ทันที

3) เต้าหู้หลอด (bagged or silken or filled tofu) มีลักษณะเป็นเต้าหู้ที่มีเนื้อนุ่ม สีขาวนวลเช่นเดียวกับเต้าหู้อ่อน แต่มีวิธีทำที่แตกต่างกัน คือ จะนำน้ำนมถั่วเหลืองมาบรรจุลงในหลอดพลาสติกและสุญญากาศไปพร้อมกับการตกตะกอน โปรตีนด้วยกลูโคโนเดลต้าแลกโตน (glucono-delta-lacton) โดยไม่มีการคนและกดทับเพื่อเอาน้ำออก ทำให้ได้เต้าหู้ที่มีความชื้นสูงและมีลักษณะที่ลื่นกว่าเต้าหู้อ่อน (จันทร์และคณะ, 2546; อุบล, 2546)



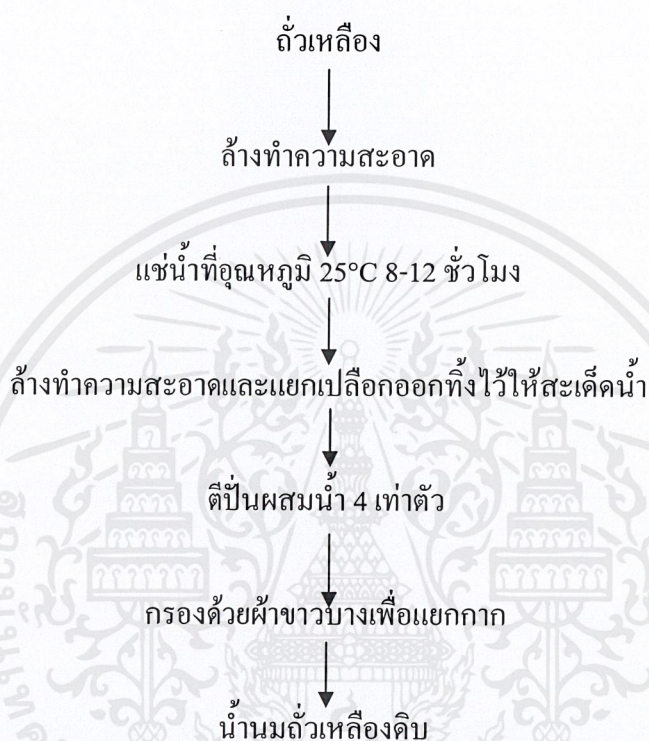
รูปที่ 2.4 (ก) เต้าหู้แข็ง (ข) เต้าหู้อ่อน และ (ค) เต้าหู้หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การผลิตเต้าหู้อ่อน

การผลิตเต้าหู้อ่อนประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง การให้ความร้อนและการตกตะกอน

2.3.2.1 การเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง การเตรียมน้ำนมถั่วเหลืองสำหรับทำเต้าหู้มีขั้นตอนการผลิต ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง

ที่มา : ดัดแปลงจาก ปริญญาพร เขียวขำ (2544)

ขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการเตรียมน้ำนมถั่วเหลืองได้แก่ การแช่ถั่วเหลือง การบดและการกรอกแยกกาก รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

การแช่ถั่วเหลือง ควรล้างทำความสะอาดถั่วเหลืองก่อนการแช่เพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกออก การแช่ถั่วเหลืองทำให้เนื้อถั่วเหลืองนิ่มสามารถนำไปบดและสกัดของแข็งและโปรตีนที่ละลายน้ำได้มาก ทำให้ได้ปริมาณผลผลิตสูง ผลิตภัณฑ์น้ำนมถั่วเหลืองที่ได้ไม่เกิดรสขม สีไม่คล้ำและมีอายุการเก็บรักษาที่ยืนยาว (Shurtleff and Aoyagi, 1979) ในระหว่างการแช่ถั่วเหลืองพบว่าเมื่อแช่ถั่วเหลืองเป็นเวลานานจะเกิดการสูญเสียปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมากขึ้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากจุลินทรีย์ (Liu, 1997) นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการแช่ถั่วเหลืองยังมีผลต่อระยะเวลาในการแช่ คือ การแช่ถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 80°C จะทำให้ถั่วเหลืองนิ่มและสามารถนำไปบดเพื่อสกัดเอกลำนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรตีนได้เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C ใช้เวลา 3 ชั่วโมง เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 5°C และที่อุณหภูมิทั้งสองดังกล่าว สามารถแช่ถั่วเหลืองได้นานถึง 24 ชั่วโมงโดยถั่วเหลืองไม่มีการเปลี่ยนแปลง (น้ำทิพย์, 2540)

ศิริพร คลกัคนิยมกุล กล่าวว่าหลังจากการล้างทำความสะอาดถั่วเหลืองเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกไปแล้ว ควรนำไปแช่น้ำ 8-10 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างของเซลล์นุ่มลงและเพิ่มอัตราการสกัดสารอาหารให้เร็วขึ้นได้

การบดถั่วเหลืองและการกรองแยกกาก เป็นการนำเมล็ดถั่วเหลืองแห้งไปบดหรือปั่นให้ละเอียดแล้วเติมน้ำสะอาดตามอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นที่ระดับความเร็วสูงสุดนานประมาณ 3 นาทีแล้วนำไปกรองเอากากออกด้วยผ้าขาวบางหรือนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ระดับปานกลางนาน 15 นาที และอาจนำส่วนที่เป็นกากนี้ไปทำการสกัดอีกครั้งด้วยน้ำสะอาด (ศิริพร, 2552)

2.3.2.2 การให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลือง

โปรตีนในถั่วเหลืองมีคุณสมบัติที่สามารถเกิดการฟอร์มเจลได้ การเกิดเจลสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใช้สารตกตะกอนโปรตีน โดยโปรตีนถั่วเหลืองสะสมอยู่ในเซลล์ที่เรียกว่า Protein bodies หรือ Storang proteins เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide linkage) โปรตีนถั่วเหลืองสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ อัลบูมิน (albumin) 10% และโกลบูลิน (globulin) 90% ซึ่งสามารถสกัดออกได้ด้วยสารละลายเกลือเจือจาง ส่วนของโกลบูลินประกอบด้วยโปรตีน 4 กลุ่มย่อย (fraction) คือ 2S (15%) 7S (34%) 11S (41.9%) และ 15S (9.1%) ตามอัตราการตกตะกอน (sedimentation rate) ของโปรตีนในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.5 M ionic strength pH 7.6 (Koshiyama, 1969) ส่วนของ 11S และ 15S เป็นโปรตีนบริสุทธิ์ที่เรียกว่าไกลซินิน (glycinin) และสายพอลิเมอร์ของไกลซินิน ตามลำดับ ส่วน 7S เป็นส่วนผสมของเบต้า-คอนโกลิซินิน (β -conglycinin) การฟอร์มเจลของโปรตีนถั่วเหลืองจะเกี่ยวข้องกับโมเลกุลของ 7S และ 11S globulin โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใดๆของโมเลกุลทั้งสองจะมีผลต่อการเกิดเจล (น้ำทิพย์, 2544) ซึ่งโครงสร้างจตุรภูมิ (quaternary structure) ของโปรตีนชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช (pH) และสภาพอ็อกซิเจนที่มีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันด้วยสะพานไดซัลไฟด์ (Single disulfide bridge)

การให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองทำให้โปรตีน globulin เปลี่ยนแปลงหรือเสียสภาพไปจะต้องมีอุณหภูมิสูงและสภาพอ็อกซิเจนที่แข็งแรง (Renkema and Vlité, 2002) สำหรับไกลซินินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิประมาณ 80-90°C และเบต้าคอนโกลิซินินเปลี่ยนสภาพเป็นเจลที่อุณหภูมิประมาณ 60-75°C (Renkema and Vlité, 2002) และหากให้ความร้อนมากเกินไปหมู่ซัลไฟไฮดริลในโปรตีนจะถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศ ส่งผลให้ความสามารถในการเกาะกันของเจลลดลง นอกจากนี้

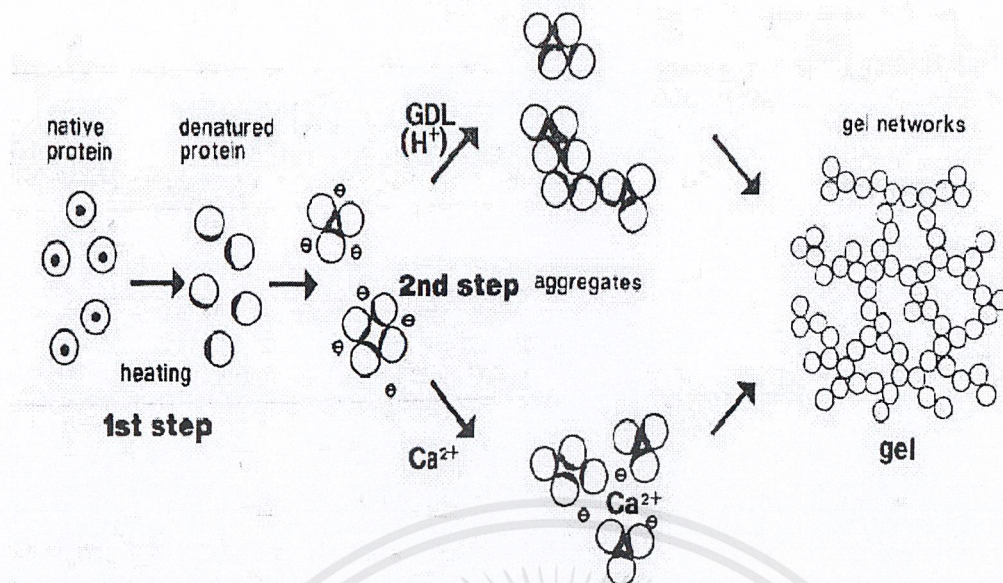
การให้ความร้อนยังมีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายสารต่อต้านคุณค่าทางโภชนาการ (antinutritional factors) ในถั่วเหลืองดิบและเป็นการฆ่าเชื้อในระดับพาสเจอร์ไรซ์อีกด้วย (ศิริพร, 2552)

ในสภาวะปกติส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของโมเลกุลโปรตีน globulin จะอยู่ด้านในเมื่อได้รับความร้อนโมเลกุลจะคลี่ออกทำให้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำออกมาอยู่ด้านนอกและจับกันเองส่งผลให้โปรตีนมีประจุเป็นลบพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับสารตกตะกอนและเกิดเป็นเจลต่อไป ดังรูปที่ 2.7 (1st step)

การให้ความร้อนมีผลต่อความหนืดของน้ำนมถั่วเหลือง โดยมีแนวโน้มว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำค่าความหนืดของน้ำนมถั่วเหลืองจะมีค่าต่ำกว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูง (Liu, 1997) ความหนืด (Viscosity) เป็นสมบัติทางรีโอโรยี (Rheology) ของของเหลวโดยมีความสำคัญในด้านสมบัติของอาหารและวัสดุชีวภาพ เพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพของอาหาร ที่มีสมบัติเป็นของเหลว หรือ กึ่งของแข็ง (semi-solid food) นอกจากนั้นยังมีส่วนสำคัญในการออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) และ ระบบถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 แบบ ดังนี้

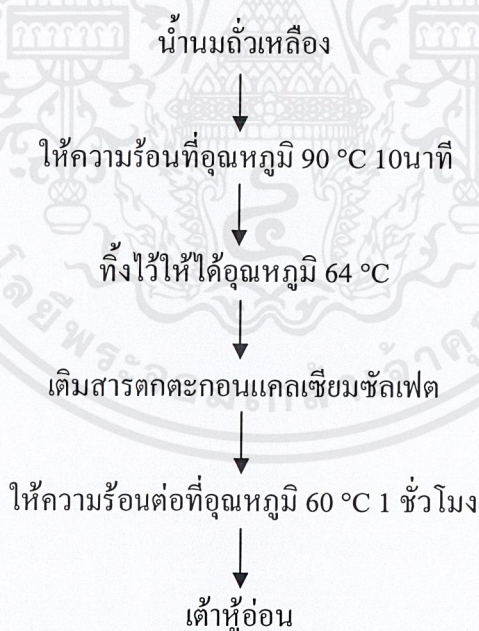
1. Newtonian Fluid : เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือความเร็วในการกวน เช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน แอลกอฮอล์ รวมทั้งน้ำนมถั่วเหลืองด้วย
2. Non Newtonian Fluid: เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ อุณหภูมิหนึ่งๆ ค่าความหนืดไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวน (สายัณห์และคณะ, 2549)

2.3.2.3 การตกตะกอน หลังจากได้น้ำนมถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนแล้ว นำมาตกตะกอนด้วยโลหะบางชนิด เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) หรือแมกนีเซียม (Mg^{2+}) จากนั้นนำไปให้ความร้อนต่อประมาณ 1 ชั่วโมง ก็จะได้ผลิตภัณฑ์เต้าหู้อ่อน ดังรูปที่ 2.7 โดยโปรตีนที่ถูกทำให้เสียสภาพด้วยความร้อนและจะมีประจุเป็นลบ ทำปฏิกิริยากับประจุของสารตกตะกอน โดยเกิดการสร้างพันธะเคมีภายในโมเลกุลของโปรตีน ทำให้โปรตีนมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าและเข้ามาจับกันด้วยปฏิกิริยา hydrophobic เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย (gel network) ขึ้นจับตัวกันเป็นก้อนและตกตะกอนลงมา ดังรูปที่ 2.6 (2nd step)



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดเจล โปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองเมื่อเติม CaSO_4 และ GDL (วงกลมหมายถึง โมเลกุลของโปรตีนและส่วนที่เป็นสีดำคือบริเวณที่เป็น hydrophobic)

ที่มา : Kohyama et al. (1995)



รูปที่ 2.7 การผลิตเต้าหู้อ่อน

ที่มา : คัดแปลงจาก ปรียาพร เขียวจำ (2544)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตกตะกอนนอกจากโปรตีนจะตกตะกอนลงมาแล้วยังมีส่วนของไขมันตกตะกอนลงมาด้วย จึงทำให้เต้าหู้ที่ได้มีไขมันประกอบอยู่ด้วย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะมีความสัมพันธ์กับ ลักษณะเนื้อสัมผัสและปริมาณผลผลิต โดยปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สูงจะทำให้เต้าหู้ที่ได้มี ลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งและปริมาณของเต้าหู้ลดลง (Beddows and Wang, 1987a; Shih et al., 1997) สารตกตะกอนต่างชนิดกันจะทำให้ได้ลักษณะของเต้าหู้ที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่เหมาะสมทำให้เวย์ (whey) โส ถ้าน้อยเกินไปเวย์จะ ขุ่นเนื่องจากโปรตีนตกตะกอนได้ไม่หมด ถ้าสูงเกินไปส่งผลให้เวย์มีรสขมและมีสีเหลืองใส เต้าหู้ที่ ได้จะมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง (Catharing et al., 1999; ณรงค์, 2528; สมชายและคณะ, 2525) ปริมาณของ สารที่เหมาะสมของสารตกตะกอนจะอยู่ในช่วง 2-3% โดยน้ำหนักของถั่วแห้ง (Shurtleff and Aoyagi, 1979) โดยสารตกตะกอนที่นิยมใช้ในการผลิตเต้าหู้ ได้แก่ แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) กลูโคโนแลคโตน แลคโตน (Glucono delta Lactone, GDL) เอนไซม์โปรติโอไลติกและเอนไซม์โปรตีนเอส ซึ่ง สารประกอบซัลเฟต ($CaSO_4$ และ $MgSO_4$) เป็นสารตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับทำเต้าหู้อ่อน เนื่องจากทำให้ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ที่ได้มีลักษณะอ่อนนุ่มน้ำได้มาก ใช้ง่าย ราคาถูกและให้ปริมาณ ผลผลิตสูง (Shurtleff and Aoyagi, 1979) ปริมาณที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 0.02-0.04 M จะให้เต้าหู้ที่มี ลักษณะค่อนข้างแข็ง สามารถให้ปริมาณผลผลิต 4.45-5.26 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักถั่วแห้ง

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิต ลักษณะและคุณภาพของเต้าหู้อ่อน

2.4.1 องค์ประกอบและความแตกต่างของวัตถุดิบ ถั่วเหลืองแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทั้งในด้าน ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตเต้าหู้ กล่าวคือ องค์ประกอบต่างๆในถั่วเหลืองมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบในน้ำนมถั่วเหลืองและเต้าหู้ อย่างมี นัยสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณโปรตีน กรดไฟติก แคลเซียม ทองแดงและเหล็ก โดยการใช้ถั่วเหลือง ที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะได้เต้าหู้ที่มีปริมาณโปรตีนสูง มีความแน่นเนื้อและความยืดหยุ่นมากกว่า การใช้ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ เช่นเดียวกับการใช้ถั่วเหลืองที่มีไขมันสูงเต้าหู้ที่ได้ก็จะมี ปริมาณไขมันสูงลักษณะเนื้อนุ่ม (Liu, 1997)

2.4.2 อุณหภูมิในขั้นตอนการบดถั่วเหลือง อุณหภูมิในการบดมีผลต่อคุณภาพของเต้าหู้ คือ เมื่อ อุณหภูมิในการบดถั่วเหลืองเพิ่มจาก 0 เป็น $50^{\circ}C$ จะมีผลทำให้ความหนาแน่นเนื้อของเต้าหู้ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณหมู่ซัลไฟไฮดริลจะถูกทำลาย ทำให้มีปริมาณลดลง (Lui, 1997)

2.4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดหรือความเข้มข้นของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลือง เมื่ออัตราส่วนของน้ำ ต่อถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำนมถั่วเหลืองก็จะลดลงและส่งผลให้ความเข้มข้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองลดลงทำให้ปริมาณผลผลิตและความสามารถในการเกาะกันของเต้าหู้จะลดลง (Liu, 1997)

2.4.4 การให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลือง ทำให้เกิดการรวมตัว (aggregation) และการต่อกันเป็นสายยาว (polymerization) ของโปรตีนถั่วเหลือง โดยเฉพาะโปรตีนพวกที่เป็น 11S โดยจะเกี่ยวข้องกับ การเชื่อมด้วยพันธะซัลไฟไฮดริลไคซัลไฟด์เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจำนวนหมู่ซัลไฟไฮดริล (-SH group) จะเพิ่มขึ้นทันทีจนถึงจุดสูงสุดแล้วจะลดต่ำลงแต่หากให้ความร้อนมากไปหมู่ซัลไฟไฮดริลในโปรตีนจะถูกรอกออกซิไดซ์ด้วยอากาศทำให้ประสานกันลดลง (Liu, 1997)

2.4.5 ชนิดของสารตกตะกอน โดยทั่วไปสารตกตะกอนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ เกลือ กรดและ เอนไซม์ ซึ่งสารตกตะกอนที่นิยมใช้ในการผลิตเต้าหู้ ได้แก่ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต กลูโคโนแลคติกแอซิด เป็นต้น โดยการใช้สารตกตะกอนต่างชนิดกันจะได้เต้าหู้ที่มีคุณภาพ ต่างกันไป (Liu, 1997)

2.4.6 ความเข้มข้นของสารตกตะกอน ความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่ใช้เป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพและปริมาณผลผลิตของเต้าหู้ กล่าวคือ หากใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจะได้เวย์ที่โปร่งใส มีรสหวานและไม่มีส่วนที่ไม่ตกตะกอนเหลืออยู่แต่ถ้าความเข้มข้นของสารตกตะกอนต่ำเกินไปจะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของโมเลกุลของโปรตีนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นเคิร์ดที่แข็งแรงได้และหากใช้ความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้อัตราการขยายตัวของโมเลกุลสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการอัดตัวแน่นของโครงสร้างร่างแหและสูญเสียน้ำเพิ่ม เคิร์ดมีลักษณะที่หยาบ เว่ยมีรสขมเล็กน้อย โดยปริมาณที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของสารตกตะกอนและลักษณะของเต้าหู้ที่ต้องการ (Liu, 1997)

2.4.7 อุณหภูมิที่ใช้ในการตกตะกอน หลังจากเติมสารตกตะกอนมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ การตกตะกอนที่อุณหภูมิสูง โปรตีนจะมีพลังงานกระตุ้นสูง (active energy) ทำให้มีการตกตะกอนเร็ว ส่งผลให้เต้าหู้อุ้มน้ำได้น้อยเต้าหู้จึงมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งและหยาบ ปริมาณผลผลิตที่ได้ต่ำกว่าการตกตะกอนที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าตกตะกอนโปรตีนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C จะทำให้เกิดการตกตะกอนที่ไม่สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้ออ่อนมีน้ำสูง (Catharing et al., 1999) และในการผลิตเต้าหู้อ่อนจะใช้เวลาในการตกตะกอนประมาณ 20-30 นาทีส่วนเต้าหู้แข็งใช้เวลาประมาณ 15 นาที (Shi and Ren, 1993) นอกจากนี้การให้ความร้อนยังช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษา ทำลายสารบางชนิดในถั่วเหลืองที่ทำให้ร่างกายได้รับสารอาหารน้อยลงและยังทำลายเอนไซม์ซึ่งเป็นสาเหตุที่

ทำให้เกิดกลิ่นฉุน ความร้อนยังทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพทางธรรมชาติทำให้อย่างง่ายขึ้น (Liu, 1997; Catharing, 1999)

2.4.8 ระยะเวลาในการตกตะกอน ระยะเวลาในการตกตะกอนมีผลต่อลักษณะและคุณภาพของเต้าหู้ โดยถ้าให้เวลาในการตกตะกอนน้อยเกินไปจะเกิดการตกตะกอนได้ไม่สมบูรณ์ แต่หากให้เวลาในการตกตะกอนมากเกินไป อุณหภูมิของระบบจะลดลงทำให้ยากต่อการขึ้นรูป ทั้งนี้ในการทำเต้าหู้หลอดนิยมใช้เวลาในการตกตะกอน 30 นาที เต้าหู้อ่อนใช้เวลา 20-25 นาที เต้าหู้แข็งใช้เวลา 10-15 นาที (Liu, 1997)

2.4.9 ปัจจัยอื่นๆ นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อการผลิตและคุณภาพของเต้าหู้ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลือง โครงสร้างละเอียดและขนาดอนุภาคของโปรตีนที่ตกตะกอน ความเป็นกรดต่าง เป็นต้น กล่าวคือ สถานที่ ฤดูกาลและปีที่ปลูกถั่วเหลืองมีผลต่อปริมาณโปรตีนชนิด 7S และ 11S ทำให้ถั่วเหลืองที่ได้มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ส่วนความหนาของโครงสร้างร่างแห ขนาดของโปรตีนและการรวมกลุ่มของโปรตีนในโครงสร้างร่างแหมีความสัมพันธ์กับความแข็งของเต้าหู้ โดยส่วนมากกลุ่มโปรตีนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะได้จากโปรตีนชนิด 11S นอกจากนี้การแช่แข็งมีผลทำให้ได้เต้าหู้ที่มีโครงสร้างละเอียดด้วย (Liu, 1997)

2.5 การตรวจวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน

ลักษณะของเต้าหู้อ่อนที่มีคุณภาพดีต้องมีเนื้อสัมผัสนุ่ม เรียบ เกาะติดกันไม่เป็นยางและไม่แข็งเกินไป ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมีผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค สถานะต่างๆ ในการผลิตเต้าหู้อ่อน เช่น อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของสารที่ช่วยให้แข็งตัว การคนและอัตราส่วนระหว่างน้ำกับถั่วเหลืองจะมีผลต่อคุณภาพและผลผลิตของเต้าหู้อ่อนต่างกัน นอกจากนี้การผลิตเต้าหู้โดยใช้ถั่วเหลืองสายพันธุ์ต่างๆ จะทำให้คุณภาพและผลผลิตเต้าหู้อ่อนแตกต่างกันด้วยเนื่องจากถั่วเหลืองแต่ละสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกันด้วย (Lim et al., 1990)

การใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส Texture Analyzer ของเต้าหู้อ่อนเป็นวิธีวิเคราะห์ค่าทางกายภาพ ซึ่งออกแบบมาเพื่อวัดค่าให้มีความใกล้เคียงความรู้สึกของมนุษย์มากที่สุดทั้งความรู้สึกที่เกิดจากมือและความรู้สึกสัมผัสที่เกิดจากปาก เช่น เคี้ยวอาหาร ส่วนใหญ่เครื่องมือจะวัดค่าแรงต้านที่เกิดจากการสัมผัส (กิตติชัย, 2535)

Tang (2006) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองต่อความแข็งของเจลเต้าหู้ทดสอบความแข็งของเจลเต้าหู้ด้วยเครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2, Satable Micro system Ltd., England) โดยวิธีทดสอบแบบกด ด้วยหัวกดทรงกระบอก (Part No.P/0.2555, Batch No.3012) วัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งของเจลเต้าหู้ที่เวลาต่างๆ ที่ความสูงเริ่มต้น 50% crosshead speed 1 mm/s maximal stress 50% ทดสอบโดยใช้น้ำหนักถ่วงเหล็ก 5 ml บรรจุในถุงปิด (20×25 mm) ตกตะกอนด้วยเอนไซม์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 37°C ผลที่ได้คือ ที่การให้ความร้อนไปถึงอุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 10 นาที หรือ 30 นาทีที่มีความแข็งของเจลสูงสุดคือ 18.1 กรัม

Liu et.al. (2003) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ทำให้โปรตีนถั่วเหลืองเกิดการเสียสภาพต่อสมบัติทางกายภาพของเต้าหู้โดยใช้น้ำหนักถ่วงเหล็ก 3 ตัวอย่างที่มีปริมาณของแข็งต่างกัน ทดสอบความแข็งของเจลเต้าหู้หลอด (ขนาด 34×60 mm) โดยใช้รีโอมิเตอร์ (Rheometer) (RT-2002D.D, Rheo Tech Co., Tokyo, Japan) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้หัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm วิธีทดสอบแบบกด ความเร็วหัวกด 6 cm/min ทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 4 ครั้งที่ตั้งตำแหน่งต่างกัน 4 ตำแหน่ง จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ทำให้โปรตีนถั่วเหลืองเกิดการเสียสภาพมี 2 อุณหภูมิคือ 92°C สำหรับ 11s glycine และ 71°C สำหรับ 7s glycine จึงเลือกให้ความร้อนน้ำหนักถ่วงเหล็กแบบสองขั้นตอน ผลที่ได้คือการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนทำให้ค่ายังมอดูลัสของเต้าหู้สูงกว่าการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียว 20%

Wang et al. (2006) ศึกษารูปแบบการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิกแบบสองขั้นตอนในกระบวนการผลิตเต้าหู้และนำเต้าหู้ขนาด 23×15mm มาทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้รีโอมิเตอร์ (Rheometer) (RT-2002 D.D, Rheo Tech Co., Tokyo, Japan) ทดสอบแบบกด ใช้หัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25mm ความเร็วหัวกด 300 mm/min จากการทดสอบพบว่า การให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนทำให้ค่าความเค้นและค่ายังมอดูลัสของเต้าหู้สูงกว่าการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียว 12.2% และ 16.2% ตามลำดับ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเต้าหู้

Renkema and Vlité (2002) ศึกษาการให้ความร้อนต่อการเกิดเจลของโปรตีนถั่วเหลืองที่มีค่าพีเอช (pH7) เป็นกลางพบว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 84°C ซึ่งเกิดจากการเสียสภาพของไกลซีนิน (glycine) และเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 90°C ค่าความยืดหยุ่นของเจลเพิ่มสูงขึ้นจากการเสียสภาพของโปรตีน ค่าความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการเชื่อมกันในโครงสร้างเป็นโครงข่าย 3 มิติ และเมื่อลดอุณหภูมิของเจลลง ค่าความยืดหยุ่นของเจลจะเพิ่มขึ้นอีก ค่าความยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดอุณหภูมินี้เกิดจากการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ เพราะการเชื่อมต่อกัน (rearrangement) ของโครงข่ายจะไม่เกิดขึ้นในกระบวนการลดอุณหภูมิ

Lui et al. (2004) ศึกษาการให้ความร้อนน้ำหนักถ่วงเหล็กแบบขั้นตอนเดียวและแบบสองขั้นตอน (one and two step) พบว่าในการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียวที่เวลา 5 7 และ 10 นาที ค่าความหนืดของน้ำหนักถ่วงเหล็กไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่มีผลทำให้เต้าหู้มีความแข็ง (gel hardness) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอน

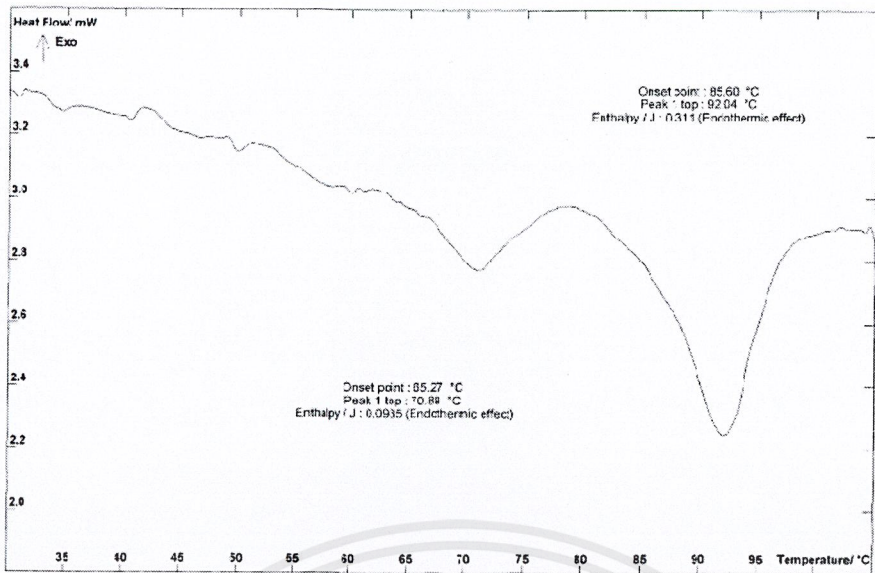
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(two step heating) (75°C 5 นาที แล้ว 95°C 5 นาที) ที่ค่าความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองและความแข็ง (hardness) ของเต้าหู้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ความหนืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก $1.6\text{-}23.8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากผลลัพท์นี้ Liu et al. (2004) ได้แนะนำว่าอุณหภูมิเป็นสิ่งที่ทำให้โปรตีนถั่วเหลืองเสียสภาพและรวมกลุ่มกันโดยที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ โครงสร้างของโปรตีนจะคลายตัวมากกว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูง และการคลายตัวของโปรตีนดูเหมือนว่าจะมีความคงที่ ส่วนในกรณีที่อัตราการให้ความร้อนสูงองค์ประกอบทั้งหมดของโปรตีนอาจจะเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลพร้อมกันภายในระยะเวลาสั้นๆ ดังนั้น โปรตีนที่เสียสภาพแล้วหรือคลายตัวเสร็จสมบูรณ์แล้ว อาจจะรวมกลุ่มกันเองได้อย่างง่ายดาย และอาจจับตัวกันเองตกตะกอนไปก่อนได้ ส่งผลให้ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ เช่น น้อยกว่า $6.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูงๆ เช่น $23.8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากข้อมูลการทดลองแนะนำว่าควรให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้เต้าหู้ที่มีความแข็ง ที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามที่อัตราการให้ความร้อนระหว่าง $1.6\text{-}6.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เต้าหู้มีความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างนัยสำคัญ ($p>0.05$)

Nagano et al. (1992) และ Kitabatake et al. (1990) ทำการตรวจสอบการเสียดสภาพธรรมชาติของโปรตีนถั่วเหลืองขณะการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งเกิดการเสียดสภาพของโปรตีน ไกลซีนิน และเบต้าคอนไกลซีนิน ใช้การทดสอบและวิเคราะห์ด้วย Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่ามีจุดที่มีปฏิกิริยาดูดซับความร้อนสูงสุดสองจุดระหว่างการให้ความร้อนจาก $20\text{-}90^{\circ}\text{C}$ จุดเริ่มต้นและจุดพีคของอุณหภูมิสำหรับปฏิกิริยาดูดซับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำคือ 65.3 และ 70.9°C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเสียดสภาพ (denature) ของระบบโปรตีนเบต้าไกลโคซีนินบริสุทธิ์ จุดเริ่มต้นและจุดพีคของอุณหภูมิสำหรับปฏิกิริยาดูดซับความร้อนที่อุณหภูมิสูง เป็น 85.6 และ 90.2°C ซึ่งเกิดขึ้นเกือบจะพร้อมกันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเสียดสภาพของไกลซีนินที่ใช้ในการแยกสารละลายโปรตีนถั่วเหลือง

Hashizume et al. (1975) ให้ความร้อนเพื่อสกัดไขมันของกากโปรตีน ที่อุณหภูมิ 60 70 80 90 100°C พบว่ากลุ่มโปรตีน 7S ลดลงที่อุณหภูมิ 60°C และไม่ปรากฏที่อุณหภูมิ 70°C ส่วนกลุ่มของไกลซีนินไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียสและเริ่มลดลงที่อุณหภูมิ 90°C จนกระทั่งไม่ปรากฏที่อุณหภูมิ 100°C

Guo et al. (1997) รายงานว่าหน่วยย่อยของเบต้าคอนไกลซีนิน ไม่ปรากฏเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75°C 5 นาที ดังนั้นการให้ความร้อนที่จุดนี้จึงอาจสรุปได้ว่าเบต้าคอนไกลซีนินเกิดการเสียดสภาพที่จุดนี้ โดยไม่เกี่ยวกับไกลซีนิน จากรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายได้ว่าไกลซีนินจะแยกตัวออกมาหลังจากเมื่อให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองไปจนถึงอุณหภูมิ 95°C



รูปที่ 2.8 Differential scanning calorimetry ของกระบวนการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองดิบ
ที่มา : Liu et al. (2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุประสงค์และวัสดุอุปกรณ์

3.3.1 วัตถุประสงค์

- 1) ถั่วเหลืองแห้งพันธุ์เชียงใหม่ บจก.เซ็นทรัล ฟู้ด รีเทล สาขาลาดกระบัง
- 2) แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4)
- 3) คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- 4) โพแทสเซียมโซเดียมเตตระไฮดรอกไซด์ ($\text{NaKC}_4\text{H}_2\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 6) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.3.2 วัสดุอุปกรณ์

- 1) เครื่อง Hot plate ยี่ห้อ Imarflex รุ่น If 830 800W
- 2) คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม 34907A DATA LOGGER และเครื่อง Data logger ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34970A บริษัท อินเทอร์เน็ตชั้นนำเนล รีเสิร์ช คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 3) Voltmeter ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 117 TRUE RMS
- 4) Clam meter ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 322
- 5) เครื่อง Water bath รุ่น OB22 ยี่ห้อ MEMMERT
- 6) เครื่อง Spectrophotometer รุ่น Libra S12 ยี่ห้อ biochrom ประเทศอังกฤษ
- 7) เครื่อง Variac รุ่น NPC 44J395 พร้อม Breaker รุ่น ZN-58, JAP
- 8) เครื่องวัด RLC ยี่ห้อ FLUKE รุ่น pm6305 programmable automatic RLC ประเทศอเมริกา
- 9) pH meter รุ่น C830P ยี่ห้อ consort ประเทศเบลเยียม
- 10) เครื่องวัดความหนืด รุ่น RVTDV-I ยี่ห้อ Brookfield ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 11) เครื่อง texture Analyzer รุ่น TA.TX plus (Stable Micro System) ประเทศอังกฤษ
- 12) เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UX3200G Japan และเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Yamato รุ่น HB-120
- 13) เครื่องแก้วต่างๆ เช่น บีกเกอร์ แท่งแก้วคนสาร หลอดทดลอง ขวดปรับปริมาตร ปิเปต หลอดหยด เทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น
- 14) เครื่องครัวและอุปกรณ์อื่นๆ เช่น หม้อ กะละมัง ทัพพี มีด เขียง กะลั่งมัง ผ้าขาวบาง เป็นต้น

3.2 การเตรียมการทดลอง

3.2.1 น้ำนมถั่วเหลือง

ล้างถั่วเหลืองให้สะอาด แช่น้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง (26°C) 8-12 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำ บั่นรวมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:4 ถั่วเหลืองแห้งค่อน้ำ และกรองด้วยผ้าขาวบาง น้ำนมถั่วเหลืองที่ได้วัดค่าคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ อุณหภูมิ pH ความหนืด ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า

3.2.2 การเตรียมสารละลายไบยูเรท

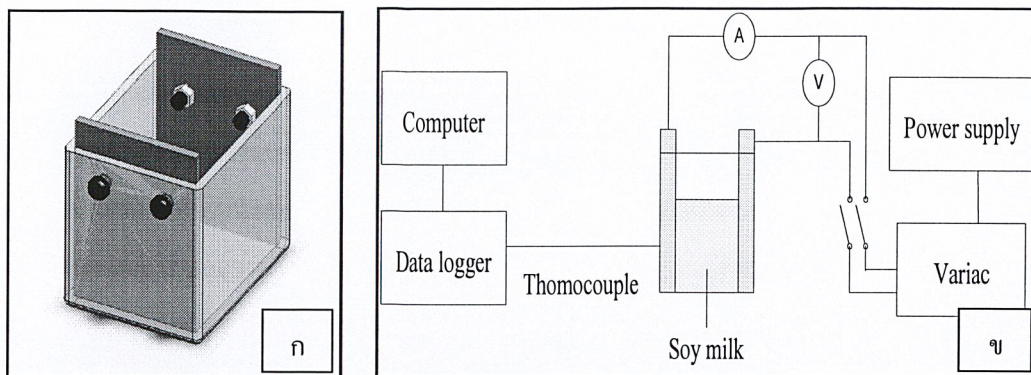
ชั่งสาร คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 1.5 g และโพแทสเซียมโซเดียมไตรอะคราเตท ($\text{NaKC}_4\text{H}_2\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 6 g เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 500 ml เติมน้ำ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 10 จำนวน 300 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1000 ml เขย่าให้เข้ากัน

3.2.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

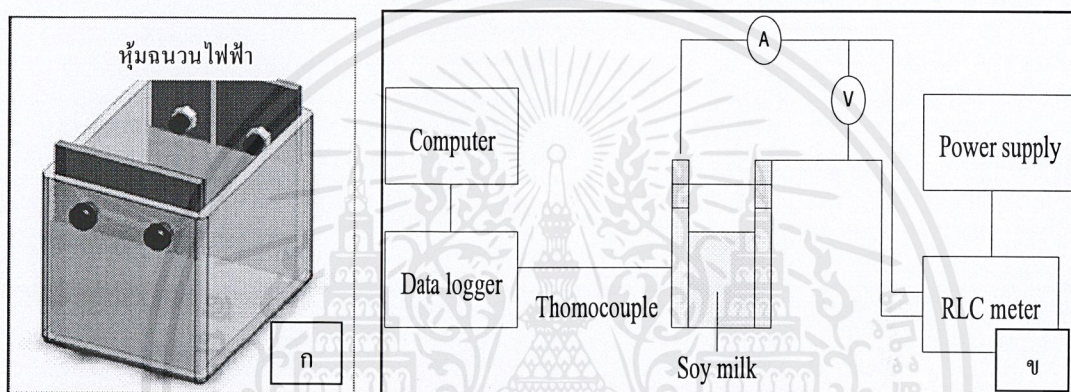
เตรียมน้ำเวย์เต้าหู้ปริมาตร 0.05 ml เติมน้ำกลั่น 0.45 ml ใส่ในหลอดทดลอง ผสมสารละลายไบยูเรท 2 ml เขย่าให้เข้ากัน วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 nm

3.3 การสร้างชุดอุปกรณ์วัด

ชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้าและให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิคประกอบด้วยภาชนะบรรจุทำจากพลาสติกโพลีโพรพิลีนทนความร้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $7 \times 11.2 \times 12$ cm หนา 0.2 cm แผ่นอิเล็กทรอนิกส์จากสแตนเลส AISI304 ขนาด 6×13.8 cm จำนวน 2 แผ่น ประกอบแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับกล่องพลาสติกโดยใช้นี้อตพลาสติกยึดไว้ที่ข้างกล่องทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 3.1(ก) ต่อเข้ากับสายวัดอุณหภูมิโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล typeK ซึ่งต่อกับเครื่อง Data logger บันทึกรูปร่างอุณหภูมิที่ได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ 34907A DATA LOGGER ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้วย Variac วัดค่าความดันไฟฟ้าโดยใช้ Voltmeter และวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Clamp meter ดังรูปที่ 3.1 (ข) ส่วนภาชนะบรรจุของอุปกรณ์วัดค่าความจุไฟฟ้าประกอบด้วย แผ่นอิเล็กทรอนิกส์หุ้มฉนวนด้วยพลาสติกและเทปพันสายไฟ ดังรูปที่ 3.2 (ก) และต่อกับเครื่องวัดค่า RLC ดังรูปที่ 3.2 (ข) ใช้ย่านความถี่ 12.8 kHz และ 100 kHz



รูปที่ 3.1 (ก) ภาพขณะบรรจุ (ข) วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าการนำไฟฟ้าและการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิค



รูปที่ 3.2 (ก) ภาพขณะบรรจุ (ข) วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่าความจุไฟฟ้า

3.4 การทดลอง

3.4.1 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดการทดลอง

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นดังนี้ 0.02 0.05 และ 0.17M โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังสมการ 3.1

$$\frac{g}{M_w} = \frac{CV}{1000} \quad (3.1)$$

โดยที่ g = ปริมาณของ NaCl (g)

C = ความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ (mol/l)

V = ปริมาตรตัวทำละลายคงที่ ในที่นี้ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย 80 cm³

M_w = น้ำหนักโมเลกุลของ NaCl เท่ากับ 58.44 g/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบแผ่นอิเล็กโทรดกับภาชนะบรรจุรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 3x7x12 cm ต่อชุดการทดลองนี้กับวงจรไฟฟ้า เติมสารละลายเกลือ โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาตร 80 ml อุณหภูมิ 20°C ในภาชนะดังกล่าว ปล่อยกระแสไฟฟ้าสลับที่แรงดันไฟฟ้า 17.5V จากนั้นบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าความนำไฟฟ้าจากสมการที่ 2.1 เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่ได้กับค่าการนำไฟฟ้าอ้างอิงจาก Palaniappan et al. (1991) ทำการทดลองแบบเดียวกัน โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็น 0.05 และ 0.17 M ตามลำดับ

3.4.2 การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองขณะการให้ความร้อน

3.4.2.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้า

เทน้ำมันถั่วเหลืองในภาชนะบรรจุของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า ปรับค่าให้ได้ค่าอัตราการให้ความร้อนประมาณ 4.95°C/min บันทึกค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ น้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 90°C บันทึกค่าต่อเนื่องอีกสิบนาที นำค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไปคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจากสมการ 2.1

3.4.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้า

ให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองด้วย hot plate โดยให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองจนอุณหภูมิ 90°C ที่อัตราการให้ความร้อน 7.18°C/min และคงที่ที่ 90°C 10 นาที เทน้ำมันถั่วเหลืองลงในภาชนะบรรจุของอุปกรณ์วัดค่าความจุไฟฟ้า บันทึกค่าความจุไฟฟ้า อุณหภูมิและเวลาตั้งแต่ น้ำมันถั่วเหลืองอุณหภูมิ 90°C จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้องนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสมการ 2.2

3.4.3 การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองขณะการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

3.4.3.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้า

ให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองด้วย hot plate โดยให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 90°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 7.18°C/min และคงไว้ที่อุณหภูมิ 90°C 10 นาที วัดค่าการนำไฟฟ้าและ pH น้ำมันถั่วเหลืองสุก จากนั้นลดอุณหภูมิของน้ำมันถั่วเหลืองโดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ได้ 64°C เทน้ำมันถั่วเหลืองใส่ในสารละลาย CaSO₄ ปริมาตร 5ml ความเข้มข้น 0.32%w/v ที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุของอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า โดยเทน้ำมันถั่วเหลืองใส่ภาชนะดังกล่าวที่ระดับความสูงจากขอบภาชนะ 10 cm ในขณะเดียวกันเขย่าภาชนะด้วยอัตรา 100 รอบ/นาที จากนั้นป้อนแรงดันตกคร่อมให้แผ่นอิเล็กโทรด 17.1V นำอุปกรณ์วัดไว้ใน water bath ที่อุณหภูมิ 60°C ตลอดกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้ บันทึกอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นระยะเวลา 60 นาที นำค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไปคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจากสมการ

2.1 ในขณะที่วัดกันสุ่มตัวอย่างเพื่อวัดการดูดกลืนแสงและค่า pH ในน้ำเวย์ ทุกๆ 3 นาทีในระยะเวลา 20 นาทีและทุกๆ 10 นาทีหลังจากนั้นจนถึง 60 นาที

3.4.3.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้า

เตรียมน้ำนมถั่วเหลืองโดยใช้วิธีเช่นเดียวกับข้อ 3.6.2.1 เติมน้ำนมถั่วเหลืองสุกลงในภาชนะบรรจุของอุปกรณ์วัดค่าความจุไฟฟ้าที่มีสารละลาย CaSO_4 แล้ว วางภาชนะไว้ใน water bath ที่อุณหภูมิ 60°C บันทึกค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการฟอรั่มเจลเป็นเด้าหู้เป็นเวลา 60 นาที นำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากสมการ 2.2

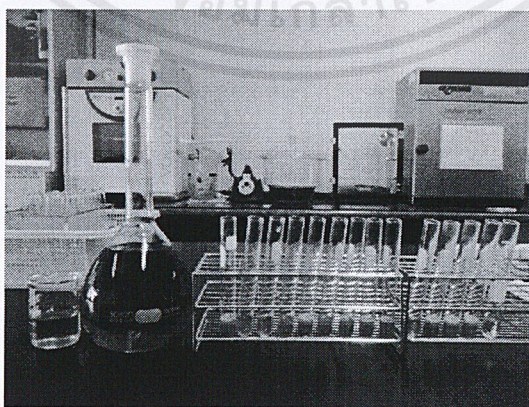
3.4.4 การให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก

เติมน้ำนมถั่วเหลืองใส่ภาชนะบรรจุของอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบโอห์มมิก ปรับแรงดันให้วงจรมีกระแสไฟฟ้าไหล 1A เพื่อทำให้เกิดความร้อนกับน้ำนมถั่วเหลืองตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งน้ำนมถั่วเหลืองมีอุณหภูมิ 90°C และคงอุณหภูมิไว้อีก 10 นาที แบ่งน้ำนมถั่วเหลืองเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้าและความหนืดที่อุณหภูมิห้องอีกส่วนหนึ่งนำไปทำเป็นเด้าหู้เพื่อนำไปวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyser โดยตลอดกระบวนการให้ความร้อนบันทึกอุณหภูมิและเวลาเพื่อหาอัตราการให้ความร้อน ทำการทดลองแบบเดียวกันโดยปรับแรงดันให้วงจรมีกระแสไฟฟ้าไหล 2A และ 3A ตามลำดับ

3.5 การวิเคราะห์

3.5.1 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเวย์โดยวิธีไบยูเรท (Copeland, 1994)

เตรียมน้ำเวย์ของเด้าหู้อ่อนใส่ในหลอดทดลอง 0.5 ml หยดสารไบยูเรทปริมาตร 2 ml เขย่าให้เข้ากันวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที ดังรูปที่ 3.3 วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเวย์โดยวิธีไบยูเรท

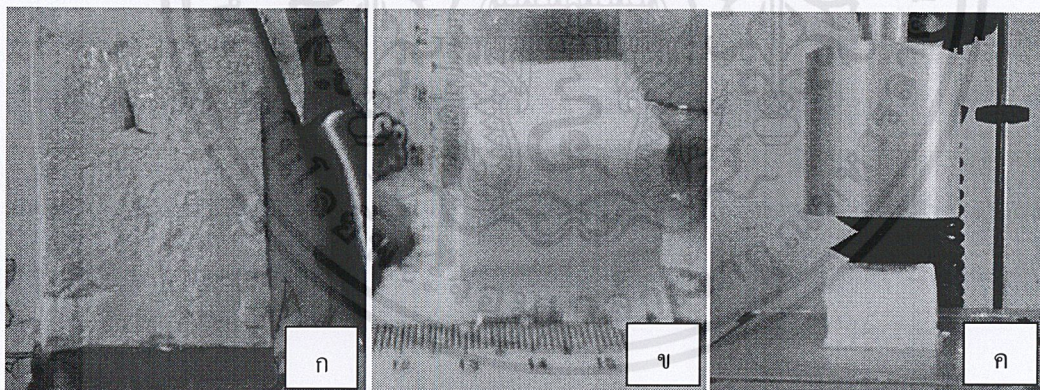
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การวิเคราะห์ความหนืด

วัดความหนืดน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเครื่องวัดความหนืดประเภท wide gap rotational viscometer หัววัดมีลักษณะเป็นจานหมุน spindle หมุนในบีกเกอร์ของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิห้อง (26°C) วัดความต้านทานของน้ำมันถั่วเหลืองต่อการหมุนของหัววัดโดย torque transducer ที่ติดตั้งอยู่ที่ฐานของหัววัด ค่า torque ที่วัดได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของ spindle และความเร็วรอบในการหมุนจากนั้นนำความเร็วรอบและขนาดหัววัดที่ใช้ไปหา factor จากตาราง conversion factor (แสดงการคำนวณ ในภาคผนวก ค) นำมาคูณกับค่าที่อ่านได้จากเครื่อง

3.5.3 การวิเคราะห์สมบัติเนื้อสัมผัสเต้าหู้

วัดเนื้อสัมผัสเต้าหู้โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ตัดเต้าหู้ขนาดกว้าง 30x30x25 mm (รูปที่ 3.4ข) ที่อุณหภูมิห้อง ใช้หัวทดสอบทรงกระบอก (cylindrical plunger) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm (รูปที่ 3.4ค) ระยะที่กดลงขึ้นตัวอย่าง 20% ของชิ้นตัวอย่าง Trigger force 5N ความเร็วหัวกดก่อนทดสอบ (Pre test speed) 5mm/s ความเร็วหัวกดขณะทดสอบ (Test speed) 1mm/s ความเร็วหัวกดหลังทดสอบ (Post test speed) 5mm/s ค่าที่ได้จากกราฟ TPA ระหว่างแรงและเวลา วิเคราะห์ค่า Peak force ค่า Chewiness ค่า Cohesiveness ค่า Gumminess ค่า Hardness และค่า Springiness



รูปที่ 3.4 (ก) ลักษณะเต้าหู้ที่ได้จากการทดลอง (ข) ขนาดของเต้าหู้ที่ใช้ทดสอบเนื้อสัมผัส

(ค) การวัดเนื้อสัมผัสเต้าหู้ด้วยเครื่อง Texture Analyser ใช้หัวทดสอบ cylindrical plunger ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm

พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบ Texture Profile Analysis (TPA) มีดังนี้

1. Hardness, Firmness: ความแข็งของอาหาร หาได้จากแรงสูงสุดจากการกดครั้งแรก
2. Springiness, Elasticity: ความสูงของอาหารที่กลับคืนระหว่างสิ้นสุดการกดครั้งแรกกับการเริ่มการกดครั้งที่สอง หาได้จากอัตราส่วนของเวลาที่ใช้ในการกดให้ถึงแรงสูงสุดครั้งที่สองกับเวลาที่ใช้ในการกดให้ถึงแรงสูงสุดครั้งแรก (T2/T1)
3. Cohesiveness: แรงยึดเกาะกันภายในเนื้อของอาหาร หาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งแรกกับพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งที่สอง (A2/A1)
4. Gumminess: พลังงานที่ต้องใช้ในการบดเคี้ยวอาหารที่เป็น semi-solid ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะกลืนได้ หาได้จาก $\text{Hardness} \times \text{Cohesiveness}$

3.5.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 91 และ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 14.0

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบความเที่ยงตรงของชุดอุปกรณ์วัดค่าการนำไฟฟ้า

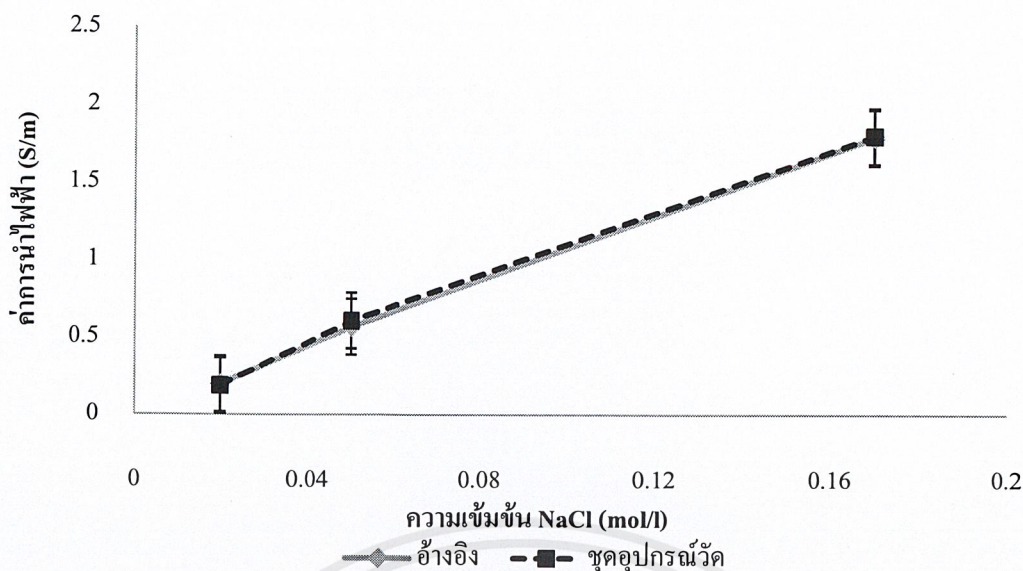
จากการทดสอบการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0.02 0.05 และ 0.17 M ตามลำดับ โดยใช้ชุดอุปกรณ์การวัดค่าการนำไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เพื่อนำค่าความนำไฟฟ้าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าอ้างอิงจาก Palaniappan et al. (1991) พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการนำไฟฟ้าของค่าอ้างอิงและค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์วัดที่สร้างขึ้นที่ความเข้มข้นสารละลาย NaCl ต่างกัน (T=20°C)

ความเข้มข้น (mol/l)	ค่าการนำไฟฟ้า (S/m)				
	อ้างอิง*	ชุดอุปกรณ์วัด			Avg
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
0.02	0.20	0.19	0.19	0.18	0.19
0.05	0.57	0.63	0.69	0.49	0.61
0.17	1.79	2.02	1.53	1.84	1.80

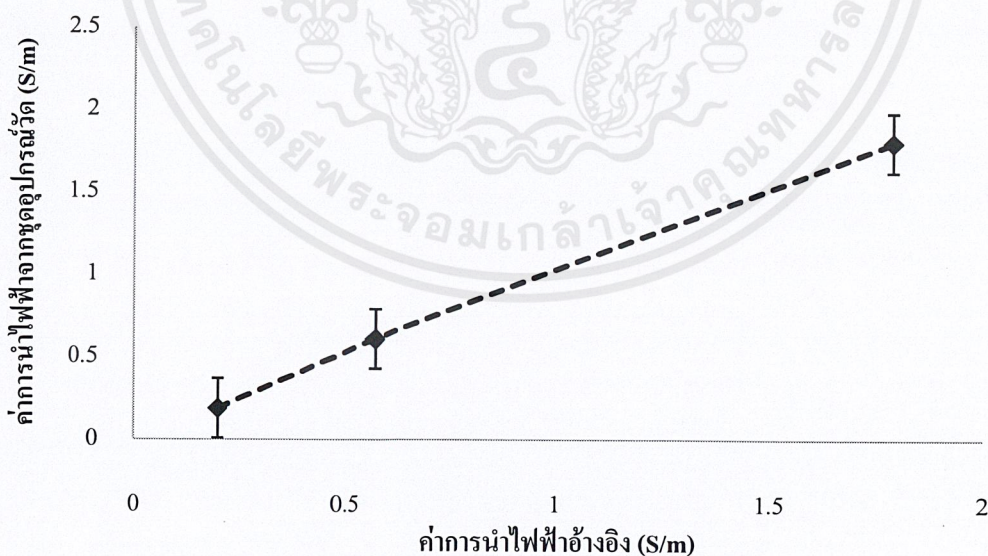
*Data source : Palaniappan and Sastry (1991)

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของค่าอ้างอิงและค่าที่ได้จากชุดอุปกรณ์วัดที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4.1 โดยพบว่าค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการแตกตัวของไอออนของสารละลายเกลือ ซึ่งการแตกตัวของไอออนสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายเกลือส่งผลให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีขึ้นและมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย NaCl กับค่าการนำไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าจากชุดอุปกรณ์วัดและค่าอ้างอิงที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.02 0.05 และ 0.17 mol/l จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.2 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์วัดและค่าอ้างอิงมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นและมีค่า $R^2 = 0.9991$ ดังนั้นค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์วัดมีความน่าเชื่อถือ ก่อนข้างมีความเที่ยงตรงและสามารถนำค่าไปใช้อ้างอิงได้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าอ้างอิงกับค่าการนำไฟฟ้าจากชุดอุปกรณ์วัด

4.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

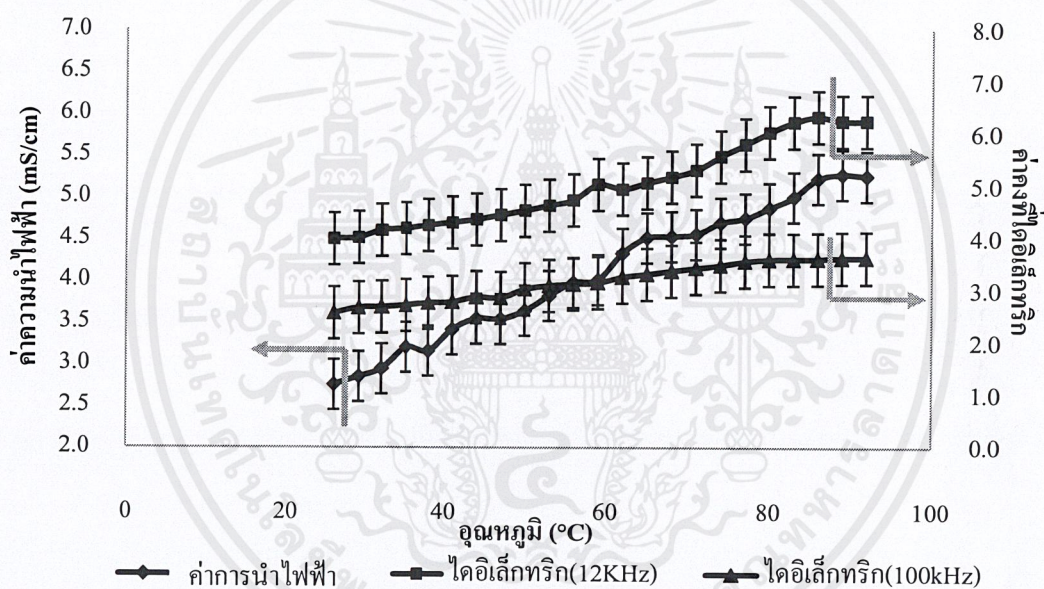
ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าการนำไฟฟ้า (σ) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 26°C ถึง 90°C

อุณหภูมิ (°C)	σ (mS/cm)	ϵ' (12kHz)	ϵ' (100kHz)
26	2.707 ± 0.04	4.037 ± 0.04	2.582 ± 0.01
29	2.759 ± 0.09	4.095 ± 0.09	2.684 ± 0.04
32	2.917 ± 0.06	4.185 ± 0.01	2.678 ± 0.05
35	3.030 ± 0.15	4.242 ± 0.05	2.699 ± 0.03
38	3.171 ± 0.11	4.321 ± 0.07	2.739 ± 0.03
41	3.400 ± 0.09	4.357 ± 0.04	2.793 ± 0.00
44	3.425 ± 0.12	4.431 ± 0.07	2.862 ± 0.01
47	3.552 ± 0.10	4.518 ± 0.07	2.925 ± 0.04
50	3.638 ± 0.05	4.644 ± 0.13	3.038 ± 0.06
53	3.708 ± 0.11	4.719 ± 0.09	3.113 ± 0.06
56	4.024 ± 0.03	4.853 ± 0.14	3.149 ± 0.05
59	4.033 ± 0.08	5.048 ± 0.00	3.191 ± 0.05
62	4.178 ± 0.13	5.022 ± 0.08	3.267 ± 0.03
65	4.291 ± 0.20	5.128 ± 0.06	3.322 ± 0.03
68	4.396 ± 0.12	5.313 ± 0.16	3.385 ± 0.00
71	4.557 ± 0.11	5.480 ± 0.21	3.444 ± 0.01
74	4.636 ± 0.09	5.715 ± 0.18	3.506 ± 0.03
77	4.708 ± 0.03	5.856 ± 0.05	3.571 ± 0.05
80	4.849 ± 0.05	6.066 ± 0.02	3.613 ± 0.04
83	4.983 ± 0.02	6.212 ± 0.04	3.649 ± 0.03
86	5.100 ± 0.10	6.303 ± 0.05	3.658 ± 0.03
89	5.239 ± 0.04	6.299 ± 0.05	3.618 ± 0.06
90	5.208 ± 0.04	6.320 ± 0.08	3.619 ± 0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (26°C) ถึง 90°C โดยเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันถั่วเหลืองในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนทำให้จำนวนไอออนในน้ำมันถั่วเหลืองแตกตัวเพิ่มขึ้นและไอออนเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโทรดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าสูงเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ วิรัชชัย (2544) ซึ่งทำการศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างเฟสในกระบวนการฆ่าเชื้ออาหารแบบ Ohmic พบว่าเมื่อน้ำเชื่อม มะละกอ แคนตาลูปและสับปะรดมีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าการนำไฟฟ้าของอาหารแต่ละชนิดจะสูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นและการเคลื่อนที่ของไอออนในตัวอย่างอาหาร



รูปที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (26°C) จนถึง 92°C

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันถั่วเหลืองพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าแปรผันตรงกับค่าความจุไฟฟ้า (สมการที่ 2.2) โดยค่าความจุไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับปริมาณไอออนที่แตกตัวอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ที่อุณหภูมิสูงจำนวนไอออนที่แตกตัวมีปริมาณมากส่วนที่อุณหภูมิต่ำจำนวนไอออนที่แตกตัวมีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความถี่

ของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันฉนวนฉนวนมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่วัดได้มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

ดังนั้น

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

เมื่อ X_c = ความต้านทานของตัวเก็บประจุ (Capacitive reactance) (Ω)

f = ความถี่ (Hz)

C = ความจุไฟฟ้า (F)

ซึ่งค่า C เป็นส่วนกลับของความถี่ ดังนั้น ถ้าความถี่มีค่ามาก C จึงมีค่าน้อย (Kato, 1987) ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่วัดได้จากการใช้ความถี่ 100 kHz มีค่าน้อยกว่าที่ความถี่ 12.8 kHz

อุณหภูมิมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันฉนวนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) และมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น โดยค่าการนำไฟฟ้ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่า R^2 0.96 และ 0.979 สำหรับการวัดที่ความถี่ 12.8 kHz และ 100 kHz ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบเส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิพบว่าที่ความถี่ 12.8 kHz และ 100 kHz มีค่าความชัน 0.0385 และ 0.0178 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 12.8 kHz มีค่าความชันมากกว่าที่ 100 kHz แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการให้ความร้อนเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของการวัดด้วยความถี่ 12.8 kHz มีความชัดเจนมากกว่าที่ 100 kHz ดังนั้นความถี่ 12.8 kHz จึงเหมาะสมกับการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันฉนวนให้ความร้อนมากกว่า 100 kHz

4.3 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันฉนวนฉนวนในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อน

ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้อ่อนนอกจากน้ำมันฉนวนฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งของแข็งแล้ว สมบัติที่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะเดียวกันคือ ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

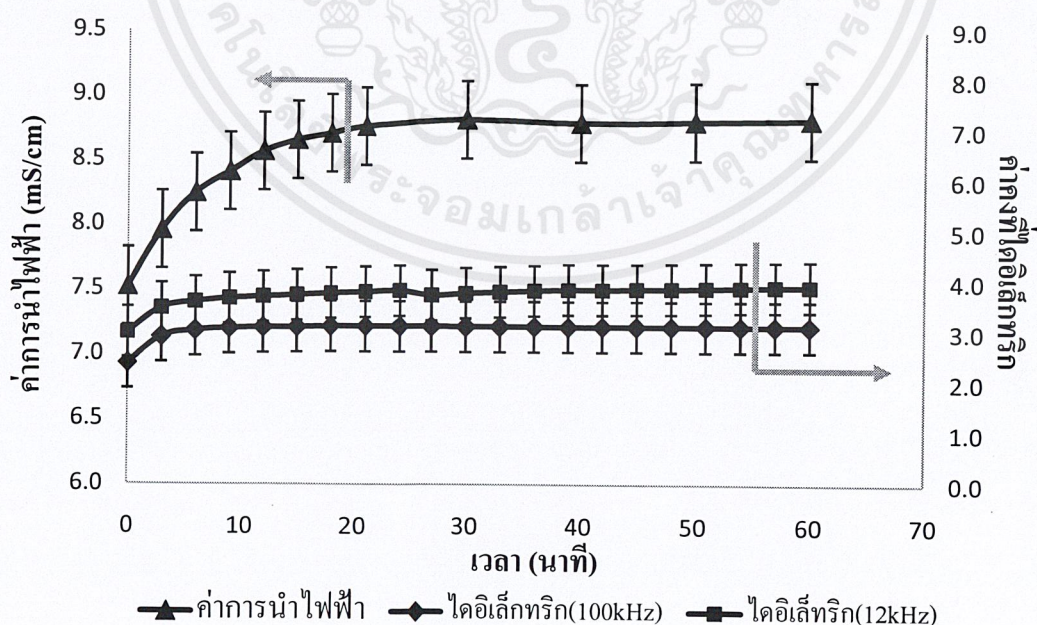
4.3.1 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันฉนวนฉนวน

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันฉนวนฉนวนที่ระยะเวลาการฟอร์มเจลต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

เวลา (นาที)	σ (mS/cm)	ϵ' (12.8kHz)	ϵ' (100kHz)
0	7.521 ± 0.26 a	3.002 ± 0.66 a	2.389 ± 0.03 a
3	7.957 ± 0.29 ab	3.479 ± 0.69 a	2.913 ± 0.09 b
6	8.244 ± 0.14 bc	3.605 ± 0.63 a	3.039 ± 0.10 b
9	8.409 ± 0.06 bcd	3.677 ± 0.61 a	3.084 ± 0.11 b
12	8.565 ± 0.07 cd	3.713 ± 0.60 a	3.107 ± 0.10 b
15	8.654 ± 0.14 cd	3.746 ± 0.58 a	3.111 ± 0.09 b
18	8.707 ± 0.16 cd	3.787 ± 0.57 a	3.128 ± 0.10 b
21	8.760 ± 0.21 d	3.810 ± 0.57 a	3.126 ± 0.10 b
30	8.813 ± 0.27 d	3.787 ± 0.57 a	3.120 ± 0.08 b
40	8.787 ± 0.35 d	3.857 ± 0.58 a	3.117 ± 0.08 b
50	8.799 ± 0.35 d	3.886 ± 0.62 a	3.122 ± 0.07 b
60	8.812 ± 0.34 d	3.919 ± 0.64 a	3.122 ± 0.08 b

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวตั้ง แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.4 ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการฟอร์มเจลเป็นเด้าผู้เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 20 หลังจากนั้นค่าค่อนข้างคงที่ถึงนาที่ที่ 60 โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ทำให้สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ช่วงเวลาการฟอร์มเจลที่ 0-20 นาที พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องโดยมีค่า 7.5216 - 8.7602 mS/cm เพราะเมื่อโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองเกิดการเสียสภาพธรรมชาติเนื่องจากความร้อนแล้ว โปรตีน 11S (glycinin) และ 7S (β -conglycinin) แยกตัวออกมา และโมเลกุลส่วนที่เป็น hydrophobic (ไม่มีขี้) จะเปลี่ยนจากที่อยู่ด้านในออกมาอยู่ด้านนอกเกิดการสร้างพันธะไฮโดรโอฟิกระหว่างโมเลกุล ในขั้นตอนนี้ประจุรวมของโปรตีนเป็นลบ เมื่อเติมสารเคลือบไขมันและไขมันของสารจะไปจับตัวกับประจุลบของของโปรตีน สารตกตะกอนที่มีประจุบวกแรงซึ่งก็คือมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงจะสามารถจับกับส่วนที่มีขี้ได้ดีโดยจะทำให้ส่วนที่ไม่มีขี้ของโปรตีนที่เหลืออยู่กันอย่างอิสระมากขึ้นและเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มด้วยปฏิกิริยา hydrophobic เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายเป็นก้อนเด้าผู้ (Khoyama, sano, 1995) และในขณะที่โปรตีนตกตะกอนจับตัวกันเป็นก้อนมากยิ่งขึ้นจะมีของเหลวใสเรียกว่าเวย์ (Whey) แยกออกจากเนื้อเด้าผู้เพิ่มขึ้น ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเวย์นั้น นอกจากจะประกอบด้วยน้ำแล้วยังมี โปรตีนที่ยังสามารถละลายน้ำได้เหลืออยู่ทำให้ตกตะกอนไม่หมด นอกจากนี้ยังมีคาร์โบไฮเดรต ธาตุเหล็ก สังกะสี แคลเซียม แมงกานีส ทองแดง โซเดียม โพแทสเซียม (Yongsmith and Apiraktivongse, 1983) รวมทั้งมีค่า pH เป็นกรดอ่อนๆ (5.7-6) จะเห็นได้ว่าเวย์มีธาตุองค์ประกอบที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ในน้ำ จึงทำให้ในกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเด้าผู้ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปมีการจับเวย์ออกมาเพิ่มขึ้นและการฟอร์มเจลเป็นเด้าผู้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น อีกทั้งค่าความเป็นกรดของเวย์ยังมีส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าด้วย ส่วนช่วงที่ 2 ของกราฟคือช่วงเวลาการฟอร์มเจลที่ 21-60 นาที พบว่าค่าการนำไฟฟ้าในช่วงนี้ค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ย 8.7945 mS/cm เนื่องจากการตกตะกอนของโปรตีนเสร็จสมบูรณ์โดยใช้เวลาประมาณ 20-30 นาที (Shi and Ren, 1993) ทำให้ปริมาณน้ำเวย์ที่แยกตัวออกมาเริ่มมีค่าคงที่ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าคงที่เช่นกัน

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 100 kHz ที่ระยะเวลาการฟอร์มเจลต่าง ๆ กัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยที่เวลาเริ่มต้นการฟอร์มเจลค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าน้อยที่สุดและเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจนถึงนาที่ที่ 3 เนื่องจาก ที่เวลาเริ่มต้นการฟอร์มเจลถึง 3 นาที โมเลกุลมีขี้ ซึ่งก็คือโมเลกุลน้ำ โปรตีนและสารประกอบเกลือในน้ำนมถั่วเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากการเริ่มต้นเปลี่ยนสถานะของของเหลว (น้ำนมถั่วเหลือง) ไปเป็นของแข็งของแข็ง (เด้าผู้อ่อน) หลังจากนั้นถึง 60 นาที ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าคงที่และไม่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) อาจเป็นไปได้ว่าที่เวลาหลังจากการฟอร์มเจลไปแล้ว 3 นาที มีการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลมีขี้ลดลงและไม่ชัดเจนมากเท่าขณะเริ่มการฟอร์มเจล ซึ่งค่าความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ในการทดลอง (100 kHz) ไม่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีเพียงเล็กน้อยในช่วงระยะเวลานี้ได้ ส่วนที่ความถี่ 12.8 kHz พบว่ามีลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับเวลาในการฟอร์มเจลคล้ายกับที่ความถี่ 100 kHz แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เนื่องจากที่ความถี่นี้ไม่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกระหว่างการฟอร์มเจลเป็นได้หู่ได้ตลอดกระบวนการ ดังนั้นเมื่อพิจารณาความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 12.8 kHz และ 100 kHz เป็นความถี่ที่ไม่เหมาะสมกับการตรวจสอบและอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในระหว่างการฟอร์มเจลเป็นได้หู่ของน้ำนมถั่วเหลือง เนื่องจากยังไม่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดทั้งกระบวนการ อย่างไรก็ตามสามารถนำย่านความถี่นี้ไปเป็นเกณฑ์และดูแนวโน้มในการหาย่านความถี่ที่เหมาะสมกับการตรวจสอบในกระบวนการได้

4.3.2 ค่าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเวย์ได้หู่อ่อน

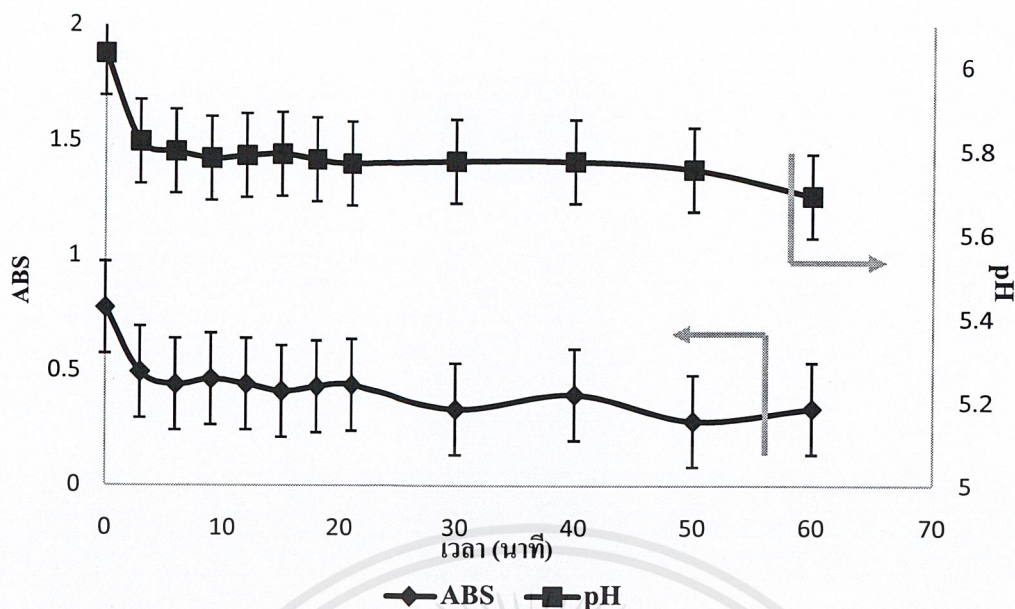
ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำนมถั่วเหลืองที่ระยะเวลาการฟอร์มเจลต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเวย์ได้หู่ที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นได้หู่อ่อน

เวลา (นาที)	ABS	pH
0	0.776 ± 0.21 f	6.033 ± 0.04 b
3	0.495 ± 0.39 e	5.823 ± 0.05 a
6	0.442 ± 0.14 cd	5.800 ± 0.02 a
9	0.465 ± 0.00 de	5.783 ± 0.05 a
12	0.443 ± 0.00 cd	5.790 ± 0.07 a
15	0.411 ± 0.21 c	5.793 ± 0.07 a
18	0.432 ± 0.14 cd	5.780 ± 0.08 a
21	0.439 ± 0.00 cd	5.770 ± 0.09 a
30	0.334 ± 0.00 b	5.777 ± 0.09 a
40	0.398 ± 0.05 c	5.777 ± 0.08 a
50	0.282 ± 0.49 a	5.757 ± 0.06 a
60	0.336 ± 0.11 b	5.693 ± 0.09 a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกัน ในแนวตั้ง แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำนมถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พิจารณาค่าการดูดกลืนแสงและค่า pH ของน้ำเวย์เต้าหู้ในขณะกระบวนการฟอร์มเจล พบว่าที่เวลาในการฟอร์มเจลต่าง ๆ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเวย์ที่แยกออกมาจากเต้าหู้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $R^2 = 0.748$ เนื่องจากค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเวย์มีค่าแปรผันตรงกับปริมาณโปรตีนในน้ำเวย์จากวิธีการวิเคราะห์โปรตีนแบบไบยูเรท ซึ่งขณะเริ่มกระบวนการฟอร์มเจล (การจับตัวระหว่างโปรตีนและสารตกตะกอนเพื่อตกตะกอนเป็นเต้าหู้) ยังคงมีปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำอยู่มากส่งผลให้น้ำเวย์มีค่าการดูดกลืนแสงมากและเมื่อเวลาในการฟอร์มเจลผ่านไปค่าการดูดกลืนแสงในน้ำเวย์ที่วัดได้จะมีค่าน้อยลงเนื่องจากปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำในน้ำเวย์ลดลงนั่นเอง

ส่วนค่า pH ของน้ำเวย์ ที่เวลาเริ่มต้นการฟอร์มเจล มีค่าสูงกว่าที่ 3-60 นาที อย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากที่เวลา 3-60 นาทีโปรตีนมีการเชื่อมต่อกันและตกตะกอนลงมาเป็นก้อนเต้าหู้ น้ำเวย์ที่แยกออกมายังคงมีปริมาณโปรตีนที่ละลายน้ำได้เหลืออยู่ส่วนหนึ่งซึ่งจะเกิดการแตกตัวเพื่อจะไปจับกับสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ (วันชัย, 2527) ทำให้ค่า pH ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของ H^+ ของน้ำเวย์ที่เวลา 3-60 นาที มีค่าน้อยกว่าที่เวลาเริ่มต้นการฟอร์มเจล แต่อย่างไรก็ตามที่เวลา 3-60 นาที จะเห็นว่าทิศทางของเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์มีค่าลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

4.4 ผลของอัตราการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิก

ให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ กัน โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ได้กระแสไฟฟ้าผ่านชุดอุปกรณ์วัด 1A 2A และ 3A ตลอดการทดลอง เพื่อศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้า ค่าความหนืดของนํ้านมถั่วเหลืองและลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน

4.4.1 ผลของอัตราการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกต่อค่าการนำไฟฟ้าของนํ้านมถั่วเหลือง

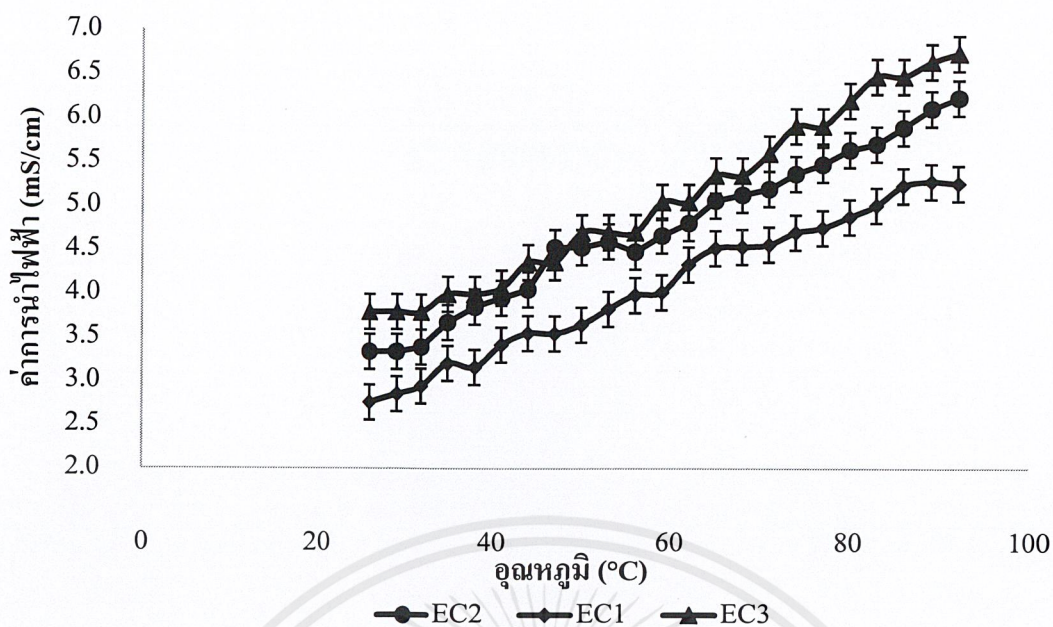
ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ คือ 4.95°C/min 16.84 °C/min และ 31.02°C/min กับค่าการนำไฟฟ้าของนํ้านมถั่วเหลือง พบว่าค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการให้ความร้อนทั้ง 3 อัตรา มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ทำให้ไอออนแตกตัวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ที่อัตราการให้ความร้อนทั้ง 3 อัตรา พบว่า อัตราการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของนํ้านมถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปของกระแสไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน โดยความต้านทานของอาหารที่มีต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้นเองภายในอาหาร (พงศักร, 2540) ดังนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในอาหารมีมากขึ้น เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนในตัวอาหารมากขึ้นส่งผลให้ไอออนแตกตัวมากขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจึงมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อพิจารณาสมการที่ 2.1 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนํ้านมถั่วเหลืองมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิตที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ คือ 4.95°C/min 16.84 °C/min และ 31.02 °C/min

อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)		
	4.95°C/min	16.84°C/min	31.06°C/min
26	2.707 ± 0.04 a	3.335 ± 0.04 b	3.791 ± 0.07 c
29	2.759 ± 0.09 a	3.335 ± 0.04 b	3.791 ± 0.07 c
32	2.917 ± 0.06 a	3.390 ± 0.08 b	3.791 ± 0.07 c
35	3.030 ± 0.15 a	3.673 ± 0.07 b	3.995 ± 0.14 c
38	3.171 ± 0.11 a	3.851 ± 0.06 b	3.995 ± 0.14 b
41	3.400 ± 0.09 a	3.951 ± 0.23 b	4.067 ± 0.27 b
44	3.425 ± 0.12 a	4.048 ± 0.14 b	4.358 ± 0.03 c
47	3.552 ± 0.10 a	4.529 ± 0.40 b	4.358 ± 0.03 b
50	3.638 ± 0.05 a	4.593 ± 0.33 b	4.698 ± 0.07 b
53	3.708 ± 0.11 a	4.477 ± 0.22 b	4.698 ± 0.07 b
56	4.024 ± 0.03 a	4.659 ± 0.10 b	5.043 ± 0.01 c
59	4.033 ± 0.08 a	4.803 ± 0.05 b	5.043 ± 0.01 c
62	4.178 ± 0.13 a	5.060 ± 0.13 b	5.345 ± 0.05 c
65	4.291 ± 0.20 a	5.125 ± 0.11 b	5.532 ± 0.05 b
68	4.396 ± 0.12 a	5.193 ± 0.15 b	5.595 ± 0.08 c
71	4.557 ± 0.11 a	5.364 ± 0.16 b	5.906 ± 0.10 c
74	4.636 ± 0.09 a	5.471 ± 0.00 b	5.906 ± 0.10 c
77	4.708 ± 0.03 a	5.636 ± 0.17 b	6.196 ± 0.00 c
80	4.849 ± 0.05 a	5.702 ± 0.14 b	6.469 ± 0.10 c
83	4.983 ± 0.02 a	5.887 ± 0.16 b	6.469 ± 0.10 c
86	5.100 ± 0.10 a	6.103 ± 0.16 b	6.637 ± 0.12 c
89	5.239 ± 0.00 a	6.226 ± 0.11 b	6.731 ± 0.20 c
90	5.208 ± 0.04 a	6.301 ± 0.30 b	6.871 ± 0.35 c

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อน น้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อนต่างกัน

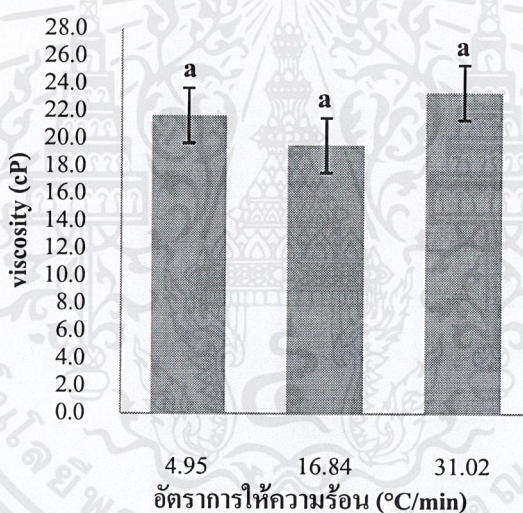
4.4.2 ผลของอัตราการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกต่อค่าความหนืดของน้ำนมถั่วเหลืองและลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อน

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7-4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อน 4.95 16.84 และ 31.02 °C/min กับค่าความหนืดของน้ำนมถั่วเหลือง ค่าความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) ความสามารถในการเกาะกัน (cohesiveness) และความหยุ่นตัว (gumminess) ของเต้าหู้อ่อน

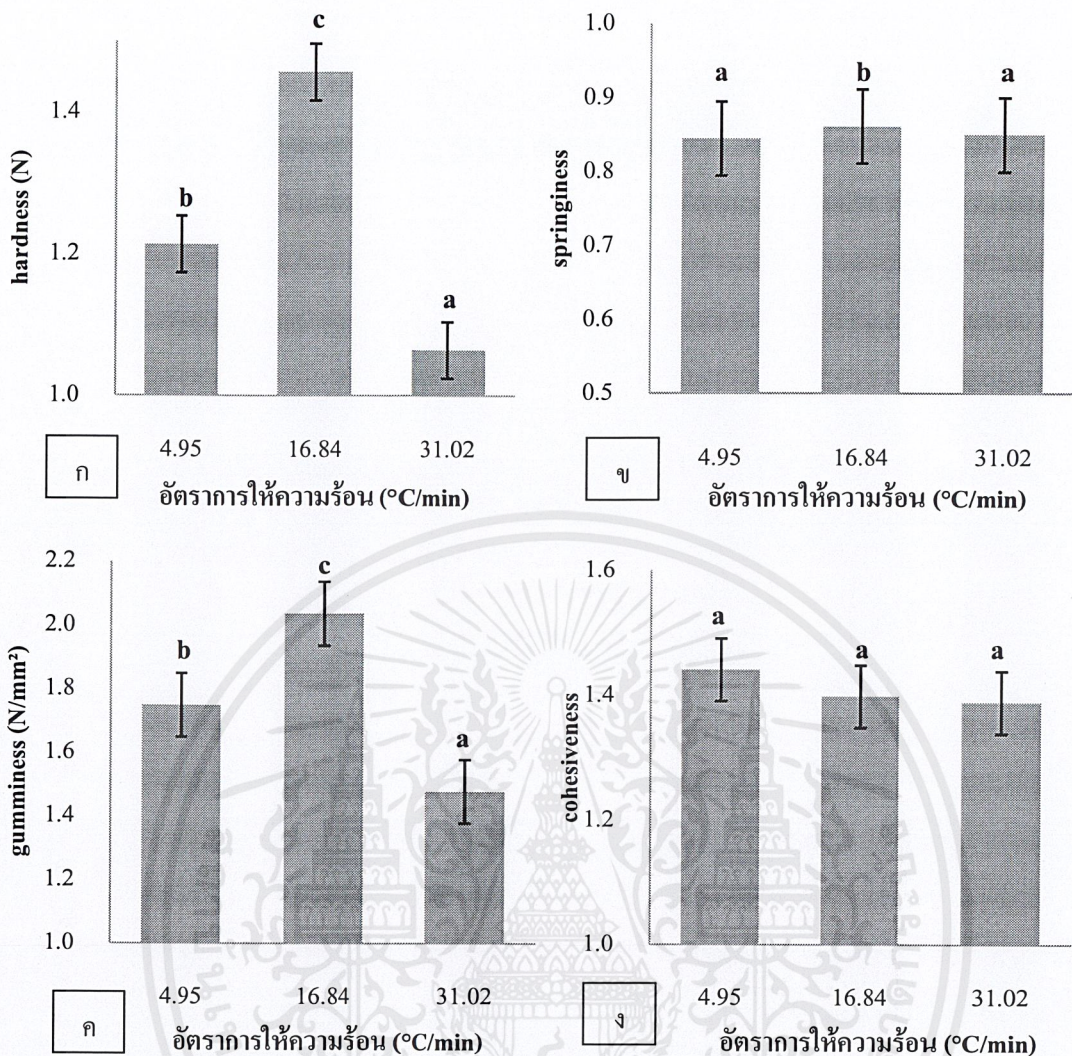
ตารางที่ 4.6 ค่าความหนืดของน้ำมันถั่วเหลือง ค่า Hardness ค่า Springiness ค่า Cohesiveness และค่า Gumminess ของเต้าหู้อ่อน โดยการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ

อัตราการให้ความร้อน (°C/min)	ความหนืด (Cp)	Hardness (N)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess (N/ mm ²)
4.95	21.700 ± 1.22 a	1.214 ± 0.12 b	0.843 ± 0.01 a	1.432 ± 0.54 a	1.745 ± 0.24 b
16.84	19.533 ± 2.48 a	1.457 ± 0.08 c	0.860 ± 0.00 b	1.398 ± 0.00 a	2.037 ± 0.11 c
31.02	23.366 ± 2.08 a	1.065 ± 0.19 a	0.848 ± 0.01 a	1.383 ± 0.04 a	1.476 ± 0.19 a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวนิ่ง แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.7 ค่าความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ ในการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก



รูปที่ 4.8 (ก) ค่าความแข็ง (hardness) (ข) ความยืดหยุ่น (springiness) (ค) ความหยุ่นตัว (gumminess) และ (ง) ความสามารถในการเกาะกัน (cohesiveness) ของเต้าหู้อ่อนที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ ในการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก

พิจารณาตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองต่างกัน คือ 4.95 16.84 และ 31.02°C/min ไม่มีผลต่อความหนืดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ซึ่งเป็นผลจากการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก น้ำมันถั่วเหลืองจะร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วและพร้อมกันทุกจุดทำให้องค์ประกอบทั้งหมดของโปรตีนเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลพร้อมกันภายในระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Liu (1997) โดยได้ทำการทดลองการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองแบบขั้นตอนเดียว ผลที่ได้คืออัตราการให้ความร้อนไม่มีผลทำให้ความหนืดของน้ำมันถั่วเหลืองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$)

พิจารณารูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อนที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้อ่อนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) โดยที่อัตราการให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน 16.84 °C/min มีค่า hardness ค่า springiness และค่า gumminess สูงที่สุด เนื่องจากที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ (4.95°C/min) โปรตีนถั่วเหลืองถูกทำลายสภาพทางธรรมชาติได้น้อยลงส่งผลให้โครงสร้างจตุรภูมิของกลุ่มย่อย 11S และ 7S globulin ที่เป็นองค์ประกอบหลักและเกี่ยวข้องกับฟอรัมเจล ของโปรตีนถั่วเหลืองเกิดการคลายตัวได้น้อยลง (Kohyama et al., 1995) ส่งผลให้เจลที่ได้มีความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) และความหยุ่นตัว (gumminess) น้อยกว่าที่อัตราการให้ความร้อน 16.84°C/min ส่วนกรณีที่อัตราการให้ความร้อนสูงจะทำให้โปรตีน 11S และ 7S globulin ถูกทำลายสภาพธรรมชาติได้มากเป็นผลให้สารเพิ่มการละลาย (Cysteine) และกรดอะมิโน เมไทโอนีน (Methionine) สูญเสียไปส่งผลถึงการเกิดเจลของโปรตีนที่เกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุลของโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bonds) อีกทั้งการเชื่อมต่อกันระหว่างซัลไฮดริล ไดซัลไฟด์ (Sulfhydryl disulfide interchange) ที่ช่วยให้ร่างแหโปรตีน (protein network) มีความอยู่ตัวและพันธะไดซัลไฟด์ภายในโมเลกุล (intramolecular disulfide bonding) ถูกทำลายมากขึ้น เจลที่ได้จึงมีความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) และความหยุ่นตัว (gumminess) น้อยกว่าที่อัตราการให้ความร้อน 16.84°C/min ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับอัตราการให้ความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามอัตราการให้ความร้อนไม่ส่งผลให้ความสามารถในการเกาะกัน (cohesiveness) ของเต้านูแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

- 1) เมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำนมถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น และความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำนมถั่วเหลืองมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่วัดได้มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น
- 2) เมื่อระยะเวลาในการฟอร์มเจลเป็นเตาหู้เพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น ต่อเนื่องจนถึงนาที่ที่ 20 หลังจากนั้นมียาค่อนข้างคงที่จนถึงนาที่ที่ 60 และเมื่อเวลาในการฟอร์มเจลเพิ่มขึ้นค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเวย์ที่แยกออกมาจากเตาหู้มีค่าลดลง ส่วนค่า pH ของน้ำเวย์ในขณะเริ่มการฟอร์มเจลมีค่าสูงกว่าที่เวลา 3-60 นาที่ อย่างไรก็ตามที่เวลา 3-60 นาที่ ค่า pH ของน้ำเวย์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
- 3) ความถี่ไฟฟ้า 12.8 kHz และ 100 kHz เป็นความถี่ที่ไม่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบและอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในระหว่างการฟอร์มเจลเป็นเตาหู้ของน้ำนมถั่วเหลือง
- 3) ขณะให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิก อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองมีค่าสูงขึ้นและที่อัตราการให้ความร้อนสูงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองมีค่าสูงกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ
- 4) ที่อัตราการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิกไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดของน้ำนมถั่วเหลืองแต่ส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสอื่นๆของเตาหู้อ่อน คือ ที่อัตราการให้ความร้อน $16.84^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เตาหู้มีความแข็ง ความยืดหยุ่น และความหยุ่นตัวสูงกว่าที่อัตราการให้ความร้อน $4.95^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และ $31.02^{\circ}\text{C}/\text{min}$ แต่ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการเกาะกันอย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เนื่องจากการวัดสมบัติทางไฟฟ้าและการให้ความร้อนด้วยเทคนิคโอห์มมิกใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบดังนั้นควรมีเครื่องตัดไฟอัตโนมัติเพื่อความปลอดภัยต่อชีวิตและควรแต่งกายด้วยชุดรัดกุม
- 2) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ควรใช้ชนิดที่สามารถบันทึกค่าได้อย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของข้อมูล
- 3) อุปกรณ์ที่ใช้การวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเหมาะสำหรับอาหารที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงและโมเลกุลมีความเป็นขั้วทางไฟฟ้าชัดเจน ตัวอย่างอาหาร เช่น น้ำผลไม้เข้มข้น นม เป็นต้น สำหรับการวัดค่าไดอิเล็กทริกควรทำการทดลองเพื่อหาค่าความถี่ในการตรวจสอบที่เหมาะสมกับอาหารแต่ละชนิด เพื่อความถูกต้องแม่นยำของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ควรใช้วิธีการตรวจสอบปริมาณโปรตีนในน้ำเวย์ที่สามารถทราบปริมาณโปรตีนได้อย่างชัดเจนมากกว่าการเปรียบเทียบจากค่าการดูดกลืนแสง เช่น วิธีของเคลดาล (Kjeldahl Method) กราฟโปรตีนมาตรฐานของวิธีไบยูเรท (Biuret Method) และวิธีโลวรี (Lowry-Folin Method) เป็นต้น
- 5) การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเต้าหู้อ่อน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเต้าหู้หรืออาหารที่มีสมบัติคล้ายโปรตีนถั่วเหลืองในส่วนของกระบวนการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้า การฟอรั่มเจลหรือจับตัวตกตะกอนในกระบวนการผลิต เช่น เนย แป้ง โปรตีนสกัด เพื่อการควบคุมกระบวนการและตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบในกระบวนการ (In-line process)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กิตติชัย บรรจง. 2535. เครื่องมือวัดสมบัติเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร. โครงการงานวิจัยที่
ดำเนินงานประจำปีงบประมาณ 2535 ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร.
กรุงเทพ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทร์ วรากุลเทพ, อัจฉรา กลีบงาม, วัชระ การไกลและคณะ. 2546. **เต้าหู้**อาหารเพื่อสุขภาพ. เพชร
กระรัตตวิดิโอ.
- ณรงค์ นิยมวิทย์. 2528. **เต้าหู้**หลอด. วารสารอาหาร. 15(4) : 224-244.
- น้ำทิพย์ วงษ์ประทีป. 2541. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตและคุณภาพของเจลโปรตีนจากถั่ว
เหลือง. [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. วิทยาศาสตร์การอาหาร. กรุงเทพ. สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปรียาพร เขียวขำ. 2544. การศึกษากระบวนการผลิตและคุณสมบัติของน้ำนมถั่วเหลืองเสริม
แคลเซียม. [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. วิทยาศาสตร์การอาหาร. กรุงเทพ. สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พงศ์ธร นวมานกร. 2540. การพัฒนาระบบฆ่าเชื้อแบบ **Ohmic**. [วิทยานิพนธ์ปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพ : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ไพชยา พิมพ์สารี. 2549. สมบัติไดอิเล็กทริกของถั่วลลึง. [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. ฟิสิกส์
ประยุกต์. มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก.
- วันชัย สมจิต. 2527. คุณสมบัติของถั่วเหลืองและอาหารจากถั่วเหลือง. ตอนที่ 1 ถั่วเหลืองและการ
ใช้ประโยชน์ในประเทศไทย. รวบรวมโดยสถาบันค้นคว้าและพัฒนา ผลิตภัณฑ์อาหาร มหา
วิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 1-49. บริษัทสยามออฟเซ็ท จำกัด. กรุงเทพ.
- วีรเชษฐ์ จิตตานิษฐ์. 2544. ผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างเฟสในกระบวนการฆ่าเชื้ออาหาร
แบบ **Ohmic**. [ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร]. กรุงเทพ.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศิริพร ดลภักนิยมกุล. 2552. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เต้าหู้อ่อนจากกากงาขาวและธัญพืช. [วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สมชาย ประภาวัตติ และคณะ. 2525. การศึกษาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของตัวตกตะกอนต่าง ๆ
ในการทำ**เต้าหู้**หลอด. หน้า 25-49. งานวิจัยสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิต. กรุงเทพ.
- สายันท์ สุขพงษ์พันธ์. 2549. ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล.
- อัมพวัน ตันสกุล. 2540. สมบัติทางวิศวกรรมของอาหาร **Engineering Properties of Food and
Biomaterials**.

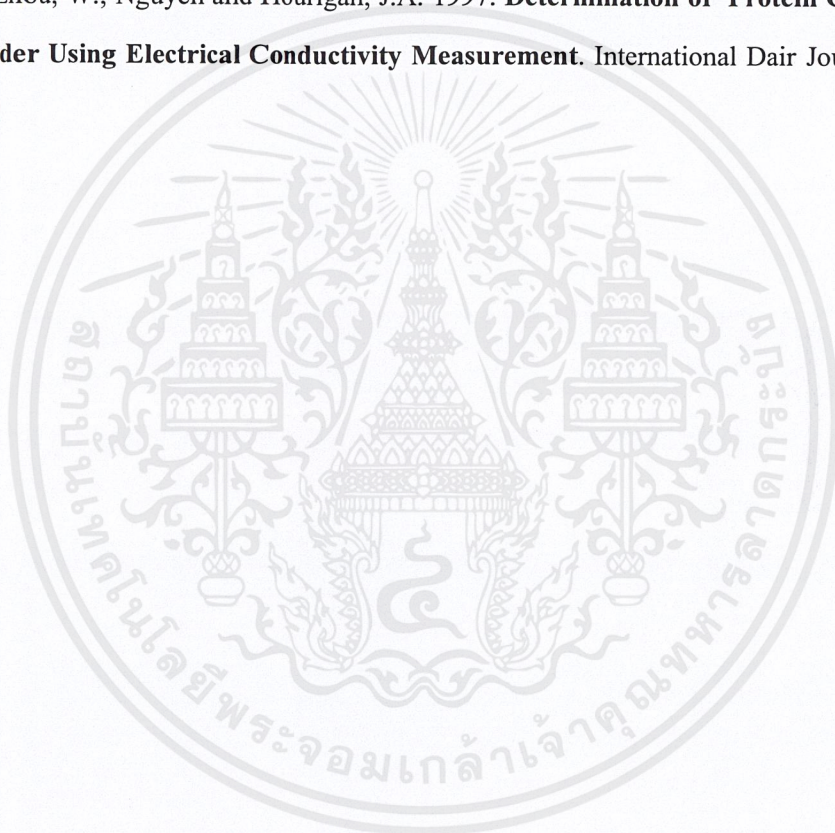
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุบล ดีสวัสดิ์. 2546. **ตำหรับนุอรรอยเพื่อสุขภาพ**. สำนักพิมพ์แม่บ้าน. กรุงเทพฯ. หน้า 97
- Anonymous. **Standard Composition of Food in Japan**. 1993. Agency of Science and Technology.
- Ayappa, K.G., Davis, H.T., Crapiste, G., Davis, E.A., and Gordon, J. 1991. **Microwave Heating: An Evaluation of Power Formulations**. Chemical Engineering Science. 46(4). 1005-1016.
- Beddows, C.G., and Wong, J. 1987. **Optimization of yield and properties of silken tofu form soybeans**. II. Heat processing. International Journal of Food Science and Technology. 22 : 23-27.
- Bircan, C., S.A., Barringer and Mangino, M.E. 2001. **Ues of Dielectric Properties to Detect Whey Protein Denaturation**. The Ohio State University Department of Food Science and Technology. Columbus. OH.
- Buffler, C.R 1995. **Advances in Dielectric Measurement of foods**. In **Characterization of Food : Emerging Methods**. ed. A.G. Gaonkar.
- Catharing, Y.W., Liu, K.S. and Huang, Y. 1999. **Asian Food Sciences & Technology**. Pennsylvania : Technomic Publishing Company
- Da-Wen Sun. 2005. **Emerging Technologies for food processing**. Elsevier Academic Press. Italy.
- de Alwis. A.A.P., Halden, K. and Fryer, P.J. 1989. **Shape and conductivity effects in the ohmic heating of food**. Chem. Eng. Res. Des. 67:159-168. Cited in de Alwis, A.A.P. and Fryer, P.J. 1990. **A finite element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food**. Chem. Eng. Sci. 45:1547-1559.
- Figura Ludger O., Teixeira Arthur A. 2007. **Food Physics**. PtP - Berlin Protago – TEX – Production GmbH. Germany.
- Fritsch C.W., Egberg D.C. and Magnuson J.S. 1979. **Changes in dielectric constant as a measure of frying oil deterioration**. J. Am. Oil Chem. Soc. 56:746-750.
- Fryer, P.J., De, A.A.P., Koury, E. Stapley, A.G.F. and Zhang. L. 1993. **Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixture : Heat Generation and Convection Effects**. Journal of Food Engineering. Vol. 18. 2 pp. 101-125
- Harker, F.R. and Duniop. 1994. **Electrical impedance studies of nectarines during coolstorage and fruit ripening**. Post. Biot. Tech. 4 : 125-134.Kato, K. 1987. **Nondestructive**

- measurement of fruit quality by electrical impedance (part 1).** Research Report on Agricultural Machinery No. 17. 51-58.
- Hui, Y.H. 1992. **Aseptic process : Ohmic heating.** Encyclopaedia of Food Science and Technology 1:136-143.
- Kato, A., Osako, Y., Matsudomi, N., and Kobayashi, K. 1983. **Changes in the emulsifying and foaming properties of proteins during heat denaturation.** Agricultural and Biological Chemistry, 47(1), 33-37.
- Kohyama, K., Sano, Y., and Doi, E. 1995. **Rheological characteristics and gelation mechanism of tofu (soybean curd).** Journal of Agricultural and Food Chemistry. 43(7). 1808-1812.
- Kolbe, E. 1999. **Electrical properties of Fish Mince During Multi Frequency Ohmic Heating.** Journal of Food Science. Vol.63,No.6,pp.1028-1032.
- Koshiyama, I. 1969. **Distribution of the 7S proteins in soybean globulins by gel Filtration with Sephadex G-200.** Agricultural and Biological Chemistry. 33: 281-284. Quoted in Renkema, J.M.S. 2001. **Formation, structure and rheological properties of soy protein gels.** Ponsen & Looyen BV. Wageningen University.
- Lawrence, K.C., S.O. Neison and Kraszewki, A.W. 1992. **Temperature dependence of the dielectric properties of pecans.** Trans. ASAE 35 (1) : 251-255.
- Lewis, M.J. 1987. **Physical Properties of Foods and Food Processing Systems.** Ellis Horwood Ltd, Chichester. England.
- Lim, B.T., Deman, J.M., Deman, L. and Buzzell, R.I. 1990. **Yield and Quality of Tofu as Affected by Soybean and Soymilk Characteristics Calcium Sulfate Coagulant.** J. Food Sci., 55(4) : 1088-1111
- Liu, K. 1997. **Soybeans : Chemistry, Technology and Utilization.** International Thomson, Washington.
- Liu, Z.-S., and Chang, K.C. 2003. **Development of rapid titration method for predicting optimal coagulant concentration for filled tofu.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51(18), 5214-5221.
- Liu, Z.-S., and Chang, S.K.-C. 2004. **Effect of soy milk characteristics and cooking conditions on coagulant requirements for making filled tofu.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52(11), 3405-3411. 23.

- Newsholme, E.A. and Calder, P. 1997. **The proposed role of glutamine in some cells of the immune system of speculative consequences for the whole animal.** Nutrition. 13: 728-730.
- Palaniappan, S and Sastry, SK. Electrical Conductivity of Selected Food During Ohmic Heating. Journal of Food Engineering 1991; Vol.14 No.3 : 221-236
- Palaniappan, S and Sastry, SK. Electrical Conductivity of Selected Juice: Influences of Temperature, Solid content, Apply voltage, and Particle sizes. Journal of Food Engineering 1991; vol.14 No.3 : 247-260.
- Palaniappan, S and Sastry, SK. Modeling of Electrical Conductivity of Liquid-Particle Mixtures, Food and Bioproducts Processing. Institution of Chemical Engineering 1991; Vol. 69 Part. C: 167-174.
- Palaniappan, S and Sastry, SK. Influences of Particle Orientation on the Effective Electrical Resistance and Ohmic Heating Rate of Liquid-Particle Mixture. Journal of Food Process Engineering 1992 ; Vol. 46 No. 3 : 213-227.
- Paul Singh. R. and Dennis R.Heldman. 2009. **Introduction to food engineering.** Elsevier Inc. All rights reserved. China.
- Renkema, J. M. S., H. Gruppen and T. V. Vliet. 2002. **Influence of pH and ionic strength on heat – induced formation and rheological properties of soy proteins at neutral pH.** J. Agric. Food Chem. 50 : 1569-1573.
- Sastry, S.K. and Palaniappan, S. 1992. **Ohmic Heating of Liquid – Partical Mixtures.** Food Technology. Vol. 46. No. 12. Pp. 64-67.
- Shih, M.C., Hou, H.J., and Chang, K.C. 1997. **Process optimization for soft tofu.** Journal of Food Science. 62(4). 833-837.
- Shi, Y.G. and Ren, L. 1993. **Soybean Products Technology.** Chaina's Light Industry Publisher Beigng.
- Shurtleff, W. and Aoyagi, A. 1979. **Tofu & soymilk production : the book of tofu.** Vol.11 The Soyfoods center., Lafayette.
- St-Gelais, Daniel and Champagne Claude. 1995. **The Use of Electrical Conductivity to follow Acidification of Dairy Blends.** International Dair Journal. Vol. 5, 427-438.
- Sun, N. and Breene, W.M. 1991. **Calcium sulfate Concentrration Influence on Yield and Quality of Tofu from Five Soybean Varieties,** J. Food Sci, 56(6) : 1604

- Tang, C.H. 2007. **Effect of thermal pretreatment of raw soymilk on the gel strength and microstructure of tofu induced by microbial transglutaminase.** LWT 40(14)1403-1409
- Wang, L.J., Li, D., Tatsumi, E., Liu, Z.S., Chen, X.D, and Li, L.T. 2006. **Application of two-stage ohmic heating to tofu processing.** Chem. Eng. Process. 46(5) : 486-490.
- Wang, L.J., Li, D., Tatsumi, E.Z.S., Liu, X.D. and Chen, L.T. 2007. **Application of two-stage ohmic heating to tofu processing.** Chemical Engineering and Processing. 46 : 486-490.
- Yongsmith, B. and Apiraktivongse, P. 1983. **Vitamin B12 production from Soybean Curd Whey with Propionibacterium freudenreichii.** Journal of Fermentation Technology. 61. 105-107.
- Zhuang, Y., Zhou, W., Nguyen and Hourigan, J.A. 1997. **Determination of Protein Content of Whey Powder Using Electrical Conductivity Measurement.** International Dairy Journal. Vol. 7, No. 10.





ภาคผนวก ก

ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าที่ความถี่ 12 kHz ของน้ำมันฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (26°C) จนถึง 90°C

อุณหภูมิ (°C)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2		
	C (pF)	R (k Ω)	ϵ'	C (pF)	R (k Ω)	ϵ'
26	91.08	627.80	4.002	91.57	615.00	4.023
27	91.13	627.10	4.004	92.67	612.30	4.072
28	91.25	627.00	4.009	93.23	610.60	4.096
29	91.75	623.30	4.031	94.65	604.40	4.159
30	92.05	622.10	4.044	94.95	596.00	4.172
31	94.01	610.10	4.131	95.13	589.40	4.180
32	94.94	602.10	4.171	95.57	581.70	4.199
33	95.18	599.70	4.182	96.47	575.10	4.239
34	95.59	595.80	4.200	96.63	570.30	4.246
35	95.66	595.70	4.203	97.45	562.70	4.282
36	95.98	591.10	4.217	97.45	559.70	4.282
37	96.35	584.90	4.233	98.70	554.50	4.337
38	97.13	577.60	4.268	99.56	543.70	4.375
39	97.54	574.80	4.276	99.63	542.60	4.378
40	97.77	572.00	4.291	99.83	531.60	4.387
41	98.47	564.50	4.322	99.95	529.90	4.392
42	98.78	560.20	4.334	101.53	520.80	4.461
43	99.70	554.50	4.353	101.87	513.30	4.476
44	99.81	551.20	4.379	102.05	509.30	4.484
45	100.35	544.80	4.396	103.05	504.80	4.528
46	101.39	533.10	4.440	103.80	501.00	4.561
47	101.61	530.30	4.455	104.05	495.60	4.572
48	102.22	524.60	4.482	106.16	487.30	4.665
49	102.83	515.50	4.505	106.59	481.20	4.684
50	103.86	502.60	4.549	107.86	475.60	4.739
51	104.79	494.80	4.576	108.35	467.00	4.761
52	105.24	489.00	4.615	109.00	457.70	4.789
53	106.25	478.60	4.649	108.98	459.80	4.788
54	106.85	473.40	4.683	109.80	447.80	4.825
55	107.25	469.20	4.695	111.06	440.70	4.880
56	108.86	458.90	4.752	112.76	433.70	4.955
57	109.4	450.60	4.783	113.51	427.30	4.988
58	109.95	446.80	4.807	114.21	419.30	5.018
59	111.07	440.80	4.851	114.89	416.40	5.048
60	111.36	437.70	4.880	115.35	408.60	5.068
61	112.33	428.50	4.926	115.65	404.50	5.082
62	113.46	419.20	4.963	115.65	404.50	5.082
63	114.04	416.80	4.985	116.86	393.60	5.135
64	114.40	413.30	5.011	117.78	385.50	5.175
65	116.25	400.40	5.082	117.78	385.50	5.175
66	116.84	399.60	5.108	120.30	375.20	5.286
67	117.73	392.30	5.134	121.37	368.50	5.333
68	119.23	379.40	5.194	123.66	366.70	5.433
69	120.01	377.40	5.239	124.47	363.40	5.469
70	120.85	366.20	5.273	125.95	355.10	5.534
71	121.24	360.60	5.328	128.22	343.50	5.634
72	125.10	347.60	5.497	128.90	337.80	5.664
73	126.11	343.60	5.541	128.90	337.80	5.664
74	127.11	336.30	5.585	133.01	333.80	5.844
75	127.85	337.10	5.618	133.01	333.80	5.844
76	130.73	318.10	5.744	133.95	327.80	5.886
77	132.37	206.40	5.816	134.20	317.80	5.897
78	134.56	294.70	6.006	135.86	285.30	5.969
79	136.68	296.30	6.006	136.70	285.30	6.006
80	136.68	296.30	6.051	138.40	285.30	6.081
81	140.17	266.80	6.247	139.81	342.10	6.143
82	142.17	255.90	6.272	139.81	342.10	6.143
83	142.74	252.70	6.241	140.73	370.60	6.183
84	144.41	240.30	6.259	142.50	370.60	6.261
85	142.45	242.60	5.949	142.50	370.60	6.261
86	144.43	240.40	6.259	142.50	370.60	6.261
87	144.43	240.40	6.259	144.26	370.60	6.339
88	144.43	240.40	6.259	144.26	370.60	6.339
89	144.43	240.40	6.259	144.26	370.60	6.339
90	144.43	240.40	6.259	145.20	412.20	6.380

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าที่ความถี่ 100 kHz ของน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (26°C) จนถึง 90°C

อุณหภูมิ (°C)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	C (pF)	R (kΩ)	ϵ'	C (pF)	R (kΩ)	ϵ'	C (pF)	R (kΩ)	ϵ'
26	58.78	121.70	2.582	59.08	121.70	2.596	58.45	121.70	2.568
27	58.9	119.90	2.588	59.97	119.80	2.635	58.77	121.50	2.575
28	59.08	119.80	2.596	60.67	119.80	2.665	58.77	121.20	2.582
29	61.05	119.80	2.682	60.76	121.70	2.669	59.03	120.60	2.593
30	61.10	119.80	2.684	60.67	122.00	2.665	59.13	120.40	2.598
31	61.30	119.60	2.693	61.98	121.50	2.723	59.36	119.80	2.608
32	61.43	119.40	2.699	61.25	121.40	2.691	59.62	118.40	2.619
33	61.87	120.10	2.718	61.69	121.70	2.710	59.84	120.70	2.629
34	62.00	119.80	2.724	61.50	121.50	2.702	60.22	120.40	2.646
35	62.13	119.60	2.730	61.69	121.10	2.710	60.50	120.10	2.658
36	62.70	119.50	2.755	61.36	120.20	2.696	61.14	119.60	2.686
37	63.10	121.00	2.772	61.51	120.10	2.702	61.40	120.10	2.698
38	63.22	120.10	2.778	62.12	120.30	2.729	61.70	118.80	2.711
39	63.48	119.80	2.789	62.01	119.70	2.724	62.32	120.00	2.738
40	63.88	118.90	2.807	62.35	118.80	2.739	62.78	119.00	2.758
41	63.69	119.20	2.798	63.62	119.80	2.795	62.78	119.00	2.758
42	63.69	119.20	2.798	63.81	120.30	2.803	63.40	121.80	2.785
43	64.77	121.90	2.846	64.02	118.80	2.813	63.84	119.60	2.805
44	65.78	121.50	2.890	65.16	119.60	2.863	64.90	120.20	2.851
45	65.78	121.50	2.890	66.42	119.80	2.918	64.90	120.20	2.851
46	66.47	120.20	2.920	66.50	119.60	2.922	65.59	119.30	2.882
47	65.49	119.90	2.877	67.73	119.70	2.976	66.50	119.40	2.922
48	65.49	119.90	2.877	68.04	119.80	2.989	66.51	119.40	2.922
49	68.44	117.20	3.007	68.34	120.40	3.003	67.08	119.00	2.947
50	69.28	117.60	3.044	70.48	119.70	3.097	67.68	118.90	2.974
51	69.53	119.20	3.055	71.84	119.90	3.156	68.19	121.60	2.996
52	70.77	121.00	3.109	72.04	121.00	3.165	68.56	120.90	3.012
53	70.78	121.50	3.110	72.43	119.80	3.182	69.33	120.00	3.046
54	70.89	120.50	3.115	72.53	120.40	3.187	69.71	118.80	3.063
55	70.99	119.00	3.119	72.89	120.30	3.202	70.21	118.30	3.085
56	71.45	119.60	3.139	73.13	119.60	3.213	70.45	118.50	3.095
57	71.82	120.10	3.155	73.52	120.10	3.230	70.88	119.00	3.114
58	71.83	120.70	3.156	73.78	121.60	3.242	71.12	118.70	3.125
59	72.09	121.60	3.167	74.00	121.80	3.251	71.83	118.30	3.156
60	73.87	121.80	3.246	74.33	118.90	3.266	71.83	118.30	3.156
61	74.10	118.90	3.256	74.66	121.60	3.280	72.56	117.80	3.188
62	74.48	119.50	3.272	74.98	120.90	3.294	73.62	119.30	3.235
63	74.71	119.90	3.282	75.22	119.60	3.305	73.96	119.30	3.249
64	75.39	117.50	3.312	75.72	119.00	3.327	74.76	118.60	3.285
65	75.73	119.60	3.327	75.82	119.00	3.331	75.30	118.30	3.308
66	75.79	120.90	3.330	76.18	118.30	3.347	75.56	118.40	3.320
67	76.45	120.10	3.359	76.45	119.60	3.359	76.06	116.80	3.342
68	77.12	119.60	3.388	76.87	119.80	3.377	77.14	116.20	3.389
69	77.50	119.80	3.405	77.29	119.40	3.396	77.62	115.80	3.410
70	77.87	119.90	3.421	77.71	119.60	3.414	78.21	115.80	3.436
71	78.45	118.30	3.447	77.93	121.00	3.424	78.75	115.20	3.460
72	78.45	118.30	3.447	78.35	119.30	3.442	79.13	114.70	3.477
73	79.55	118.70	3.495	78.54	119.40	3.451	80.07	114.30	3.518
74	79.64	119.00	3.499	79.06	119.80	3.474	80.71	113.50	3.546
75	79.64	119.00	3.499	79.06	119.80	3.474	81.40	113.30	3.576
76	80.86	118.30	3.553	79.79	119.80	3.506	81.85	112.80	3.596
77	81.34	117.80	3.574	80.08	119.80	3.518	82.39	112.60	3.620
78	81.34	117.80	3.574	80.08	119.80	3.518	82.74	111.80	3.635
79	81.76	117.70	3.592	81.07	117.50	3.562	83.13	111.40	3.652
80	82.08	117.20	3.606	81.28	117.90	3.571	83.34	111.00	3.662
81	82.11	116.80	3.608	81.28	117.90	3.571	84.06	110.50	3.693
82	82.12	115.60	3.608	81.99	117.70	3.602	84.06	110.50	3.693
83	82.22	114.70	3.612	82.95	119.00	3.645	84.02	110.40	3.692
84	82.22	114.70	3.612	82.95	119.00	3.645	83.68	109.10	3.677
85	82.32	114.20	3.617	83.24	117.60	3.657	83.54	108.80	3.670
86	82.43	113.50	3.622	83.54	118.80	3.670	83.54	108.80	3.670
87	82.43	113.50	3.622	83.82	111.20	3.683	83.54	108.80	3.670
88	82.43	113.50	3.622	83.82	111.20	3.683	83.54	108.80	3.670
89	82.76	111.50	3.636	80.73	110.00	3.547	83.52	108.10	3.670
90	82.88	111.20	3.641	80.73	110.00	3.547	83.52	108.10	3.670

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าที่ความถี่ 12 kHz ของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	C (pF)	R (k Ω)	ϵ'	C (pF)	R (k Ω)	ϵ'	C (pF)	R (k Ω)	ϵ'
1	57.70	880.10	2.535	89.48	550.80	3.932	70.14	930.80	3.082
2	61.29	863.60	2.693	92.71	532.30	4.074	76.72	912.80	3.371
3	63.15	865.20	2.775	94.84	520.90	4.167	79.53	918.80	3.495
4	64.92	862.50	2.853	95.20	513.90	4.183	81.58	872.60	3.585
5	65.91	854.70	2.896	95.70	513.20	4.205	82.13	883.70	3.609
6	67.20	861.90	2.953	96.22	510.90	4.228	82.70	872.20	3.634
7	68.74	845.90	3.021	96.96	512.80	4.261	83.20	868.70	3.660
8	69.76	849.10	3.065	97.46	515.70	4.283	83.21	852.30	3.656
9	70.13	839.30	3.082	97.98	516.50	4.305	82.93	851.50	3.644
10	70.69	830.70	3.106	98.15	519.20	4.313	83.53	844.20	3.670
11	71.04	838.60	3.122	98.37	521.70	4.323	83.50	855.30	3.669
12	71.42	811.80	3.138	98.82	522.60	4.342	83.30	846.70	3.660
13	71.40	817.20	3.137	98.91	522.70	4.346	83.63	842.20	3.675
14	71.87	810.20	3.158	99.06	521.00	4.353	83.73	842.80	3.679
15	72.70	789.10	3.138	99.21	522.20	4.342	83.89	831.40	3.660
16	72.98	780.00	3.207	99.78	523.70	4.385	83.90	847.90	3.687
17	73.42	770.90	3.226	99.64	521.80	4.378	84.08	844.80	3.695
18	73.88	766.90	3.195	99.92	516.80	4.342	84.77	866.10	3.686
19	73.96	776.00	3.250	100.04	522.30	4.396	84.04	854.60	3.693
20	74.03	769.80	3.253	100.43	520.70	4.413	83.76	876.70	3.681
21	75.12	774.10	3.246	100.75	520.00	4.391	84.29	868.00	3.725
22	75.74	774.20	3.328	100.97	519.20	4.437	83.93	870.80	3.688
23	75.83	778.80	3.332	101.40	519.00	4.456	84.94	851.90	3.732
24	76.24	780.80	3.301	101.64	520.40	4.427	83.80	867.70	3.704
25	76.32	776.10	3.354	101.66	523.60	4.467	84.18	870.60	3.699
26	76.42	778.50	3.358	101.95	521.20	4.480	83.07	870.70	3.650
27	76.58	777.50	3.350	102.43	525.70	4.466	84.31	870.70	3.682
28	76.65	778.70	3.368	102.59	519.70	4.508	83.77	873.70	3.681
29	76.06	775.90	3.342	102.70	524.10	4.513	84.33	870.60	3.706
30	76.28	776.40	3.195	102.87	523.00	4.360	84.11	867.72	3.686
31	76.36	774.10	3.355	103.01	530.00	4.526	84.14	866.60	3.697
32	76.19	775.90	3.348	103.44	523.70	4.545	84.09	879.30	3.695
33	76.36	774.80	3.246	103.33	526.80	4.391	84.19	875.50	3.725
34	76.42	771.30	3.358	103.88	530.60	4.565	83.38	870.80	3.664
35	76.42	771.80	3.358	103.94	522.60	4.567	83.77	881.40	3.681
36	76.63	776.30	3.301	104.06	514.60	4.427	83.79	879.20	3.704
37	76.89	771.20	3.379	104.36	522.00	4.586	83.58	873.60	3.673
38	77.05	769.20	3.386	104.52	521.20	4.593	83.90	879.30	3.687
39	77.29	771.90	3.350	104.36	510.20	4.466	83.67	882.90	3.682
40	77.42	770.40	3.402	104.60	519.60	4.596	83.76	879.00	3.681
41	77.70	776.90	3.414	104.56	518.20	4.595	83.14	876.60	3.653
42	77.68	766.90	3.365	104.73	521.60	4.501	83.97	881.60	3.705
43	77.70	771.00	3.414	105.10	521.50	4.618	83.98	888.80	3.690
44	77.91	768.00	3.415	105.14	517.80	4.620	83.68	884.60	3.677
45	77.86	771.80	3.352	105.26	521.80	4.520	83.80	882.20	3.695
46	77.98	776.60	3.426	105.44	520.40	4.633	83.81	880.20	3.683
47	78.14	766.00	3.434	105.56	520.30	4.639	83.82	886.30	3.683
48	78.01	772.50	3.355	105.71	524.80	4.541	83.89	881.80	3.699
49	78.14	776.90	3.434	105.66	524.40	4.643	83.46	863.20	3.667
50	78.47	775.50	3.448	105.90	527.90	4.653	83.68	878.30	3.677
51	78.72	777.80	3.367	105.94	526.60	4.573	83.53	894.40	3.682
52	78.96	769.70	3.470	106.15	526.50	4.664	83.82	895.00	3.683
53	78.95	761.60	3.469	106.28	530.60	4.670	83.61	889.60	3.674
54	79.19	766.90	3.396	106.07	527.40	4.586	83.58	885.80	3.677
55	78.66	761.60	3.456	106.26	528.60	4.669	83.97	891.90	3.690
56	79.07	765.30	3.475	106.61	537.70	4.685	83.51	886.60	3.670
57	77.69	765.30	3.413	104.71	537.70	4.602	83.91	886.60	3.689
58	77.69	765.30	3.421	104.71	537.70	4.625	83.91	886.60	3.682
59	77.69	765.30	3.428	104.71	537.70	4.645	83.91	886.60	3.686
60	77.69	765.30	3.428	104.71	537.70	4.645	83.91	886.60	3.686

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าที่ความถี่ 100 kHz ของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2		
	C (pF)	R (k Ω)	ϵ'	C (pF)	R (k Ω)	ϵ'
1	59.35	139.10	2.608	61.95	147.20	2.722
2	62.60	127.40	2.751	66.14	135.10	2.906
3	64.71	123.80	2.843	67.91	127.10	2.984
4	65.94	119.70	2.898	69.32	122.90	3.046
5	66.62	114.30	2.927	70.27	120.80	3.087
6	67.40	111.50	2.961	70.92	118.60	3.116
7	67.75	108.60	2.977	71.54	118.10	3.143
8	68.10	107.00	2.992	71.88	116.20	3.158
9	68.33	105.20	3.002	72.08	115.90	3.167
10	68.67	105.00	3.018	72.28	114.60	3.176
11	68.86	104.40	3.026	72.34	113.20	3.178
12	68.99	104.7	3.031	72.43	112.70	3.182
13	69.18	104.40	3.040	72.46	113.20	3.184
14	69.34	104.20	3.047	72.45	112.70	3.183
15	69.26	104.00	3.043	72.36	112.60	3.179
16	69.38	102.90	3.049	72.78	112.30	3.198
17	69.49	101.30	3.054	72.95	112.50	3.205
18	69.46	112.50	3.052	72.95	112.80	3.205
19	69.54	101.40	3.056	72.83	112.40	3.200
20	69.62	101.70	3.059	72.85	112.80	3.201
21	69.53	101.70	3.055	72.78	112.00	3.198
22	69.63	101.60	3.060	72.73	111.70	3.195
23	69.54	101.70	3.056	72.74	112.20	3.196
24	69.58	101.60	3.057	72.72	111.90	3.195
25	69.54	102.00	3.056	72.70	111.60	3.194
26	69.75	101.90	3.065	72.62	111.60	3.191
27	69.80	102.30	3.067	72.50	113.50	3.185
28	69.61	102.30	3.059	72.47	114.00	3.184
29	69.69	102.50	3.062	72.45	113.70	3.183
30	69.57	102.20	3.057	72.44	113.00	3.183
31	69.53	102.20	3.055	72.36	114.50	3.179
32	69.64	101.80	3.060	72.44	114.00	3.183
33	69.66	102.00	3.061	72.38	113.60	3.180
34	69.65	101.90	3.061	72.35	113.70	3.179
35	69.67	102.00	3.061	72.42	113.50	3.182
36	69.67	101.90	3.061	72.37	112.70	3.180
37	69.68	101.90	3.061	72.35	113.50	3.179
38	69.60	101.70	3.058	72.37	112.50	3.180
39	69.60	101.70	3.058	72.31	113.60	3.177
40	69.60	101.60	3.058	72.31	113.00	3.177
41	69.76	101.40	3.058	72.35	113.20	3.179
42	69.68	101.40	3.061	72.34	113.00	3.178
43	69.84	101.80	3.062	72.36	113.20	3.179
44	69.79	101.80	3.070	72.37	113.20	3.180
45	69.79	101.80	3.066	72.40	113.20	3.181
46	69.79	101.80	3.067	72.37	113.20	3.180
47	69.79	101.80	3.067	72.40	113.20	3.181
48	69.79	101.80	3.066	72.40	113.20	3.181
49	69.79	101.80	3.066	72.40	113.20	3.180
50	69.63	101.50	3.059	72.35	113.10	3.179
51	69.79	101.80	3.066	72.35	113.10	3.179
52	69.79	101.80	3.050	72.40	113.20	3.181
53	69.74	101.90	3.064	72.40	113.20	3.181
54	69.79	101.80	3.050	72.40	113.20	3.181
55	69.79	101.80	3.065	72.40	113.20	3.181
56	69.74	101.90	3.064	72.40	113.20	3.181
57	69.79	101.80	3.065	72.40	113.20	3.181
58	69.79	101.80	3.065	72.40	113.20	3.181
59	69.79	101.80	3.065	72.40	113.20	3.181
60	69.74	101.90	3.064	72.40	113.20	3.181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิคที่อัตราการให้ความร้อน $4.95^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ที่ให้กระแสไฟฟ้า 1A

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการให้ความร้อน $4.95^{\circ}\text{C}/\text{min}$					
	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2		การทดลองครั้งที่ 3	
	V (V)	σ (mS/cm)	V (V)	σ (mS/cm)	V (V)	σ (mS/cm)
26	141.100	2.756	141.100	2.756	145.600	2.671
27	141.100	2.756	144.200	2.697	145.600	2.671
28	140.800	2.762	145.800	2.667	145.000	2.682
29	136.300	2.853	145.800	2.760	145.900	2.665
30	136.300	2.853	145.800	2.667	145.900	2.665
31	134.100	2.900	131.000	2.969	137.200	2.839
32	132.000	2.946	131.000	2.969	137.000	2.839
33	121.800	3.193	130.900	2.971	137.000	2.839
34	121.800	3.193	130.600	2.978	134.200	2.897
35	121.300	3.206	130.600	2.978	133.700	2.909
36	121.500	3.201	130.100	2.989	122.900	3.164
37	121.400	3.203	129.900	2.994	122.900	3.164
38	118.100	3.293	129.900	3.060	123.000	3.162
39	118.100	3.201	129.900	2.994	122.200	3.182
40	118.100	3.201	124.800	3.116	122.200	3.182
41	117.800	3.301	111.700	3.482	113.800	3.417
42	109.500	3.301	111.700	3.482	114.900	3.384
43	109.300	3.551	118.800	3.273	114.900	3.384
44	109.600	3.545	117.800	3.482	113.500	3.426
45	109.600	3.548	118.000	3.296	113.300	3.432
46	109.700	3.545	108.000	3.601	113.300	3.432
47	109.700	3.545	112.800	3.448	113.300	3.665
48	109.200	3.561	117.900	3.298	112.800	3.447
49	100.500	3.870	107.700	3.611	106.100	3.665
50	106.700	3.665	108.700	3.578	105.300	3.693
51	104.600	3.718	105.800	3.674	105.600	3.682
52	104.300	3.729	108.300	3.591	105.300	3.693
53	101.700	3.824	108.300	3.591	104.800	3.710
54	101.200	3.843	106.100	3.665	95.300	4.080
55	97.700	3.840	105.900	3.672	96.600	4.025
56	97.700	3.840	96.100	4.047	95.600	4.067
57	95.800	4.059	103.100	3.772	95.500	4.072
58	97.400	3.993	102.600	3.790	94.900	4.097
59	97.400	3.993	98.200	3.960	94.200	4.128
60	96.900	4.013	98.700	3.940	94.700	4.106
61	89.300	4.355	98.800	3.936	94.700	4.106
62	89.800	4.331	99.500	4.085	94.400	4.119
63	89.800	4.331	95.000	4.094	92.800	4.190
64	88.500	4.475	94.900	4.098	91.000	4.273
65	86.300	4.517	94.700	4.107	91.500	4.250
66	86.200	4.511	94.700	4.191	90.000	4.320
67	86.100	4.517	93.800	4.218	90.000	4.320
68	85.800	4.533	90.700	4.288	89.000	4.370
69	85.700	4.538	89.500	4.345	89.300	4.354
70	85.800	4.533	88.500	4.394	82.900	4.691
71	85.500	4.548	87.500	4.445	83.300	4.669
72	85.300	4.559	87.100	4.465	82.800	4.696
73	84.700	4.591	86.500	4.496	82.800	4.696
74	82.800	4.697	86.000	4.522	82.900	4.691
75	82.900	4.691	85.000	4.575	82.600	4.708
76	82.100	4.737	83.700	4.646	82.400	4.719
77	81.900	4.748	83.300	4.669	82.600	4.708
78	82.300	4.725	83.300	4.669	80.400	4.836
79	79.900	4.867	81.600	4.766	80.400	4.836
80	89.600	4.873	81.200	4.789	79.600	4.885
81	79.800	4.873	81.000	4.801	79.500	4.891
82	78.100	4.979	80.200	4.849	78.400	4.960
83	77.200	5.005	79.600	4.886	78.400	4.960
84	77.900	4.992	79.500	4.892	78.100	4.979
85	77.100	5.044	77.900	4.992	78.300	4.966
86	74.400	5.227	77.300	5.031	76.600	5.076
87	74.400	5.227	74.400	5.227	77.100	5.043
88	74.300	5.234	73.600	5.284	76.500	5.083
89	74.200	5.241	73.700	5.277	75.000	5.185
90	74.000	5.250	74.800	5.199	75.200	5.171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิคที่อัตราการให้ความร้อน 16.84°C/min ที่ให้กระแสไฟฟ้า 2A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการให้ความร้อน 16.84°C/min					
	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2		การทดลองครั้งที่ 3	
	V (V)	σ (mS/cm)	V (V)	σ (mS/cm)	V (V)	σ (mS/cm)
26	235.400	3.304	229.500	3.389	234.800	3.313
27	235.400	3.304	229.500	3.389	234.800	3.313
28	235.400	3.304	229.500	3.389	234.800	3.313
29	235.400	3.304	229.500	3.389	234.800	3.313
30	235.400	3.304	229.400	3.390	234.800	3.313
31	235.400	3.304	229.400	3.390	223.700	3.477
32	235.300	3.305	229.400	3.390	223.700	3.477
33	235.300	3.305	229.400	3.390	223.700	3.477
34	235.300	3.305	207.200	3.753	223.700	3.477
35	235.300	3.305	207.200	3.753	213.800	3.638
36	214.400	3.627	198.500	3.918	213.800	3.638
37	214.400	3.627	198.500	3.918	204.600	3.801
38	214.400	3.627	198.500	3.918	204.600	3.801
39	202.900	3.833	198.500	3.918	204.600	3.801
40	202.900	3.833	198.500	3.918	204.600	3.801
41	202.900	3.833	184.300	4.220	204.600	3.801
42	202.900	3.833	184.300	4.220	196.000	3.968
43	202.900	3.833	184.300	4.220	196.000	3.968
44	196.600	3.956	184.300	4.220	196.000	3.968
45	196.600	3.956	176.100	4.416	185.400	4.195
46	196.600	3.956	176.100	4.416	185.400	4.195
47	156.300	4.976	175.200	4.439	185.400	4.195
48	156.300	4.976	175.200	4.439	185.400	4.195
49	156.300	4.976	175.200	4.439	178.200	4.365
50	156.300	4.976	169.200	4.596	178.200	4.365
51	156.300	4.976	169.200	4.596	178.200	4.365
52	184.500	4.215	169.200	4.596	178.200	4.365
53	184.500	4.215	163.000	4.771	168.400	4.619
54	184.500	4.215	163.000	4.771	168.400	4.619
55	167.700	4.637	163.000	4.771	168.400	4.619
56	167.700	4.637	163.000	4.771	170.200	4.570
57	167.700	4.637	163.000	4.771	170.200	4.570
58	167.700	4.637	161.000	5.216	170.200	4.570
59	160.800	4.836	149.100	5.298	164.000	4.743
60	155.500	5.001	149.100	5.298	164.000	4.743
61	155.500	5.001	146.800	5.248	164.000	4.743
62	155.500	5.001	146.800	5.248	156.700	4.963
63	155.500	5.001	146.800	5.248	156.700	4.963
64	155.500	5.001	148.200	5.248	156.700	4.963
65	152.600	5.096	148.200	5.248	154.600	5.031
66	152.600	5.096	145.400	5.349	154.600	5.031
67	152.600	5.096	145.400	5.349	154.600	5.031
68	149.600	5.199	145.400	5.349	154.600	5.031
69	149.600	5.199	140.800	5.523	145.500	5.345
70	149.600	5.199	140.800	5.523	144.800	5.371
71	149.600	5.199	140.200	5.547	144.800	5.371
72	149.600	5.199	140.200	5.547	144.200	5.394
73	142.100	5.473	140.200	5.547	144.200	5.394
74	142.100	5.473	135.700	5.731	144.200	5.394
75	140.900	5.520	135.700	5.731	140.000	5.556
76	140.900	5.520	133.300	5.834	140.000	5.556
77	140.900	5.520	133.300	5.834	140.000	5.556
78	140.400	5.539	133.300	5.834	136.400	5.702
79	140.400	5.539	133.300	5.834	136.400	5.702
80	140.400	5.539	133.300	5.834	135.700	5.732
81	140.400	5.520	128.700	6.043	135.700	5.732
82	136.00	5.718	128.700	6.043	135.700	5.732
83	136.00	5.718	128.400	6.057	135.700	5.732
84	132.400	5.874	128.400	6.057	129.200	6.019
85	131.500	5.914	123.600	6.292	129.200	6.019
86	131.500	5.914	123.600	6.292	128.700	6.043
87	130.200	5.973	123.100	6.057	128.700	6.043
88	130.200	5.973	123.100	6.057	123.800	6.282
89	130.200	5.973	123.400	6.318	123.800	6.282
90	124.200	6.262	123.400	6.318	122.700	6.338

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิคที่อัตราการให้ความร้อน $31.02^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ที่ให้กระแสไฟฟ้า 3A

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการให้ความร้อน $31.02^{\circ}\text{C}/\text{min}$					
	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2		การทดลองครั้งที่ 3	
	V (V)	σ (mS/cm)	V (V)	σ (mS/cm)	V (V)	σ (mS/cm)
26	301.020	3.876	313.200	3.725	309.200	3.773
27	301.020	3.876	313.200	3.725	309.200	3.773
28	301.020	3.876	313.200	3.725	309.200	3.773
29	301.020	3.876	313.200	3.725	309.200	3.773
30	301.020	3.876	313.200	3.725	309.200	3.773
31	301.020	3.876	313.200	3.725	309.200	3.773
32	301.020	3.876	313.200	3.725	309.200	3.773
33	280.000	4.167	313.200	3.725	309.200	3.773
34	280.000	4.167	299.700	3.893	297.000	3.928
35	280.000	4.167	299.700	3.893	297.000	3.928
36	280.000	4.167	299.700	3.893	297.000	3.928
37	280.000	4.167	299.700	3.893	297.000	3.928
38	280.000	4.167	299.700	3.893	297.000	3.928
39	280.000	4.167	299.700	3.893	297.000	3.928
40	266.200	4.383	299.700	3.893	297.000	3.928
41	266.200	4.383	299.700	3.893	297.000	3.928
42	266.200	4.383	266.700	4.374	270.200	4.318
43	266.200	4.383	266.700	4.374	270.200	4.318
44	266.200	4.383	266.700	4.374	270.200	4.318
45	266.200	4.383	266.700	4.374	270.200	4.318
46	266.200	4.383	266.700	4.374	270.200	4.318
47	266.220	4.383	266.700	4.374	270.200	4.318
48	244.100	4.779	250.000	4.667	251.000	4.648
49	244.100	4.779	250.000	4.667	251.000	4.648
50	244.100	4.779	250.000	4.667	251.000	4.648
51	244.100	4.779	250.000	4.667	251.000	4.648
52	244.100	4.779	250.000	4.667	251.000	4.648
53	244.100	4.779	250.000	4.667	251.000	4.648
54	230.500	5.061	231.700	5.035	231.800	5.033
55	230.500	5.061	231.700	5.035	231.800	5.033
56	230.500	5.061	231.700	5.035	231.800	5.033
57	230.500	5.061	231.700	5.035	231.800	5.033
58	230.500	5.061	231.700	5.035	231.800	5.033
59	230.500	5.061	231.700	5.035	231.800	5.033
60	230.500	5.061	219.300	5.320	215.500	5.414
61	220.030	5.302	219.300	5.320	215.500	5.414
62	220.030	5.302	219.300	5.320	215.500	5.414
63	220.030	5.302	219.300	5.320	215.500	5.414
64	220.030	5.302	219.300	5.320	215.500	5.414
65	220.030	5.302	219.300	5.319	215.500	5.414
66	210.300	5.548	210.200	5.550	205.100	5.688
67	210.300	5.548	210.200	5.550	205.100	5.688
68	210.300	5.548	210.200	5.550	205.100	5.688
69	210.300	5.548	210.200	5.550	205.100	5.688
70	201.600	5.787	210.200	5.550	205.100	5.688
71	201.600	5.787	196.500	5.937	194.600	5.995
72	201.600	5.787	196.500	5.937	194.600	5.995
73	201.600	5.787	196.500	5.937	194.600	5.995
74	201.600	5.787	196.500	5.937	194.600	5.995
75	190.300	6.131	196.500	5.937	194.600	5.995
76	190.300	6.131	188.100	6.202	186.500	6.256
77	190.300	6.131	188.100	6.202	186.500	6.256
78	190.300	6.131	188.100	6.202	186.500	6.256
79	190.300	6.131	188.100	6.202	186.500	6.256
80	183.100	6.372	188.100	6.202	186.500	6.256
81	183.100	6.372	180.800	6.453	177.200	6.584
82	183.100	6.372	180.800	6.453	177.200	6.584
83	183.100	6.372	180.800	6.453	177.200	6.584
84	183.100	6.372	180.800	6.453	177.200	6.584
85	173.600	6.720	179.500	6.499	174.300	6.693
86	173.600	6.720	179.500	6.499	174.300	6.693
87	173.600	6.720	179.500	6.499	174.300	6.693
88	173.600	6.720	179.500	6.499	174.300	6.693
89	168.300	6.932	179.100	6.514	172.900	6.748
90	161.100	7.242	178.700	6.529	170.500	6.843

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าการนำไฟฟ้าของน้ำนมถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆ ในระหว่าง
กระบวนการพอร์มเจลเป็นเต้าหู้

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	V (V)	I (A)	σ (mS/cm)	V (V)	I (A)	σ (mS/cm)	V (V)	I (A)	σ (mS/cm)
1	17.3	0.348	7.822	17.3	0.357	8.025	17.2	0.318	7.189
2	17.3	0.356	8.002	17.3	0.359	8.070	17.2	0.328	7.416
3	17.3	0.359	8.070	17.3	0.364	8.180	17.2	0.337	7.619
4	17.3	0.362	8.137	17.2	0.366	8.275	17.2	0.345	7.800
5	17.3	0.365	8.204	17.2	0.369	8.343	17.2	0.352	7.958
6	17.3	0.367	8.249	17.2	0.371	8.388	17.2	0.358	8.094
7	17.3	0.370	8.317	17.2	0.372	8.410	17.2	0.363	8.207
8	17.3	0.372	8.362	17.2	0.374	8.456	17.1	0.367	8.346
9	17.3	0.371	8.339	17.3	0.376	8.452	17.1	0.371	8.437
10	17.3	0.373	8.384	17.3	0.377	8.474	17.1	0.374	8.505
11	17.1	0.375	8.528	17.3	0.379	8.519	17.1	0.378	8.596
12	17.1	0.375	8.528	17.3	0.379	8.519	17.1	0.381	8.647
13	17.1	0.375	8.528	17.3	0.380	8.542	17.1	0.383	8.710
14	17.1	0.376	8.551	17.3	0.380	8.542	17.1	0.386	8.778
15	17.1	0.377	8.573	17.3	0.381	8.564	17.1	0.388	8.823
16	17.1	0.379	8.619	17.3	0.381	8.564	17.1	0.389	8.846
17	17.1	0.381	8.664	17.3	0.381	8.564	17.1	0.391	8.892
18	17.1	0.381	8.664	17.3	0.381	8.564	17.1	0.391	8.892
19	17.1	0.383	8.710	17.3	0.382	8.587	17.1	0.391	8.892
20	17.1	0.384	8.732	17.3	0.382	8.587	17.1	0.395	8.983
21	17.1	0.384	8.732	17.3	0.381	8.564	17.1	0.395	8.983
22	17.1	0.384	8.732	17.3	0.381	8.564	17.1	0.396	9.005
23	17.2	0.385	8.704	17.4	0.383	8.560	17.1	0.397	9.028
24	17.2	0.387	8.750	17.3	0.382	8.587	17.1	0.398	9.051
25	17.2	0.387	8.750	17.3	0.381	8.564	17.1	0.399	9.074
26	17.2	0.386	8.727	17.3	0.382	8.587	17.1	0.399	9.074
27	17.2	0.386	8.727	17.3	0.381	8.564	17.1	0.399	9.074
28	17.2	0.386	8.727	17.3	0.382	8.587	17.1	0.401	9.119
29	17.1	0.384	8.732	17.3	0.382	8.587	17.1	0.401	9.119
30	17.1	0.384	8.732	17.3	0.382	8.587	17.1	0.401	9.119
31	17.2	0.385	8.704	17.4	0.381	8.515	17.1	0.401	9.119
32	17.2	0.385	8.704	17.4	0.381	8.515	17.1	0.401	9.119
33	17.2	0.384	8.682	17.4	0.381	8.515	17.1	0.401	9.119
34	17.2	0.383	8.659	17.4	0.381	8.515	17.1	0.401	9.119
35	17.1	0.384	8.732	17.4	0.382	8.537	17.1	0.401	9.119
36	17.1	0.384	8.732	17.2	0.377	8.523	17.1	0.401	9.119
37	17.1	0.383	8.710	17.1	0.378	8.596	17.1	0.401	9.119
38	17.1	0.383	8.710	17.2	0.377	8.523	17.1	0.401	9.119
39	17.2	0.384	8.682	17.2	0.377	8.523	17.1	0.401	9.119
40	17.2	0.384	8.682	17.2	0.376	8.501	17.2	0.406	9.179
41	17.2	0.384	8.682	17.2	0.376	8.501	17.2	0.406	9.179
42	17.1	0.383	8.710	17.2	0.376	8.501	17.3	0.410	9.216
43	17.1	0.382	8.687	17.4	0.379	8.470	17.3	0.410	9.216
44	17.1	0.382	8.687	17.4	0.379	8.470	17.3	0.410	9.216
45	17.1	0.383	8.710	17.4	0.380	8.492	17.3	0.410	9.216
46	17.1	0.383	8.710	17.4	0.380	8.492	17.3	0.410	9.216
47	17.1	0.383	8.710	17.4	0.381	8.515	17.3	0.410	9.216
48	17.1	0.382	8.738	17.4	0.381	8.515	17.3	0.410	9.216
49	17.1	0.382	8.738	17.5	0.383	8.511	17.3	0.406	9.126
50	17.0	0.380	8.692	17.5	0.383	8.511	17.3	0.409	9.194
51	17.1	0.381	8.664	17.4	0.380	8.492	17.3	0.409	9.194
52	17.0	0.381	8.715	17.4	0.380	8.492	17.3	0.409	9.194
53	17.0	0.381	8.715	17.4	0.380	8.492	17.3	0.409	9.194
54	17.0	0.381	8.715	17.4	0.380	8.492	17.3	0.409	9.194
55	17.2	0.384	8.682	17.4	0.382	8.537	17.3	0.409	9.194
56	17.2	0.384	8.682	17.4	0.383	8.560	17.3	0.409	9.194
57	17.2	0.384	8.682	17.4	0.383	8.560	17.3	0.409	9.194
58	17.2	0.384	8.682	17.4	0.382	8.537	17.3	0.409	9.194
59	17.2	0.385	8.704	17.4	0.382	8.537	17.3	0.409	9.194
60	17.2	0.385	8.704	17.4	0.382	8.537	17.3	0.409	9.194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของ น้ำนมถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2		การทดลองครั้งที่ 3	
	pH	ABS	pH	ABS	pH	ABS
3	5.82	0.50	5.88	0.45	5.77	0.53
6	5.78	0.44	5.82	0.43	5.80	0.46
9	5.77	0.47	5.84	0.47	5.74	0.46
12	5.79	0.44	5.86	0.44	5.72	0.45
15	5.80	0.41	5.86	0.39	5.72	0.43
18	5.80	0.44	5.85	0.42	5.69	0.44
21	5.78	0.45	5.86	0.43	5.67	0.44
30	5.79	0.34	5.86	0.33	5.68	0.34
40	5.80	0.43	5.85	0.34	5.68	0.43
50	5.80	0.33	5.79	0.28	5.68	0.23
60	5.68	0.35	5.80	0.32	5.60	0.34

ตารางที่ ก.10 แสดงข้อมูลความหนืดน้ำนมถั่วเหลืองโดยการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วย เทคนิคโอห์มมิคที่อัตราการให้ความร้อน 4.95 16.84 และ 31.02°C/min

อัตราการให้ความร้อน (°C/min)	การทดลองครั้งที่	ความหนืดน้ำนมถั่วเหลือง	
		ดิบ (cP)	สุก (cP)
4.95	1	22.2	17.9
	2	20.3	19.1
	3	22.6	19.2
16.84	1	17.5	18.9
	2	18.8	20.5
	3	22.3	18.7
31.02	1	21.7	19.3
	2	22.7	19.4
	3	25.7	19.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 แสดงข้อมูลลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ โดยการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อน 4.95 16.84 และ 31.02°C/min

อัตราการให้ความร้อน (°C/min)	การทดลองครั้งที่	Hardness (N)	Gumminess (N/mm ²)	Springiness	Cohesiveness
4.95	1	1.233	1.775	0.849	1.440
	2	1.272	1.866	0.846	1.467
	3	1.116	1.528	0.821	1.369
	4	1.033	1.410	0.847	1.365
	5	1.395	2.095	0.849	1.502
	6	1.237	1.795	0.850	1.451
16.84	1	1.520	2.120	0.854	1.395
	2	1.501	2.113	0.854	1.408
	3	1.295	1.804	0.862	1.393
	4	1.517	2.109	0.870	1.390
	5	1.472	2.058	0.870	1.398
	6	1.439	2.019	0.852	1.403
31.02	1	1.172	1.688	0.860	1.440
	2	0.951	1.243	0.830	1.307
	3	1.234	1.744	0.856	1.413
	4	0.992	1.397	0.859	1.409
	5	1.037	1.435	0.840	1.384
	6	1.005	1.352	0.846	1.345

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 12 kHz ของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (26°C) จนถึง 92°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	27.526	22	1.251	129.661	.000
Within Groups	.222	23	.010		
Total	27.748	45			

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 100 kHz ของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (26°C) จนถึง 92°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9.225	22	.419	221.819	.000
Within Groups	.087	46	.002		
Total	9.312	68			

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 12 kHz ของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.695	19	.037	.100	1.000
Within Groups	14.667	40	.367		
Total	15.363	59			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 100 kHz ของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1.067	20	.053	6.505	.000
Within Groups	.172	21	.008		
Total	1.240	41			

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อน 4.95 16.84 และ 31.02°C/min

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
EC1	Between Groups	43.466	22	1.976	193.660	.000
	Within Groups	.469	46	.010		
	Total	43.936	68			
EC2	Between Groups	59.256	22	2.693	96.036	.000
	Within Groups	1.290	46	.028		
	Total	60.546	68			
EC3	Between Groups	74.133	22	3.370	193.914	.000
	Within Groups	.799	46	.017		
	Total	74.933	68			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าการนำไฟฟ้าการดูดกลืนแสง (ABS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำนมถั่วเหลืองที่เวลาต่างๆ ในระหว่างกระบวนการฟอร์มเจลเป็นเต้าหู้

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
abs	Between Groups	.497	11	.045	65.698	.000
	Within Groups	.017	24	.001		
	Total	.514	35			
EC	Between Groups	5.495	11	.500	6.952	.000
	Within Groups	1.725	24	.072		
	Total	7.220	35			
pH	Between Groups	.213	11	.019	3.639	.004
	Within Groups	.128	24	.005		
	Total	.341	35			

ตารางที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนืดของน้ำนมถั่วเหลืองโดยการให้ความร้อนน้ำนมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิคที่อัตราการให้ความร้อน 4.95 16.84 และ 31.02°C/min

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
viscosity 1	Between Groups	.896	2	.448	.884	.461
	Within Groups	3.040	6	.507		
	Total	3.936	8			
viscosity 2	Between Groups	22.167	2	11.083	2.769	.141
	Within Groups	24.013	6	4.002		
	Total	46.180	8			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้โดยการให้ความร้อนนํ้านมถั่วเหลืองด้วยเทคนิคโอห์มมิกที่อัตราการให้ความร้อน 4.95 16.84 และ 31.02°C/min

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
springiness	Between Groups	.001	2	.000	3.980	.041
	Within Groups	.002	15	.000		
	Total	.003	17			
cohesiveness	Between Groups	.002	2	.001	2.017	.168
	Within Groups	.007	15	.000		
	Total	.009	17			
gumminess	Between Groups	.245	2	.122	32.450	.000
	Within Groups	.057	15	.004		
	Total	.301	17			
hardness	Between Groups	.470	2	.235	19.767	.000
	Within Groups	.178	15	.012		
	Total	.649	17			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ความหนีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดความหนืด (Brookfield RVTDV-I) พร้อมหัววัด (spindle)
2. บีกเกอร์ขนาด 250 ml
3. น้ำมันถั่วเหลือง

วิธีการทดลอง

1. ตั้งเครื่องวัดความหนืดให้ได้ระดับโดยดูที่ระดับลูกน้ำ
2. หมุนปุ่มความเร็วรอบที่ 10 rpm เปิดสวิตช์มอเตอร์แล้วปรับปุ่ม zero จนหน้าจออ่านค่าได้ 0 ปิดสวิตช์มอเตอร์
3. เลือกหัววัดขนาดเล็กสุด
4. ติดหัววัดเข้ากับเครื่องวัดความหนืด โดยจุ่มหัววัดลงไป ในน้ำมันเตาผู้เปิดสวิตช์มอเตอร์ปรับความเร็วรอบเริ่มต้น (5 rpm) รอเวลาอ่านค่าที่หน้าจอ
5. ถ้าค่าที่หน้าจอน้อยกว่า 10 (10% torque) ให้เปิดสวิตช์มอเตอร์แล้วเปลี่ยนไปที่ความเร็วรอบสูงขึ้น
6. ทำซ้ำข้อ 5 จนกว่าค่าที่หน้าจอมากกว่า 10 ให้เลือกใช้หัววัดและความเร็วรอบนั้นบันทึกค่า % torque ถ้าหัววัดนั้นวัดค่า torque ได้ไม่ถึง 10 ต้องทำการเปลี่ยนหัววัดใหม่เป็นเบอร์ที่สูงขึ้น และทำซ้ำข้อ 4-6
7. นำเบอร์หัววัดและความเร็วรอบที่ได้ มาหาค่า factor จาก ตาราง conversion factor แล้วนำไปคูณกับค่า torque ที่วัดได้

ตารางที่ ข.1 Conversion factor เพื่อหาค่า Apparent Viscosity ($k = 10^3$)

rpm	หมายเลขหัววัด						
	1	2	3	4	5	6	7
0.5	200	800	2k	4k	8k	20k	80000k
1.0	100	400	1k	2k	4k	10k	40000k
2.0	50	200	500	1k	2k	5k	20000k
2.5	40	160	400	800	1.6k	4k	16000k
4.0	25	100	250	500	1k	2.5k	10000k
5.0	10	80	200	400	800	2k	8000k
10.0	20	40	100	200	400	1k	4000k
20.0	5	20	50	100	200	500	2000k
50.0	2	8	20	40	80	200	8000
100.0	1	4	10	20	40	100	4000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้